



МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ИНЖЕНЕРНОМУ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЮ,

посвященной XX-летию
ООО НПО «Фундаментстройаркос»

Тюмень 7-10 ноября 2011

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL CONFERENCE ON PERMAFROST ENGINEERING,

devoted to the twentieth anniversary of the
RPA «FundamentStroyArcos»

Tyumen 7-10 November 2011

УДК 624.139
ББК 38.79
П78

ISBN 978-5-93254-102-9

Proceedings of the International scientific-practical Conferenceon Permafrost Engineering, devoted to the twentieth anniversary of the SPA «FundamentStroyArcos»– Tyumen. Printed by LLC "City-Press", 2011. 456 p., 24 p. ill.

Sponsor

SPA «FundamentStroyArcos»

Organizing Committee

Co-chairs:

Dolgikh Gregory M. - Director General of the NGO «FundamentStroyArcos»
Melnikov, Vladimir P. - Director of the Institute of Earth Cryosphere, SB RAS, Academician
Bruschkov Anatoliy V. - Head of the Department of permafrost Geological Faculty of Moscow State University
Kushnir Simon Y. - Head of Soil Mechanics, the basis and foundations of oil and gas facilities Tyumen State oil and gas University
Osokin Alexey B. - Deputy Director of ITC Ltd. 'Gazprom dobycha Nadym»

Organizing Committee:

Velchev S.P., Okunev S.N., Strizhkov S.N., Dolgikh D.G., Vlasov V.F.

Scientific Secretaries of the Conference:

Ryzhkova Anastasia V. SPA «FundamentStroyArcos»
Kalinina Inna O. SPA «FundamentStroyArcos»
Yudina Elena E. SPA «FundamentStroyArcos»
Rubel Oksana Y. SPA «FundamentStroyArcos»

The publication represents the reports of scientists and specialists to the theoretical and practical solution to the problems and challenges in research, design, construction in the Far North.
The publication is intended for professionals in the design, construction, geotechnical monitoring objects in the permafrost, as well as for graduate and undergraduate students of technical universities.

© ООО Научно-производственное объединение «Фундаментстройаркос», 2011

ООО Научно-производственное объединение
«ФУНДАМЕНТСТРОЙАРКОС»

Материалы

Международной научно-практической Конференции
по инженерному мерзлотоведению,
посвященной 20-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос»

7-10 ноября 2011

Тюмень 2011

УДК 624.139
ББК 38.79
П78

ISBN 978-5-93254-102-9

Материалоы Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос» – Тюмень. Отпечатано в типографии "Сити-Пресс" в 2011г. 456 стр., 24 стр. илл.

Спонсор

ООО НПО «ФундаментСтройАркос»

Оргкомитет

Сопредседатели:

Долгих Григорий Меркулович, кандидат технических наук – генеральный директор ООО НПО «Фундаментстройаркос»;

Мельников Владимир Павлович – директор Института криосферы Земли СО РАН, академик РАН;

Брушков Анатолий Викторович, доктор геолого-минералогических наук, профессор – заведующий кафедрой геокриологии, геологический факультет МГУ;

Кушнир Семен Яковлевич, доктор технических наук, профессор – заведующий кафедрой механики грунтов, оснований и фундаментов нефтегазовых объектов ТюмГНГУ

Осокин Алексей Борисович, кандидат геолого-минералогических наук – заместитель директора ИТЦ ООО «Газпромдобыча Надым».

Оргкомитет Конференции:

Вельчев С.П., Окунев С.Н., Стрижков С.Н., Долгих Д.Г., Власов В.Ф.

Ученые секретари конференции:

Рыжкова Анастасия Валерьевна ООО НПО «Фундаментстройаркос,

Калинина Инна Олеговна ООО НПО «Фундаментстройаркос,

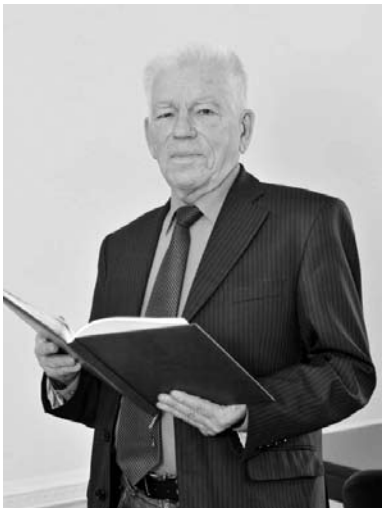
Юдина Елена Евгеньевна ООО НПО «Фундаментстройаркос,

Рубель Оксана Юрьевна ООО НПО «Фундаментстройаркос

В сборнике представлены доклады ученых и специалистов, направленные на теоретическое и практическое решение проблем и задач в области научных исследований, проектирования, строительства в районах Крайнего Севера.

Издание предназначено для специалистов в области проектирования, строительства, геотехнического мониторинга объектов, находящихся в криолитозоне, а также для аспирантов и студентов технических ВУЗов.

© ООО Научно-производственное объединение «Фундаментстройаркос», 2011



Дорогие друзья и коллеги!

С большим удовольствием приветствую участников и гостей Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной 20-летию ООО НПО «Фундаментстройаркос».

Уже целых два десятилетия отделяют нас от того момента, когда группой специалистов-энтузиастов лаборатории замораживания грунтов института «Гипротюменьнефтегаз» была организована научно-внедренческая фирма «Аркос».

Сегодня, используя наш многолетний опыт, мы с искренним чувством гордости говорим о достигнутом и с уверенностью смотрим в будущее. Эту конференцию ООО НПО «Фундаментстройаркос» организовало в преддверии своего 20-летия со дня основания.

Являясь истинными сибиряками, которые всегда славились основательностью и упорством, в краю, где сама природа заставляет строить прочно, надежно, на века - два десятилетия назад и было решено создать предприятие данного профиля, «фундаментом» которого стала группа специалистов-энтузиастов лаборатории замораживания грунтов института «Гипротюменьнефтегаз». А сейчас – это современное инновационное предприятие, двери которого сегодня открыты для Вас. И я приглашаю Вас, дорогие друзья, познакомиться с нашим предприятием, посетив ключевые подразделения, расположенные в городе Тюмени: научно-исследовательский мерзлотный полигон и цеха по производству готовых изделий.

От всей души желаю Вам, участникам конференции, творческой и плодотворной работы, новых научных открытий, тесного сотрудничества. Благодарю участников и гостей, приехавших в Тюмень из многих регионов России и из-за рубежа. Желаю Вам получить новые знания и стимулы, которые всегда появляются в результате общения.

До новых встреч!

Спасибо за внимание.

Генеральный директор
ООО НПО «Фундаментстройаркос» Г.М. Долгих

ГОСТИ И УЧАСТНИКИ КОНФЕНЦИИ

Permafrost International. Inc. Оттава, Канада
Институт криосферы Земли СО РАН, г. Тюмень
Московский государственный университет, г. Москва
Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень
ИТЦ ООО «Газпромдобыча Надым»
Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, г. Тюмень
ФГБОУ ВПО Тюменский государственный университет, г. Тюмень
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва
НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, г. Москва
ОАО «ЮЖНИИГИПРОГАЗ», Украина, г.Донецк
ОАО «ВНИПИгаздобыча», г. Саратов
ОАО «Проектранстрой», г. Москва
ОАО «ПИиНИИ ВТ «Ленаэропроект», г. Санкт-Петербург
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г.Якутск
Институт проблем освоения Севера СО РАН, г. Тюмень
Институт проблем нефти и газа СО РАН, г.Якутск
Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения РАН, г. Якутск
ОАО ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, г. Санкт-Петербург
ООО «Газпром добыча Ямбург», г. Новый Уренгой
Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО РАН, г. Магадан
Научно-внедренческий центр «Геотехнология», г.Якутск
Игарская геокриологическая лаборатория Учреждения ИМЗ РАН им. П.И. Мельникова СО РАН, г.Игарка
Игарская геокриологическая лаборатория Института мерзлотоведения СО РАН, г.Игарка
Институт криосферы Земли СО РАН, Моск. обл., г. Лосино-Петровский
Институт математики и механики УрО РАН, г. Екатеринбург
Институт «Якутнипроалмаз» АК АЛРОСА, г. Мирный
Государственная публичная научно-техническая библиотека Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск
Забайкальский государственный университет, г.Чита
ОАО «Инжиниринговая нефтегазовая компания –Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству и эксплуатации трубопроводов, объектов ТЭК» ОАО ВНИИСТ, г. Москва
ЗАО «Морозовский химический завод», г. Санкт-Петербург
ЗАО «НИПИ НГХ», г.Тюмень, г. Северодонецк
ООО «АндИ», Тюменская область, Викуловский район, с. Викулово
ООО «Ньюфрост», Московская обл., г. Протвино
Омский государственный технический университет, г. Омск
ОРП г. Казань ЗАО «НИПИ НГХ»
ООО «Партнер Групп», г. Салехард
Пермский научно-исследовательский политехнический университет, г. Пермь
ЗАО «Полиметалл Инжиниринг», г. Санкт-Петербург
ГК «РУСГАЗИНЖИНИРИНГ» ЗАО «НИПИ НГХ», филиал г. Ставрополь
ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Якутск
ООО «Старый Дом», г. Тюмень
ОАО «ТомскНИПИнефть», г. Томск
ООО «ТюменНИИгипрогаз» ОАО «Газпром», г. Тюмень
ООО «Уфанефтепроект», г. Уфа
Читинский государственный университет ТрансИГЭМ, г. Чита
ОАО НПП «Эталон», г. Омск
Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск
ОАО Якутский проектный научно-исследовательский институт строительства, г. Якутск
«Ямалстрой», г.Новый Уренгой
Ямбургская лаборатория мерзлоты, Инженерно-технический центр, ООО «Газпром добыча Ямбург», п.Ямбург
ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень

Научно-производственное объединение «ФУНДАМЕНТСТРОЙАРКОС»

В октябре 2011 года исполнилось двадцать лет с того момента как научная лаборатория по изучению мерзлоты института Гипротюменнефтегаз стала самостоятельной научно-внедренческой фирмой, со временем выросшей в научно-производственное объединение «Фундаментстройаркос», специализирующееся на комплексном решении проблем строительства оснований на вечномерзлых грунтах.

Шел 1989-й год. Все началось с эксперимента Григория Меркуловича Долгих, бывшего в описываемую пору руководителем лаборатории института Гипротюменнефтегаз. Для укрепления оснований под нефтяным резервуаром большой емкости на Уренгойском газоконденсатном месторождении было предложено несколько устройств по замораживанию грунтов. Самыми эффективными оказались горизонтальные трубчатые системы (ГЕТ). В последующем в лаборатории были разработаны и другие системы термостабилизации. На международной конференции мерзлотоведов, прошедшей в Норильске в 1991 году, все они были признаны наиболее перспективными.

Научно-практический задел позволил коллективу лаборатории во главе с Г.М. Долгих и С.Н. Окуневым отправиться в «автономное» плавание по волнам рыночной стихии, когда стали разваливаться крупные научные центры и останавливаться мощные предприятия. Так появилась на Тюменской земле хорошо известное теперь по всей стране комплексное специализированное научно-производственное объединение «Фундаментстройаркос», на сегодняшний день – лидер в области термостабилизации и замораживания грунтов основания. В сферу его деятельности вошел весь спектр задач по этому направлению, включающих инженерные изыскания, научную разработку, проектирование, заводское производство систем термостабилизации, монтаж, технический и авторский надзор, мониторин.

Горизонтальные естественно действующие трубчатые системы замораживания грунтов основания ГЕТ впервые были применены на объектах Сандибинского и Уренгойского месторождений. Система представляет собой герметично выполненное теплопередающее устройство, не требующее затрат электроэнергии, автоматически действующее в зимнее время за счет силы тяжести и положительной разницы температур между грунтом и наружным воздухом.

Система ГЕТ состоит из двух основных элементов:

- охлаждающих труб – размещенной в основании сооружения испарительной части, служащей для циркуляции теплоносителя и замораживания грунта;

- конденсаторного блока, расположенного над поверхностью грунта, соединенного с испарительной частью и предназначенного для конденсации паров теплоносителя и перекачки его по системе за счет естественной конвекции и силы тяжести.

Хладагент системы – аммиак.

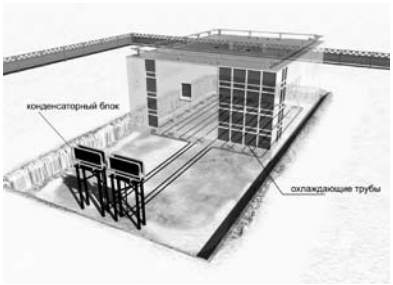


Фото 1 - Система ГЕТ включает размещенные под теплоизоляцией горизонтальные охлаждающие и соединительные трубы (подземная часть) и конденсаторный блок (наземная часть)

Фото 2 - Термостабилизация системами ГЕТ в основании производственного корпуса (116,2 х 66 м) на Ванкорском нефтяном месторождении



Первые годы эксплуатации системы показали, что бывают случаи, когда замораживание основания грунта под фундамент должно произойти быстрее на начальном этапе строительства и эксплуатации объекта, когда необходимо обеспечить сразу проектную несущую способность основания. Для решения этой задачи была разработана вертикальная естественно действующая трубчатая система ВЕТ с вертикальными ответвлениями вглубь (ТОВы), способными доставлять холод на глубину до 12 - 15 м.

Массовое внедрение систем ГЕТ и ВЕТ пришлось на обустройство Южно-Русского, Самбургского, Верхнечонского, Ванкорского, Бованенковского, Ыдинского и Южно-Хыльчуюского месторождений.

Другое инженерное решение - индивидуальные термостабилизаторы - предназначены для замораживания талых и охлаждения пластичномерзлых грунтов под зданиями с проветриваемым подпольем и без него, эстакадами трубопроводов и другими сооружениями с целью повышения их несущей способности и предупреждения выпучивания свай.

Эти устройства представляют собой индивидуальную однотрубную конструкцию с цельнометаллическим корпусом, заправленную хладагентом - углекислотой или аммиаком. Общая длина термостабилизатора - от 10 до 23 м. Высота наземной конденсаторной части с алюминиевым оре-

брением - до 3 м, испарительная часть термостабилизатора находится в грунте.

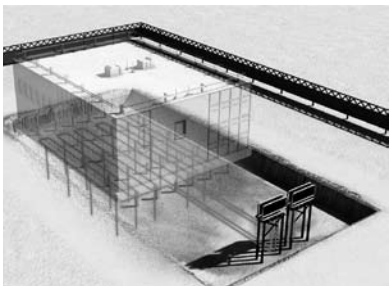


Фото 3 - Система ВЕТ включает вертикальные охлаждающие (ТОВы) и соединительные трубы (подземная часть) и конденсаторный блок (наземная часть)

Фото 4 - Термостабилизация системами ВЕТ в основании производственного корпуса на Бованенковском нефтегазоконденсатном месторождении



Данное техническое решение оказалось незаменимым при строительстве нефтепровода Ванкор - Пурпе протяженностью 548 км. Трасса нефтепровода пересекает несколько ландшафтных зон, на которых встречаются все виды грунтов, скованных вечной мерзлотой. Это подземные льды и бугры пучения – ледяные ядра, которые поднимают над собой целые холмы с почвой, дерном и кустарниками. Все это вызвало большие трудности при проектировании и строительстве объекта. В целом 238 км нефтепровода - в северной его части - проложили поверху, а 310 км в южной части пришлось увести под землю.

Для надземной части НПО «Фундаментстройаркос» спроектировало специальные конструкции опор с термостабилизаторами в сваях. Всего для северного участка их было установлено 38 тыс. шт., для подземной южной части - более 28 тыс. шт.

Решение этой крупной задачи потребовало довести объем производства термостабилизаторов до 6000 шт. в месяц. С чем НПО «Фундаментстройаркос» успешно справилось, одновременно запустив строительство двух линий по выпуску и заправке термостабилизаторов. Нефтепровод Ванкор - Пурпе - один из самых крупных объектов, построенных в России на вечномерзлых грунтах и второй в мире после Трансаляскинского нефтепровода на Аляске, где было установлено более 100 тыс. шт. термостабилизаторов «Лонга».

Однако следует отметить значительные ошибки, допущенные при изысканиях, которые не дали достоверной информации о температуре грунта и его составе, а также то, что строительно-монтажные работы велись не профессиональными в области термостабилизации строительными компаниями, что привело к браку в установке сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ).

Кроме объектов нефтяной и газовой промышленности разработки «Фундаментстройаркос» были опробованы при строительстве фабрики по переработке руд драгоценных металлов в Хаканджe (Магаданская область) и на плотинах Якутии - Иреляхской (на реке Лиендокит) и на хвостохранилище Нюрбинского ГОКа.

Специально для этих объектов было разработано несколько конструкций глубинных СОУ. Так, например, для плотины на реке Лиендокит было сконструировано коллекторное СОУ. Оно с помощью коллектора соединено с аппаратом воздушного охлаждения, в котором обдув оребренных труб производится при помощи вентиляторов.

Принудительный обдув воздухом оребренных труб позволяет в самые морозные безветренные периоды (которые характерны для Якутии) значительно увеличить теплообмен и получить температуру замораживающих труб практически равную температуре наружного воздуха. Такая система предназначена для интенсивного первоначального промораживания и дальнейшего экономичного поддержания полученной мерзлой зоны грунта.



Фото 7
Плотина на реке Лиендокит. Нюрбинский ГОК АК «Алроса»

Фото 8
Плотина на реке Лиендокит. Глубинное коллекторное СОУ



Использование разработок НПО «Фундаментстройаркос» при строительстве на стадии нулевого цикла позволяет заказчику сократить объемы капиталовложений до 60%.

Так, например, важнейшие объекты Ванкорского месторождения – резервуары под нефть и воду, склады ГСМ – первоначально предполагалось возводить на сваях. Пробурив мерзлоту, пришлось бы установить более 12 тыс. свай диаметром 530 мм и длиной до 16 м.

Вместо бескрайних свайных полей «Фундаментстройаркос» предложил установить 140 систем ГЕТ. В результате была проморожена площадь в 30 тыс. м^2, и резервуарный парк из девяти емко-

стей в 20 000 м^3, четырех емкостей в 30 000 м^3 и 19 резервуаров меньшего объема теперь построен на надежных фундаментах с системами ГЕТ и мощным промежуточным слоем теплоизоляции.

Использование систем ГЕТ на Ванкорском месторождении позволило снизить капитальные затраты на 900 млн руб. При этом сократить и сроки строительства. Вместо планируемых трех лет резервуарный парк Ванкора был смонтирован всего за полтора года – одним из первых среди объектов месторождения.



Фото 9 Резервуарный парк на Ванкорском месторождении



Фото 10 - Термостабилизация основания РВС системами ГЕТ (видна надземная часть системы - конденсаторные блоки)

Производственные мощности компании не имеют аналогов в России - как по объемам выпускаемой продукции, так и по технологии изготовления.

Надежность криогенных устройств, заполненных хладагентом, их способность служить не один десяток лет зависят, в первую очередь, от герметичности конструкции, то есть от качества сварочных швов, а их в одной системе больше 100 стыков диаметром от 33,7 мм до 150 мм.

Поэтому как в заводских, так и в полевых условиях используется технология автоматической сварки, разработанная в Институте им. Е.О. Патона, которую специалисты НПО «Фундаментстройаркос» модернизировали и усовершенствовали.

Использование подвижной и неподвижной части головок магнитных пластин обеспечили ориентированную сварку в магнитном поле, благодаря чему сформировалась устойчивая конфигурация шва, не требующая снятия грата, что исключило повреждение полиэтиленовой изоляции.



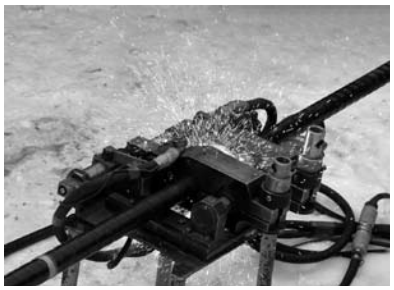


Фото 11, 12 - Полевая автоматическая сварка со 100%-м компьютерным контролем качества сварного шва (крупным планом показана сварочная головка МД-115)

Использование немецкого прибора «Спайдер» позволило вывести на экран компьютера значения всех четырех основных параметров режима сварки - силы тока, напряжения, давления при сварке и величины усиления шва, и тем самым обеспечить 100%-й контроль сварных соединений.

Введена в эксплуатацию полуавтоматическая линия для напыления цинкового покрытия на подземные элементы систем вместо антикоррозийного полиэтиленового. Цинковое покрытие сокращает температурные потери, обеспечивает надежность и долговечность систем, предназначенных для работы в условиях Арктики на всем протяжении срока службы зданий и сооружений.



Фото 13 - Полуавтоматическая линия по производству термостабилизаторов



Фото 14 - Линия оцинкования подземных элементов систем

Следующим направлением по увеличению эффективности работы термостабилизирующих систем является применение «чистых» хладагентов со степенью очистки от примесей (воды и неконденсирующих газов) 99,99%. Проведенные исследования работы термостабилизаторов показали, что наличие неконденсирующих газов в хладагентах при повышенной влажности воздуха может вызвать фрагментарное выпадение инея на наземной оребренной части термостабилизаторов. Оказалось, что даже 0,2% примесей в углекислоте существенно влияют на работу термостабилизаторов. Для выполнения доотчистки углекислоты в НПО «Фундаментстройаркос» изготовлена и запущена в работу установка четырехступенчатой очистки углекислоты, позволяющая получить степень очистки 99,99%. Процесс заправки термостабилизаторов также автоматизирован и произ-

водится с применением компьютерного контроля.

Специалисты НПО «Фундаментстройаркос» участвовали в сооружении более 300 объектов, среди которых газовые и нефтяные месторождения, золото- и алмазодобывающие предприятия, железные дороги, плотины, промышленные и гражданские здания на пространстве от Нарьян-Мара до Чукотки. В результате заказчики компании сэкономили миллионы рублей, значительно ускорили темпы работ и повысили уровень их качества.

Инновационные технические решения, предложенные НПО, становятся все более и более востребованными. Практика все чаще доказывает, что без союза с наукой, изучающей характер мерзлоты, без новых подходов к стабилизации грунтов оснований сооружений в условиях вечной мерзлоты не обойтись.

Предстоит выполнить большой объем работ по обустройству второй очереди Ванкорского и Бованенковского месторождений.

Необходимо осуществить пионерный выход на строительстве первоочередных объектов на Южно-Тамбейском месторождении, которое будут осваивать ООО «НОВАТЭК» и его ямальское подразделение по подготовке и переработке конденсата.

С компаниями ТНК и «РОСПАН» совместно с генеральным проектировщиком «ВНИИСТ-Нефтегазпроект» ведутся переговоры об участии НПО «Фундаментстройаркос» в проектировании, поставках и строительно-монтажных работах на обустройстве Сузунского месторождения и сооружении магистрального нефтепровода до НПС Пурпе.На стадии согласования у руководства Вилюйской ГЭС-3 находится предложение по температурной стабилизации тела плотины станции с использованием коллекторных СОУ.

Хочется надеяться, что представленные технические решения по термостабилизации грунтов найдут более широкое применение при строительстве автомобильных и железных дорог, линий электропередач и радиорелейных линияй связи, расположенных в зоне распространения вечной мерзлоты.

PLENARY PAPERS

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ЭТАПЫ , ПРОБЛЕМЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ ОСНОВАНИЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Г.М. Долгих[1], С.Н. Окунев[1], С.П. Вельчев[1]

[1]НПО «Фундаментстройаркос», г.Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

Рассмотрены основные этапы, проблемы и технические решения по строительству оснований на вечномерзлых грунтах. Показано, что при использовании вечномерзлых грунтов по 1 принципу и комплексном подходе к проектированию, изготовлению и монтажу систем температурной стабилизации грунтов основания обеспечивается качество, долговечность и надежность систем и основания в целом, при этом за счет эффективной работы систем обеспечивается снижение затрат на строительство нулевых циклов.

Освоение районов с вечномерзлыми грунтами на этапе их присоединения к Россійкому государству сводилось к строительству жилых и складских зданий с незначительными размерами в плане. При этом не учитывалось наличие вечномерзлых грунтов, поскольку поселения размещались на берегу рек, где залегали талые грунты или непросадочные при оттаивании вечномерзлые грунты(рис 1). При попадании зданий на просадочные при оттаивании грунты, эти сооружения деформировались и выходили из строя. Взамен их строились новые здания в другом месте(рис.2). По такому принципу начиналось обустройство городов Салехард, Туруханск, Олекминск , Якутск и др.



Рис.1
Первые поселения Обдорска (Салехарда)

Рис. 2
Деформации зданий при размещении на сильнольдистых грунтах



В качестве второго этапа освоения можно выделить период добычи золота и серебра в Забайкалье и Якутии и строительство Транссиба (рис.3,4). В этот период уже применялись методы оттаивания грунтов, а также промораживания рек. Производились инженерные изыскания и исследование грунтов. А с вводом в эксплуатацию железной дороги накапливался материал по проблемам устойчивости сооружений и разрабатывались мероприятия по их предотвращению.



Рис. 3
Добыча золота в Забайкалье

Рис.4 Транссибирская магистраль в Забайкалье



С началом промышленного освоения Северных регионов в середине 30-х годов потребовалось более детальное изучение свойств вечномерзлых грунтов и технических решений по строительству сооружений (рис.5). Этот период можно охарактеризовать как третий этап, который продлился до начала 60-х годов. На данном этапе основным техническим решением на твердомерзлых грунтах было проветриваемое подполье(рис.6), а на остальных типах грунтов применялся как правило второй принцип использования вечномерзлых грунтов с расчетом деформаций сооружений. При этом конструкция фундаментов и сооружения должны были обеспечить устойчивость и недопущение предельных неравномерных осадок. Однако практически все сооружения построенные в этот период деформировались и были выведены из строя вследствие воздействия на грунты оснований непредвиденных тепловыделений, что привело к ненормативному растеплению вечномерзлых грунтов и значительным деформациям.



Рис. 5
Здания в Воркуте
в 30-е годы.

Рис. 6
Здания
с проветриваемым
подпольем
в Норильске
в 60-е годы



Следующим(четвертым) этапом можно условно считать период опытно промышленного применения термостабилизаторов. После изобретения Гапеевым в 60-х годах однофазных термостабилизаторов, они стали применяться для замораживания и температурной стабилизации грунтов оснований зданий с проветриваемым подпольями и на других сооружений. Наиболее широко однофазные термостабилизаторы применялись при строительстве в г.г. Воркута, Лабытнанги, Норильск, Мирный и др. Однако их применение не нашло широкого распространения из-за низкой эффективности и надежности из-за утечек керосина через сварные швы (рис.7). Поэтому в начале 70-х годов в практику строительства начали внедряться более эффективные парожидкостные термостабилизаторы. Но и они не нашли широкого применения из-за того, что эти термостабилизаторы изготавливались и заправлялись в условиях строительной площадки, имели очень низкую надежность также из-за качества сварных соединений, поэтому через несколько лет через сварные швы происходила утечка хладагента, что приводило к выходу их из строя.



Рис. 7 Термостабилизаторы НПО «Фундаментстройаркос» установленные взамен однофазных термостабилизаторов в г. Мирный

Все перечисленные негативные факторы по применению однофазных и парожидкостных термостабилизаторов обусловили в основном дальнейшее применение 2-го принципа использования вечномерзлых грунтов при строительстве зданий и сооружений при строительстве г.г. Салехард, Надым, Н-Уренгой, Чита, Магадан, Нерюнгри, первой очереди строительства Медвежьего и Уренгойского месторождений, а также объектов БАМ ж.д. Кроме того, применение 2 принципа использования вечномерзлых грунтов обосновывалось меньшими, по сравнению с проветриваемыми подпольями, капитальными затратами. При этом не учитывались затраты на ежегодный ремонт зданий, которые с каждым годом с увеличением деформаций также многократно увеличивались (рис.8). К тому-же, многие здания через 10-15 приходилось полностью демонтировать. Таким образом, мнение о том, что применение 2 принципа использования вечномерзлых грунтов является экономически целесообразным постепенно изменялось.



Рис. 8 Восстановление мерзлого состояния грунта с применением термостабилизаторов на здании Пождепо построенного по 2 принципу на Уренгойском месторождении

В 80-х годах начинается следующий пятый этап связанный с инженерно-геокриологическими условиями УКПГ11...15 Уренгойского месторождений и Ямбургского и УКПГ 7 и 9 Медвежьего месторождений, которые потребовали применение 1 принципа использования вечномерзлых грунтов.

При обустройстве этих месторождений были применены как проветриваемые подполья, так и здания с полами по грунту с использованием вентиляционных каналов. Для опор трубопроводов применялись сваи с глубиной погружения в грунт 6...8 метров.

В настоящее время на этих объектах наблюдаются следующие негативные воздействия на грунты. В связи с малой высотой подполья (до 0,7 метра) и размещения в подполье или вокруг здания тепловых сетей , а также из-за непредвиденных тепловыделений и потепления климата происходит повышение температуры веч-

номерзлых грунтов оснований сооружений, что приводит к деформациям осадок или пучения свай. На опорах трубопроводов также происходят деформации вследствие растепления грунтов под воздействием природно-климатических и техногенных факторов. Вентиляционные каналы зданий с полами по грунту засорились механическими примесями и льдом.

В результате на зданиях с проветриваемыми подпольями и эстакадах в конце 90-х годов устанавливались термостабилизаторы для восстановления мерзлого состояния грунтов и исключения деформаций свай. На зданиях с проветриваемыми каналами производилась их замена на системы «ГЕТ-ВЕТ» или эти здания переводились в неотапливаемый режим (рис.9…12).



Рис.9 Деформация здания в г. Якутск в результате теплового техногенного воздействия на грунты

Рис. 10 Замораживание деформированного здания при помощи термостабилизаторов основания в г. Мирный





Рис. 11 Системы «ГЕТ» установленные взамен вентилируемых каналов на здании УТТ и СТ в п.Ямбург

Рис.12 Термостабилизаторы установленные на эстакадах УКПГ Уренгойского месторождения



Все вышеперечисленные проблемы при строительстве и эксплуатации зданий на вечномерзлых грунтах поставили проблему на следующем (шестом) этапе промышленного изготовления и монтажа систем замораживания грунтов. При этом системы замораживания и температурной стабилизации грунтов оснований должны были отвечать следующим требованиям:

- экономичности строительства основания;
- низкой металлоемкости;
- надежности;
- ремонтнопригодности;
- иметь полную или максимальную заводскую готовность;
- малые сроки монтажа;
- проектирование, изготовление и монтаж систем и термостабилизаторов
- все работы должна производить специализированная организация.

Эти вышеперечисленные факторы и привели к образованию в 1991году Научно-производственной фирмы «Аркос»(Арктические основания), которая была направлена на решение этих проблем.

Для выполнения замораживания грунтов были разработаны:

- парожидкостные термостабилизаторы ТК32/L с диаметром корпуса 33,7 мм, биметаллическим оребрением алюминий – сталь и усиленной гидроизоляцией в слое промерзания протаивания (рис.13);
- глубинные СОУ для замораживания плотин , стволов шахт, устьев скважин и других заглубленных сооружений с глубиной до 100 метров (рис.14…16).
- системы «ГЕТ» с длиной охлаждающих труб до 1000 метров для температурной стабилизации грунтов оснований зданий с полами по грунту, резервуаров, насыпей автомобильных и железных дорог (рис.17);
- системы «ВЕТ» с трубами охлаждающими вертикальными глубиной до 14 метров для замораживания грунтов под зданиями и сооружениями с применением систем «ГЕТ», а также зданий с технологическими подпольями и устьев кустов скважин (рис.18);

Если до 1994 года НПФ «АРКОС» , «ВНИИГАЗ» и ООО «ТАИС» занималась изготовлением и монтажом термостабилизаторов(рис.19), а НПФ «Аркос» и систем «ГЕТ-ВЕТ» на единичных объектах и оптимизацией их конструкции , то после 1994 года наступил период промышленного применения систем, которые первоначально внедрялись на объектах Уренгойского, Ямбургского месторождений и месторождения Медвежье , а далее в городах Салехард и Лабытнанги.

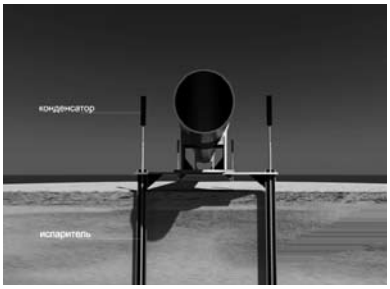


Рис. 13
Индивидуальные термостабилизаторы

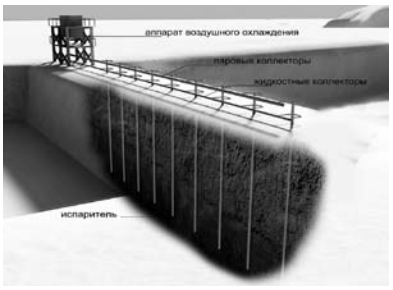
Рис.14
Групповые глубинные СОУ с глубиной замораживания до 50 метров





Рис. 15.
Однотрубные глубинные СОУ

Рис.16
Коллекторные глубинные СОУ



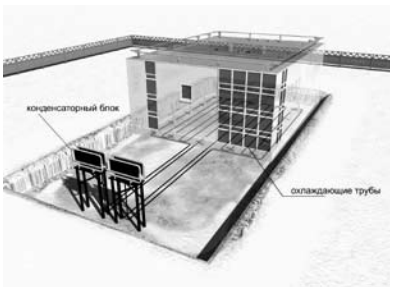


Рис.17
Система «ГЕТ»

Рис.18
Система «ВЕТ»

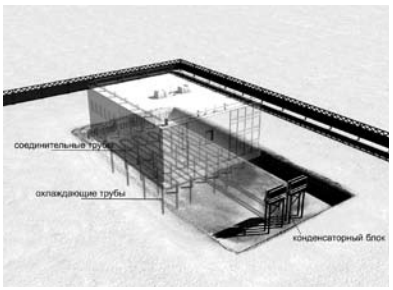




Рис. 19
Термостабилизаторы НПО «Фундаментстройаркос»(слева) и ИЧП «Олина»(справа) установленные на жилом доме в г. Лабытнанги в 1995 году.



Но первым объектом в 1996 году на котором сезонно-действующие охлаждающие устройства НПО «Фундаментстройаркос» и ФГУП «Фундаментпроект» нашли наиболее широкое применение было Заполярное месторождение(рис. 20). Именно там в сложных инженерно-геологических условиях был применен 1 принцип использования вечномерзлых грунтов, с системами замораживания и температурной стабилизации грунтов оснований, как наиболее надежно обеспечивающий несущую способность грунтов.

Конечно опыт внедрения систем замораживания на Заполярном месторождении показал, что их применение требует комплексного подхода к проектированию, строительству и эксплуатации всего месторождения. Так, недопустимо размещение подземных теплых нетеплоизолированных трубопроводов в зоне заложения систем, изменения температуры эксплуатации объектов, утечек воды из инженерных сетей, обводнения прилегающей территории, снегозаносов и повреждения надземных частей систем. Особые требования необходимы при выполнении земляных работ, уплотнению насыпи и исключению её обводнения. Но одним из главных требований является качество сварных соединений и антикоррозионного покрытия при изготовлении термостабилизаторов и систем. Все сварные стыки должны проходить контроль качества и иметь надежное антикоррозионное покрытие.

В процессе монтажа систем, возведения насыпи и укладки теплоизоляции должен производиться пооперационный контроль качества выполнения СМР, а после запуска систем в работу осуществляться мониторинг за работой систем и температурном режимом грунтов оснований. Такая политика качества выполнения работ по изготовлению и монтажу охлаждаемых оснований проводится в ООО НПО «Фундаментстройаркос». Именно комплексный подход к применению систем

на Ванкорском и Бованенковском месторождения позволил в сжатые сроки и высоким качеством выполнить работы по обустройству месторождений(рис.21).



Рис. 20 Системы температурной стабилизации грунтов установленные на объектах Заполярного месторождения

Однако на сегодняшний день существуют следующие проблемы которые необходимо решить:

- на этапе обоснования инвестиций практически нигде не проводятся исследования мерзлотных свойств грунтов и не составляется инженерно-геокриологическая карта, поэтому на последующих этапах проектирования ситуационный план обустройства и генплан разрабатывается без учета свойств и глубины залегания вечномерзлых грунтов;

- изыскания выполняются не в полном объеме, или при изменении генплана не производятся доизыскания на новых площадках;

- проектные организации, выигравшие тендеры, зачастую не имеют никакого опыта проектирования на вечномерзлых грунтах, при этом не производится технико-экономическое обоснования технических решений по строительству оснований и фундаментов, не составляются прогнозы температурного состояния грунтов с учетом влияния природно-климатических и техногенных факторов;



Рис. 21 Резервуары и здания построенные с применением систем температурной стабилизации грунтов оснований на Ванкорском месторождении

- строительно-монтажные организации также очень часто не имеют опыта строительства на вечномерзлых грунтах и не обладают соответствующей техникой и технологиями для выполнения работ;

- строительство объектов ведется без учета теплового воздействия на грунты основания в процессе строительства, а также не выполняется геотехнический мониторинг состояния грунтов в процессе строительства;

- не выполняется геотехнический мониторинг состояния грунтов в процессе эксплуатации сооружений особенно в городах и поселках;

- в настоящее время без применения мероприятий обеспечивающих температурную стабилизацию вечномерзлых грунтов ведется проектирование, строительство и эксплуатация следующих объектов:

1. Насыпи авто-и железных дорог и опоры контактной сети ж/д дорог.
2. Опоры мостов и балочных переходов.
3. Устья добывающих скважин.
4.Полигоны ТБО и шламовые амбары
5. Подземные ёмкости

При применении систем замораживания и температурной стабилизации грунтов оснований особой проблемой для Заказчика является их стоимость. Действующая в настоящее время система тендорных торгов совершенно не учитывает качество изделия и срок их эксплуатации, а направлена только на стоимость изделий. Однако нельзя разъединять эти параметры. Качество изделия напрямую влияет на их стоимость и срок эксплуатации. Кроме того, при обустройстве месторождения надо в комплексе учитывать капитальные и эксплуатационные затраты. Так, увеличивая несущую способность грунтов целесообразно уменьшать длину свай и их количество. Увеличение размеров сооружения в плане приводит к снижению затрат на возведения насыпи, инженерные сети, расходы на эксплуатацию здания. Как показали расчеты института «ВНИПИгаздобыча» (рис. 22) доля затрат на систему замораживания грунтов составляет 1…2% от стоимости всего объекта,

а затраты на мониторинг не более 0,05%. Поэтому все рассуждения о больших затратах на применение систем замораживания и температурной стабилизации грунтов и мониторинге за работой систем и геотехническом мониторинге являются необоснованными.

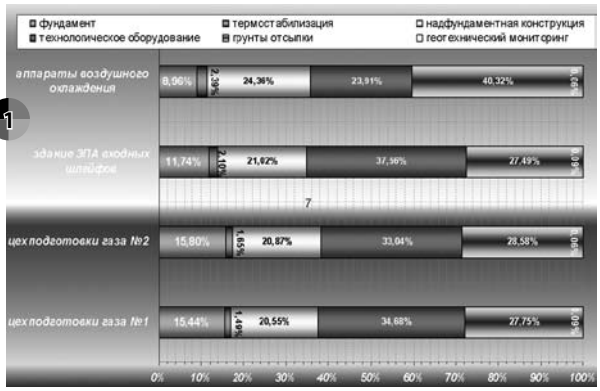


Рис.22 Распределение капитальных затрат при строительстве зданий и сооружений на Бованенковском месторождении (данные института ВНИПИгаздобыча)

Следующим этапом развития инженерного мерзлотоведения следует считать разработку новых конструкций охлаждаемых оснований с применением усовершенствованных систем температурной стабилизации грунтов, новых конструкций свай, фундаментов мелкого заложения, теплоизоляционных материалов и технологий строительства. Особенно важным следует считать предпостроечное промораживание грунтов и загружение фундаментов в середине второго года эксплуатации систем, когда несущая способность грунтов может быть увеличена более чем в два раза, по сравнению с естественными условиями. Особое внимание необходимо обратить на сильнозасоленные , сильнольдистые и низкотемпературные вечномерзлые грунты залегающие в арктической зоне. Их физико-механические свойства являются малоизученными, поэтому даже незначительное повышение их температуры приводит к потере их несущей способности. В таких грунтовых условиях возможно потребуется применение инвентарных холодильных машин которые производят при необходимости замораживание или температурную стабилизации грунтов в летнее время в период строительства, а при эксплуатации находятся в резерве и могут подключаться для компенсации непредвиденных тепловыделений от природно-климатических и техногенных воздействий.

ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ В УСЛОВИЯХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

С.Я.Кушнир

Тюменский государственный нефтегазовый университет. e-mail: 72mg@mail.ru

Тема доклада тесно связана с геотехническими проблемами, с которыми сталкиваются проектировщики и производственники при строительстве и эксплуатации нефтегазопроводов.

Прежде чем перейти непосредственно к мерзлым грунтам, я хочу обозначить эти геотехнические проблемы, которые определяют особенности проектирования, строительства и эксплуатации нефтегазопроводов в условиях мерзлых грунтов. При этом следует отметить, что даже без привязки к мерзлым грунтам геотехнические проблемы трубопроводного транспорта изучены недостаточно. Причин недостаточной изученности две:

Систему нефтегазопроводов ошибочно считали системой технической, **а она – геотехническая**

Это значит, что безопасная и надежная эксплуатация трубопроводов, независимо от способа прокладки, определяется не только материалом и толщиной труб, качеством их изготовления и изоляции, а и инженерно-геологическими условиями трассы, состоянием и свойствами грунтов

Сложность проблемы взаимодействия нефтегазопроводов с грунтом, заключающаяся:

а) в постоянно меняющийся по длине трассы литологический состав и свойства грунтов;

б) изменения состояния и свойств грунтов, гидрогеологического режима носят вероятностный характер;

в) грунты, с одной стороны, служат основаниями, а с другой - средой функционирования нефтегазопроводов.

Хочу подчеркнуть, что техническое состояние трубопровода и его остаточный ресурс определяются уровнем напряжений в его стенке:

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\left(\frac{PD_{вн}}{2\delta}\right)^2 + \left(\alpha E\Delta t - \mu\frac{PD_{вн}}{2\delta} + \frac{ED_н}{\rho}\right)^2 + \frac{PD_{вн}}{2\delta}\left(\alpha E\Delta t - \mu\frac{PD_{вн}}{2\delta} + \frac{ED_н}{\rho}\right)}$$

где: P - внутреннее давление;

Dвн - внутренний диаметр трубопровода;

δ - толщина стенки трубы;

E - модуль упругости;

α - коэффициент линейного расширения стали;

Δt - температурный перепад;

μ - коэффициент Пуассона;

Dн - наружный диаметр трубы;

ρ - радиус изгиба.

Здесь грунтовый фактор учтен радиусом изгиба ρ. На рисунке 1 приведен график максимальных продольных (а) и эквивалентных (б) напряжений в зависимости от радиуса изгиба участка трубопровода.

Однако эти зависимости не позволяют оценить степень влияния грунтового фактора на уровень напряжений в стенке трубопровода. Для этой цели была разработана расчетная схема сило-

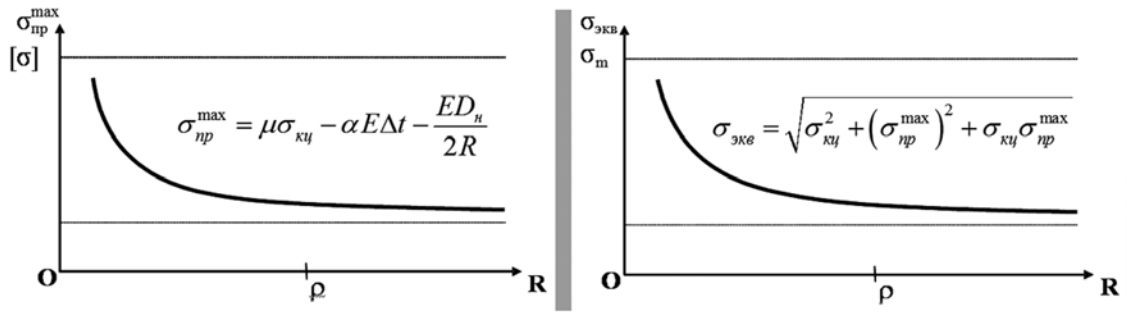
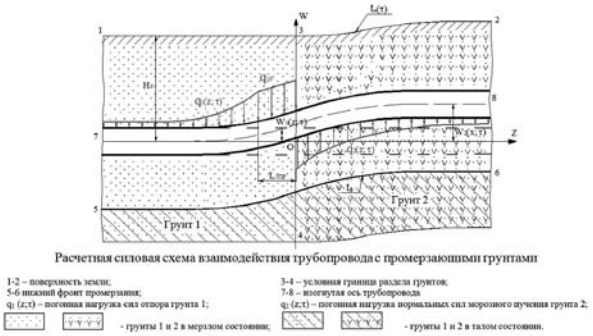


Рисунок 1 - Графики изменения максимальных продольных (а) и эквивалентных (б) напряжений в зависимости от радиуса изгиба участка трубопровода

вого взаимодействия трубопровода с промерзающим грунтом (рисунок 2) и получена зависимость продольных напряжений в стенке подземного трубопровода в условиях пучения и осадки мерзлого грунта (рисунок 3).

Полученные графики зависимости (рисунки 4 и 5) позволяют уже на стадии проектирования прогнозировать потенциально опасные участки вдоль трассу по уровню напряжений в стенке тру-



Расчетная силовая схема взаимодействия трубопровода с промерзающими грунтами

1-2 – поверхность земли;
5-6 нижний фронт промерзания;
$q_1(z,t)$ – погонная нагрузка сил отпора грунта 1;
3-4 – условная граница раздела грунтов;
7-8 – изогнутая ось трубопровода
$q_2(z,t)$ – погонная нагрузка нормальных сил морозного пучения грунта 2;
- грунты 1 и 2 в мерзлом состоянии;
- грунты 1 и 2 в талом состоянии.

Рис.2 Степень влияния грунтового фактора

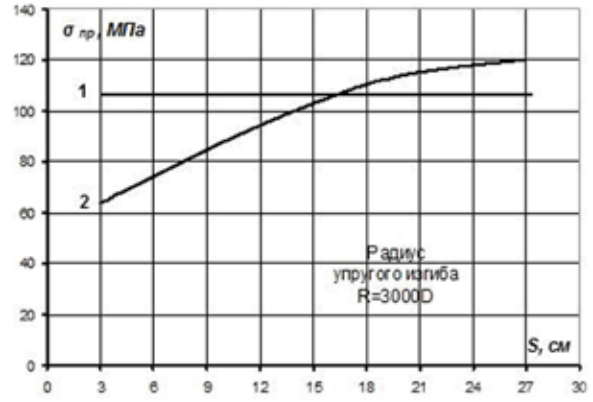


Рис. 3 Зависимость продольных напряжений в стенке подземного трубопровода в условиях пучения и осадки слоя грунта

бы.

На рисунке 8 представлена диаграмма причин отказов и аварий на магистральных трубопроводах ОАО «Газпром», из которых следует, что основная причина – наружная коррозия. Не останавливаясь на критериях оценки коррозионного разрушения стенки трубы, отметим, что пространственные перемещения трубопровода, т.е. его отклонения от проектного положения, принципиально меняют условия коррозии, так как вдоль трассы газопровода появляются зоны сжатия и растяжения, определяющие уровень напряжения в стенке. Достаточно сказать, что интенсивность коррозионного износа труб под воздействием вибрационных нагрузок в 2,67 раза больше, чем при ненагруженном состоянии.

Значительный объем исследований выполнен по определению влияния вибрационных нагрузок на устойчивость магистральных газопроводов. Цель исследования - определить в натурных условиях реально действующие параметры вибронагружения магистральных газопроводов

Установленные реально действующие на газопровод вибрационные нагрузки позволили выполнить комплекс лабораторных исследований. При этом были решены следующие задачи:

- установлена зависимость касательного сопротивления грунта продольным перемеще-

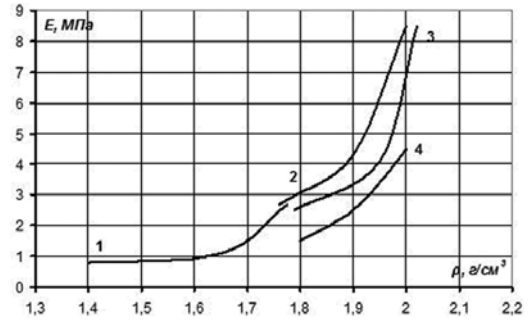


Рис.4 Зависимость модуля деформации грунта от плотности:
1 – глина ПС, Имертинская, Адлер; 2 – суглинок, ППДС Каркатеевы-2, РВС-22; 3 – суглинок, Второй пусковой РП; 4 – суглинок, ВСТО НПС-9

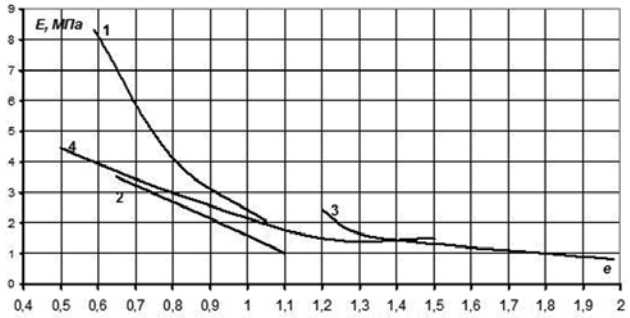


Рис.5 Зависимость модуля деформации от коэффициента пористости грунта:
1 – глина ПС, Имертинская, Адлер; 2 – суглинок, ППДС Каркатеевы-2, РВС-22; 3 – суглинок, Второй пусковой РП; 4 – суглинок, ВСТО НПС-9

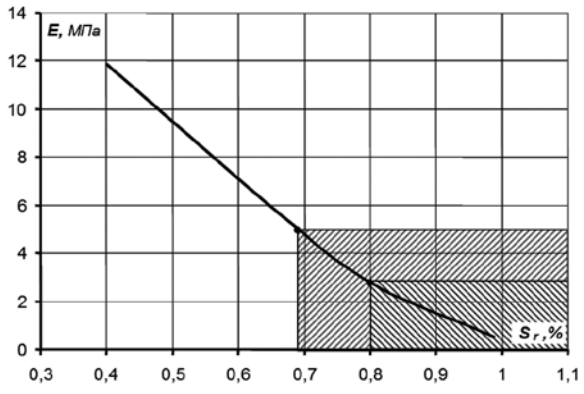


Рис. 6 Зависимость модуля деформации грунта от степени его водонасыщения

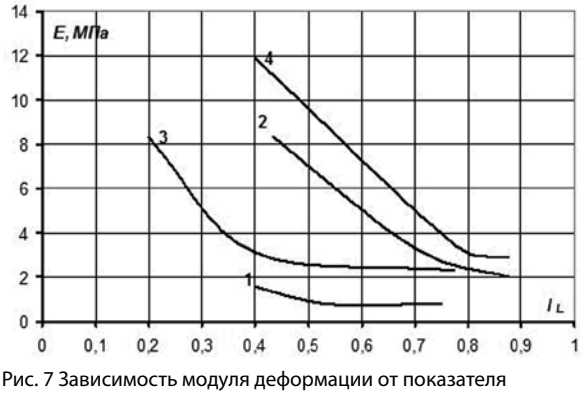


Рис. 7 Зависимость модуля деформации от показателя пластичности:
1 – глина ПС, Имертинская, Адлер; 2 – суглинок, ППДС Каркатеевы-2, РВС-22; 3 – суглинок, Второй пусковой РП; 4 – суглинок, ВСТО НПС-9

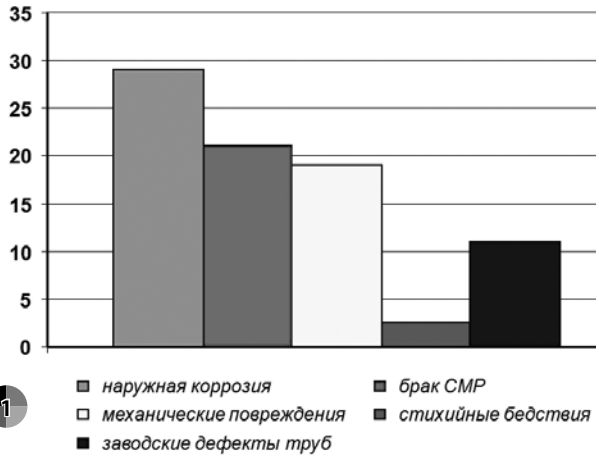


Рис. 8 Причины отказов на магистральных трубопроводах ОАО «Газпром»



Рисунок 9 - оголение участков газопровода



Рис. 10 Заполярное месторождение

ниям трубы от параметров вибрационных воздействий;

- при сколько угодно малых параметрах вибрации касательное сопротивление грунта продольному перемещению снижается.

- установлено уменьшение упругой зоны касательного сопротивления грунта при наличии вибрационного воздействия. Уменьшение силы трения, действующей по боковой поверхности погруженного элемента, связано как с амплитудой, так с частотой колебаний f. Сравнение комбинаций A•ω2 (виброускорение) и A•ω (виброскорость) показало, что решающую роль в изменении касательного сопротивления грунта играет виброускорение. Это позволило выбрать его в качестве параметра, оказывающего влияние на изменение сил касательного сопротивления грунта при вибронагружении.

Таким образом, результаты исследований позволили оценить по известным силам касательного сопротивления грунта продольное перемещение трубы. При оценке полученных результатов для выбранного магистрального газопровода производился расчет предельного сопротивления грунта сдвигу, являющегося важнейшим параметром для оценки пластического режима касательного сопротивления грунта. Количественная оценка данных расчетов свидетельствует о прямом соответствии экспериментальных условий натурным.

Выполненные исследования позволили перейти к оценке пространственной устойчивости подземных магистральных газопроводов и особенностям процесса аркообразования. Изучен механизм аркообразования действующего подземного магистрального газопровода, в том числе с учетом переменной влажности прилегающих к арке участков. Определены продольные перемещения подземного газопровода в область аркообразования (рисунок 9).

1. Разработаны модели теплового и силового взаимодействия подземных магистральных газопроводов с окружающим грунтом.

2. Выявлены закономерности формирования и развития арок различной конфигурации.

3. Изучена динамика продольных перемещений в область аркообразования на длине краевого эффекта.

4. С учетом вибронагружения выявлено количественное и качественное влияние объемной влажности на особенности формирования НДС в стенке подземного газопровода.

5. На основе найденных уровней упругой линии рассчитано напряженное состояние арок выбранных конфигураций.

Впервые с позиций механики грунтов оценена устойчивость призм обвалования подземных магистральных газопроводов и теоретически обосновано устройство устой-

чивых призм обвалования.

Определяющий фактор – высота откоса

Основные факторы – инженерно-геологический и климатический. Именно они определяют расчетные схемы, методы расчета и назначение расчетных показателей прочностных свойств грунтов

Причины потери устойчивости:

- Потеря опоры основания;
- Увеличение внешней нагрузки на откос;
- Угол откоса превышает предельный;
- Изменение плотности грунта в откосе;
- Увеличение (изменение) гидродинамического давления воды в теле откоса (призмы обвало-





Рис. 11 Образование русла вблизи траншеи





Рис. 12 Вымывание грунта из траншеи



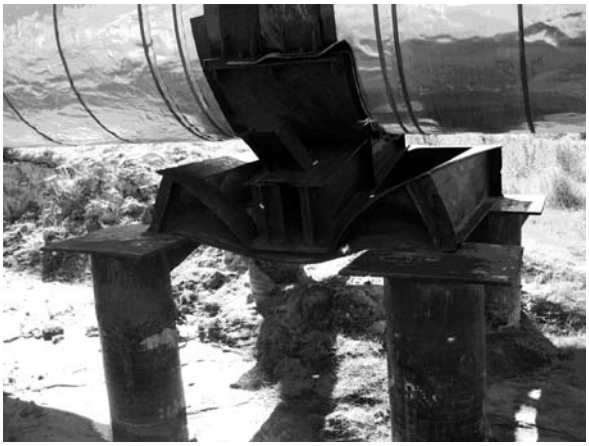


Рис. 13 Морозное пучение свай под опоры магистрального газопровода «Заполярное-Уренгой»

вания);

- Снижение (изменение) прочностных характеристик грунта при повышении УГВ;
- Динамическое воздействие на призму откоса

Анализ позволяет сделать очень важный вывод:

Существующий порядок проектирования и устройства обвалования не позволяет регулировать прочностные характеристики грунта, из которого выполняется обвалование и не учитывает вероятностное изменение условий работы грунта в теле обвалования в период их существования

Следует отметить, что каждая из далеко не полностью перечисленных геотехнических проблем значительно усугубляется в условиях мерзлых грунтов и отрицательных температур. Не останавливаясь на методиках исследований и даже на результатах, цель доклада – обозначит эти проблемы, и подчеркнуть их сложность. Поскольку исследования выполнялись, в основном в нашем, Тюменском нефтегазовом регионе, следует кратко остановиться на инженерно-геологических и криологических условиях территории (рисунок 10) и состоянии подземных газопроводов (рисунок 11).

Инженерно-геологические и криологические условия территории:

• Грунты слоя сезонного оттаивания и промерзания представлены: торф бурый, талый, слаборазложившийся; супесь серая пластичная, суглинок серый, мягкопластичный

• Грунты вечномерзлого слоя представлены:
торф бурый, мерзлый, слаборазложившийся; супесь серая, мерзлая,
криотекстура массивная; суглинок серый, мерзлый, криотекстура слоистая; супесь серая, мерзлая, криотекстура серая; суглинок серый, криотекстура тонкосетчатая

• Глубина кровли вечномерзлых грунтов – от 0,5 до 1,2 м

• Среднегодовая температура грунтов на подошве слоя годовых теплооборотов
(8-15 м) – -1,5 – -3 ºС

• Льдистость поверхностных отложений в интервале слоя годовых теплооборотов
от 20-60% до 100-200%

• Макс. объемная льдистость (торфяные, озерно-болотные отложения) – 85-90%

Чтобы сопоставит отказы геотехнических систем наших и зарубежных, по материалам Первого международного рабочего совещания по проблемам инженерной геотехники приведены данные этого совещания.

Основные параметры Транс–Аляскинского нефтепровода (США). Время строительства – 1974 – 1977 гг.

1. Геокриология – 27% трассы в зоне сплошного распространения ММГ; 73% - зона превышающей (островной) мерзлоты;
2. Гидрогеология – 34 крупных реки (800 водоемов); 13 винтовых переходов;
3. Производительность – 165 (320) тыс. тонн в сутки;
4. Способ прокладки – надземный (78 000 опор);
5. Протяженность – 1288 км - 10,2 тыс. км;
6. Диаметр – 1220 мм – 1400 мм;
7. Насосные станции – 10 (5) шт. – 83;
8. Температура нефти > 0°С, кольцевая теплоизоляция;
9. Способ прокладки – надземный, подземный – 10;
10. Способ погружения свай диаметром 325 мм – буроопускной;
11. Термостабилизация грунтов основания (парожидкостные и трубчатые охлаждающие системы термостабилизаторов).

Отказы геотехнических систем:

1. 30% опор подвержены деформации.
2. Многолетнее и сезонное морозное пучение (осадка) опор фундамента.
3. Склоновые пригрузы, оползни.

Проект газопровода «Аляска»

1. Проектная производительность – до 58 млрд. м3/ год
2. Пропускная способность – до 158,6 млрд. м3/ год
3. Компрессорных станций – 24-28 шт.- 50 шт.
4. Протяженность магистральных газопроводов
   от Аляски до Альберты – 3444 км
   от Альберты до США – 2400 км
5. Диаметр трубопровода – 1320 мм
6. Толщина стенки – 28,6 мм
7. Максимальное рабочее давление – 17,6 МПа
8. Температура транспортируемого газа < 0°С.

Основные параметры нефтепровода «Норманн Уэлас - Зима» (Канада)

1. Время строительства – 80 гг. XX века
2. Протяженность нефтепровода – 869 км
3. Диаметр трубопровода – 324 мм

4. Температура транспортируемого продукта – 1,5°С
5. Способ прокладки – подземная без теплоизоляции

Отказы геотехнических систем:

1. Морозное выпучивание трубы
2. Образование пустот и «тоннелей» под трубой
3. Осадки поверхности – от 0,2 до 3,0 м

Анализ состояния нефтегазопроводов свидетельствует, что все мы, специалисты в области механики мерзлых грунтов, многое не знаем. Чему можно поучиться у зарубежных коллег, это мо-

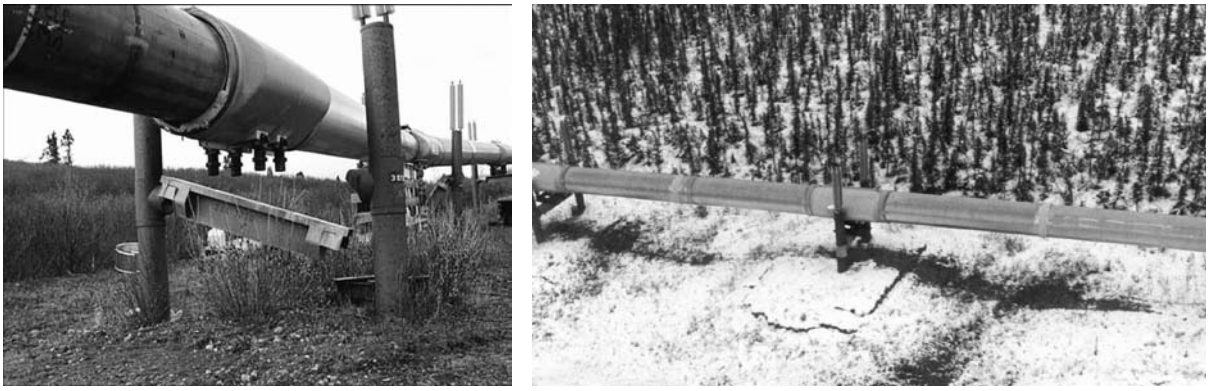


Рисунок 14 - Многолетнее и сезонное пучение (осадка) опор фундамента

ниторингу поведения нефтегазопроводов в условиях мерзлых грунтов. Сам механизм теплового и силового взаимодействия нефтегазопроводов с мерзлыми грунтами и реологические свойства последних, изучены недостаточно. И если с влиянием температуры, благодаря таким фирмам как «Фундаментстройаркос» мы как-то научились бороться, то явление релаксации мерзлых грунтов практически не изучено. Понятно, что такие исследования возможны лишь в натурных условиях и являются длительными по времени и дорогостоящими, однако без них не обойтись.

Part 1
Temperature stabilization of permafrost bases of buildings and structures under construction on the principle I

Часть 1
Температурная стабилизация вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений при строительстве по I принципу

ГЛУБИННЫЕ КОЛЛЕКТОРНЫЕ СОУ – НОВЫЙ ШАГ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ УНИКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ВИЛЮЙСКОЙ ГЭС-3

Г.М. Долгих, С.Н. Окунев, Е.А. Мельникова,
К.Н. Канова, Е.А. Посконина

[1]ООО НПО «Фундаментстройаркос», г.Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

В сложных малоизученных инженерно-геологических и фильтрационных условиях Вилюйской ГЭС-3 применение глубокой цементационной стены в грунте не предотвратит развитие обходного фильтрационного потока в области отрицательных температур, поэтому проектом ООО НПО "Фундаментстройаркос" было предложено и обосновано устройство уникальной мерзлотной завесы из глубинных коллекторных труб охлаждающих вертикальных с подключением холодильной машины в летний период.

На левобережной каменно-земляной плотине ЛКЗП Вилюйской ГЭС-3 (Светлинской ГЭС) с целью уменьшения фильтрации в основании намечается создание глубокой стены в грунте. В соответствии с заданием заказчика для предотвращения обходной фильтрации на сопряжении ЛКЗП с левым бортом, возможной после создания стены в грунте, предусматривается устройство мерзлотной завесы на припортальном участке и в цементационных штольнях.

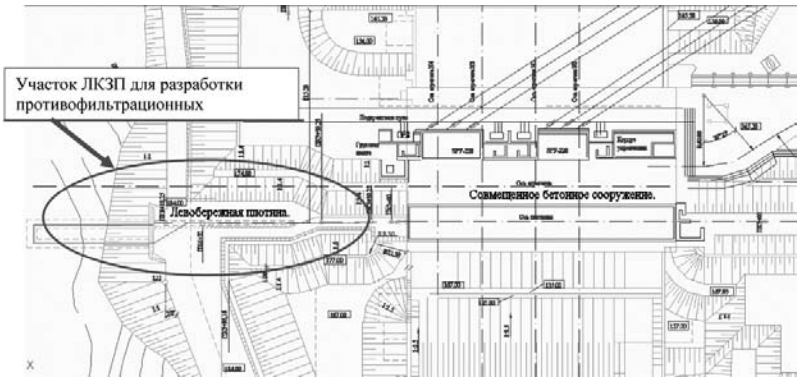


Рисунок 1 – Фрагмент генерального плана ЛКЗП Вилюйской ГЭС-3.

При эксплуатации плотины в породах левого борта наблюдается развитие вертикальных трещин раскрытия вследствие физико-химических процессов взаимодействия воды с коренными породами плотины. Проходка скальных пород левого борта горизонтальными цементационными штольнями перпендикулярно направлению развития трещин не предотвращает разрушение коренных пород.

Штольни имеют ширину 3,70 м, расстояние между осями штолен равно 10,00 м. Цементационные штольни представлены на рисунке 2.

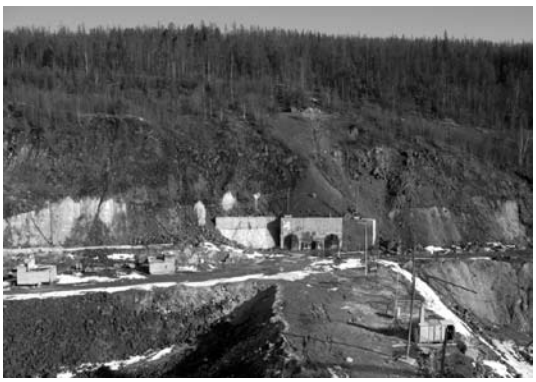


Рисунок 2 – Верховая (справа) и нижняя (слева) цементационные штольни.

Мерзлотные и фильтрационные условия левого и правого борта ВГЭС-3 сложные. В теле плотины отсутствуют водоупорные слои.

Коренные грунты плотины представлены алевролитами и мергелями с прослоями доломитов, известняков, песчаников и аргиллитов. По структуре породы слоистые, сильнотрещиноватые, перемяты и раздавлены до щебня и суглинка с отдельными блоками сохранных пород, по составу засолены (0,5 – 7%), загипсованы (1 – 2%).

Величина удельного водопоглощения слоёв по материалам инженерно-геологических изысканий 2004 года меняется в диапазоне от 0,01 л/мин по скважине 3980 (верховая цементационная штольня) до 0,45 л/мин по скважине 3982 (припортальный участок).

Устойчивый уровень грунтовых вод наблюдается в скважинах верховой и низовой штолен на абсолютных отметках 150,70 м – 171,60 м.

Приведённые выше значения водопоглощения пород свидетельствуют о хорошей водопроницаемости и существенной величине возможного коэффициента фильтрации (по прогнозу более 1 м/сут).

Инженерно-геологические условия для расчёта верховой цементационной штольни характеризует скважина 3980. Термометрические условия приняты по скважине Т-21.

Физические свойства инженерно-геологических элементов 12а и 12б, выделенных по разрезу

скважины 3980 приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Физические свойства инженерно-геологических элементов 12а и 12б

Наименование ИГЭ	Слой 12а		Слой 12б
	Для слабых сильновыветрелых пород (60%)	Для крепких пород (40%)	
Влажность грунтов, д.е.	0,17	0,10	0,15
Плотность грунта, г/см^3	2,18	2,36	2,20
Плотность сухого грунта, г/см^3	1,86	2,15	1,91
Плотность частиц грунта, г/см^3	2,81	2,80	2,82
Коэффициент пористости	0,51	0,32	0,48
Степень водонасыщения	0,90	0,90	0,90
Содержание водорастворимых солей, %	0,17	0,17	2,20
Коэффициент фильтрации, м/сут	0,20	0,20	0,05
Температура начала замерзания Tbf, ^{0}C	-1,10	-1,10	<-3,2

В слое 12б содержатся подземные воды с высокой минерализацией, имеющие отрицательную температуру (криопеги). В левом борту плотины криопеги с температурой до минус 2,50 0С, а в основании правой плотины - до минус 4,00 0С. Следовательно фильтрация в основании развивается в области отрицательных температур.

За прошедшие годы (2004 – 2010 гг.) в цементационных штольнях произошло частичное восстановление отрицательных температур после выполненной ранее электроотайки.

В верховой штольне положительные температуры от 0,00 до + 0,10 0С сохранились на абсолютной отметке 144,00 м по термоскважине Т-21.

На 15 сентября 2010 года термометрические замеры по скважине Т-21 сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Термометрические замеры по скважине Т-21

Термометрические замеры по слою ИГЭ 12а										
Температура начала замерзания Tbf=-1,10 ^{0}C										
Глубина, м	**3,00**	**4,00**	**5,00**	**6,00**	**7,00**	**8,00**	**9,00**	**10,00**	**11,00**	**12,00**
Температура грунта, ^{0}C	-1,60	-1,60	-1,60	-1,40	-1,00	-0,80	-0,60	-0,30	-0,20	-0,10
Глубина, м	**13,00**	**14,00**	**15,00**	**16,00**	**17,00**	**18,00**	**19,00**	**20,00**	**21,00**	**22,00**
Температура грунта, ^{0}C	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	-0,10	0,10
Глубина, м	**23,00**	**24,00**	**25,00**	**26,00**	**27,00**	**28,00**	**29,00**	**30,00**	**31,00**	**32,00**
Температура грунта, ^{0}C	0,00	0,10	0,00	0,00	-0,10	0,10	-0,20	-0,10	0,10	-0,10
Термометрические замеры по слою ИГЭ 12б										
Температура начала замерзания Tbf=-3,50 ^{0}C										
Глубина, м	**33,00**	**34,00**	**35,00**	**36,00**	**37,00**	**38,00**	**39,00**	**40,00**	**41,00**	**42,00**
Температура грунта, ^{0}C	0,00	-0,20	0,00	-0,10	-0,10	-0,10	-0,20	-0,30	-0,30	-0,40
Глубина, м	**43,00**	**44,00**	**45,00**	**46,00**	**47,00**	**48,00**	**49,00**	**50,00**	**51,00**	**52,00**
Температура грунта, ^{0}C	-0,30	-0,40	-0,50	-0,50	-0,60	-0,60	-0,60	-0,90	-0,80	-0,80
Глубина, м	**53,00**	**54,00**	**55,00**	**56,00**	**57,00**	**58,00**	**59,00**	**60,00**	**63,00**	**66,00**
Температура грунта, ^{0}C	-0,90	-1,00	-0,90	-1,10	-1,00	-1,10	-1,10	-1,10	-1,30	-1,30

Температуры грунта по результатам термометрических замеров отрицательны, но выше температур начала замерзания, что свидетельствует о том, что грунты слоя 12а и 12б находятся охлаждённом состоянии, свойства которого приравнены свойствам талого.

Ионный состав грунтовых вод характеризуется наличием анионов сульфата, карбоната, гидрокарбоната, хлора и катионов натрия, калия, кальция, магния.

В ходе ремонтных работ по предотвращению развития фильтрации в основании плотины в скважины цементационных штолен была выполнена закачка цемента, состав закачиваемого цементного камня неизвестен.

При непрерывной фильтрации воды через бетон наблюдается развитие физической коррозии при вымывании гидроксида кальция Ca(OH)2 из состава цементного камня. Гидроксид кальция характеризуется умеренной растворимостью в воде и значительным объемным содержанием в составе камня (10-20%), его растворение приводит к заметному снижению прочности камня.

Кроме процессов физической коррозии цементного камня, закаченного в скважины штолен, будут проявляться процессы химической коррозии вследствие содержания в воде ионов сульфата, хлора, магния, а именно:

- магнезиальная коррозия – гидросиликатный состав цемента частично замещается рыхлыми несвязанными между собой кристаллами гидроксида магния $Mg(OH)_2$ и прочность камня резко падает;

- сульфатная коррозия – продуктом реакции является кристаллический гидросульфоалюминат кальция (эттрингит), например:

При непрерывной фильтрации воды через бетон наблюдается развитие физической коррозии при вымывании гидроксида кальция $Ca(OH)_2$ из состава цементного камня. Гидроксид кальция

характеризуется умеренной растворимостью в воде и значительным объемным содержанием в составе камня (10-20%), его растворение приводит к заметному снижению прочности камня.

Кроме процессов физической коррозии цементного камня, закаченного в скважины штолен, будут проявляться процессы химической коррозии вследствие содержания в воде ионов сульфата, хлора, магния, а именно:

- магнезиальная коррозия – гидросиликатный состав цемента частично замещается рыхлыми несвязанными между собой кристаллами гидроксида магния $Mg(OH)_2$ и прочность камня резко падает;

- сульфатная коррозия – продуктом реакции является кристаллический гидросульфоалюминат кальция (эттрингит), например:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 5H_2O + 3CaSO_4 + 26H_2O = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$$

Суммарный объём кристаллов эттрингита в 2 - 2,5 раза больше объема кристаллов цементного камня, что вызывает увеличение объема пор и растрескивание цементного камня.

По результатам обследования состояния цементационной завесы на 2009 год следов цементации в скважинах или обнаружено не было или были обнаружены незначительные прожилки цементного камня. Что свидетельствует о разрушительном воздействии процессов физико-химической коррозии.

Следовательно сооружение стены в грунте из цемента не предотвратит разрушительное воздействие возможной обходной фильтрации и на всю глубину стены рекомендуется устройство мерзлотной завесы.

Мерзлотная завеса в соответствии с проектом ООО НПО “Фундаментстройаркос” представлена двумя рядами глубинных коллекторных труб охлаждающих вертикальных (ТОВ), предусматривающих совместную работу с холодильной машиной в летний период. Схема расположения ТОВ глубинной мерзлотной завесы на участке штольни в плане приведена на рисунке 3.

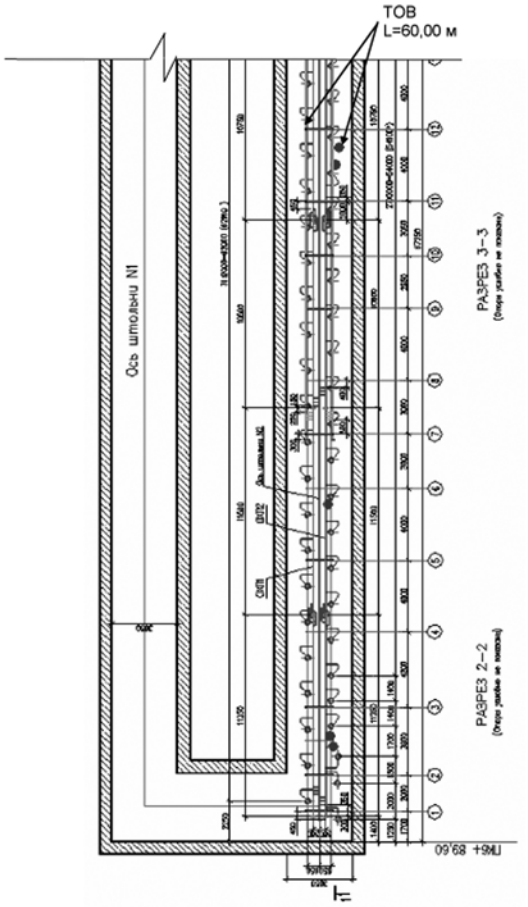


Рисунок 3 – Схема расположения ТОВ глубинной мерзлотной завесы на участке цементационной штольни.

Двурядность мерзлотной завесы обусловлена технологическими трудностями, возникающими в стеснённых условиях бурения слабых сильнотрещиноватых пород на глубину до 60,00 м при необходимости выдерживать шаг между охлаждающими трубами не более рассчитанного по прогнозу.

В качестве механизма для бурения скважин в цементационной штольне проектом предусматривается буровой агрегат с пневматическим приводом НКР, который имеет относительно небольшие габариты и позволяет бурить скважины в вертикальном направлении до проектной глубины 80,0 м диаметром от 105 до 150 мм с производительностью от 1-3 м/час. Выбор агрегата обусловлен геологическими условиями района работ, конструкцией скважин, геометрическими параметрами штолен.

В конструкции скважины под установку труб охлаждающих в цементационной штольне используются следующие типы обсадных колонн:

- кондуктор диаметром 219 мм и подвеска для крепления следующих обсадных колонн;

- промежуточная обсадная колонна диаметром 146 мм;

- эксплуатационная обсадная колонна диаметром 114 мм – для крепления стенок скважины по всей глубине, в этой колонне монтируются системы охлаждения.

Для бурения скважин на припортальном участке предусматривается применение самоходной буровой установки УРБ-2Д3.

Устройство двурядной мерзлотной завесы предусмотрено от оси верховой цементационной штольни на расстоянии 0,65 м.

Шаг и длина труб охлаждающих вертикальных глубинной коллекторной мерзлотной завесы, а также необходимость подключения в летние периоды холодильной машины были обоснованы в прогнозном расчёте температурного режима грунтов в основании теоретической плотины.

Условия эксплуатации теоретической плотины моделируют с определёнными допущениями

условия эксплуатации ЛКЗП Вилюйской ГЭС-3 на участке цементационных штолен и припортальном участке.

Допущения, принятые для расчёта при моделировании условий эксплуатации ЛКЗП Вилюйской ГЭС-3 в программе PLOTINA, следующие:

1. Напор, обуславливающий обходную фильтрацию в основании штолен, равен напору при глубине водохранилища 22,00 - 28,00 м, что возможно из-за хорошей проницаемости пород слоя 12а при развитии трещин с раскрытием до 30 мм.

2. Напор максимален в весеннее - осенний период.

3. Глубина водохранилища принята для отметки дна 143,00 м.

4. Ширина гребня условной плотины равна 19,00 м участка скалы с цементационными штольнями.

5. Глубина мерзлотной завесы задаётся по согласованию с заказчиком и определяется исходя из выполнения условий:

- перекрытия фильтрующего слоя 12а (“тело висячей плотины”);

- концы труб охлаждающих вертикальных должны заходить в слой 12б с коэффициентом фильтрации 0,80 м/сут. На отметках ниже 123,00 м заказчиком не предоставлено значение коэффициента фильтрации, поэтому в среднем по всему слою 12б принято значение коэффициента фильтрации не более 0,80 м /сут.

6. Средняя температура воды в водохранилище за год равна 4,00 0С;

7. На абсолютных отметках от 185,00 до 100,00 м отсутствуют водоупорные слои в соответствии с материалами инженерно-геологических изысканий.

8. Для учёта засолённости и смещения температуры начала замерзания в область отрицательных температур (минус 1,10 0С вместо минус 0,10 0С для слоя 12а и минус 3,50 0С вместо минус 0,10 0С для слоя 12б) исходная температура принята выше на ΔТ равный плюс 1,20 0С для слоя 12а и на ΔТ равный плюс 2,30 0С для слоя 12б.

9. Инженерно-геологические и термометрические условия на всём участке цементационной штольни усреднены по скважине 3980 и Т-21 соответственно.

10. Наличием вертикальных трещин и их взаимным расположением пренебрегаем.

Программа PLOTINA позволяет решать двухмерные (профильные) задачи теплового режима грунтов с учетом фильтрации под телом плотины при изменении граничных условий во времени и неоднородном распределении гидрогеологических параметров в пространстве.

Рассматривается двухмерная (профильная) напорная фильтрация подземных вод под телом плотины. В верхнем бьефе задается постоянный уровень воды в водохранилище, в нижнем бьефе толщина слоя воды пренебрежимо мала. Сложение грунтов под основанием плотины горизонтально слоистое. Плотина сложена хорошо проницаемыми грунтами слоя 12а. Линии течения подземных вод проходят по зоне протаивания под телом плотины, вода из верхнего бьефа фильтруется и высачивается в нижнем бьефе.

Тепловой режим грунтов определяется переменной температурой воздуха и воды в водохранилище, наличием снежного покрова на теле плотины и промораживающим воздействием одного ряда ТОВ. На нижней границе, соответствующей подошве водоупора, задается постоянная температура. При проморозке грунтов будет учитываться уменьшение их коэффициента фильтрации в соответствии с уменьшением открытого порового пространства.

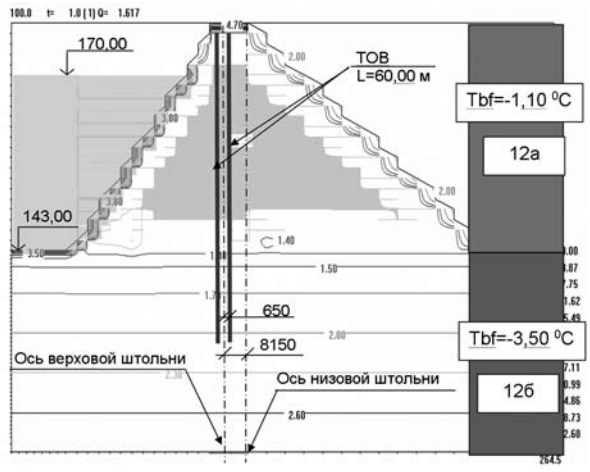


Рисунок 4 – Расчётная область в программе PLOTINA – теоретическая плотина, участок мерзлотной завесы в верховой штольне.

При схематизации области моделирования ее граница аппроксимируется отрезками, на отдельных участках задаются граничные условия первого (температура или напор) и второго (симметрия, непротекание) рода. В части области соответствующей водопроводящим грунтам в основании плотины решается задача фильтрации и теплообмена. Левая и правая границы отодвинуты на достаточно большое расстояние вне пределов участков просачивания в верхнем бьефе и высачивания в нижнем бьефе.

Теоретическая плотина, моделирующая условия эксплуатации ЛКЗП со штольнями задана в программе PLOTINA и приведена на рисунке 4.

В ходе выполнения прогнозного расчёта было рассмотрено два режима работы мерзлотной завесы.

В первом режиме ТОВ глубинной коллекторной двурядной завесы работают только в зимний период с 15 ноября по 15 марта.

Конденсаторная часть представлена аппаратом воздушного охлаждения (АВО). В качестве хладагента используется двуокись углерода.

Результаты расчёта на конец лета первого года работы и на конец лета десятого года работы мерзлотной завесы приведены на рисунках 5 и 6.

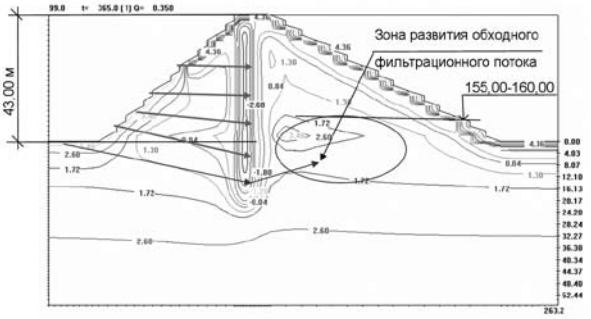


Рисунок 5 - Температура грунта на 15 сентября первого года работы ТОВ с АВО в зимний период. Глубина мёрзлого нефильтрующего слоя грунта Нм=43,00 м.

Результаты расчета распределения по глубине температур грунта основания условной плотины, в гребне которой расположены верховая и низовая цементационная штольни и грунт замораживается двурядными ТОВ длиной 60,00 м с АВО при условии отсутствия водоупорного слоя показывают:

1. После первого года эксплуатации мерзлотной завесы радиусы смерзания льдогрунтовых цилиндров при шаге 2,00 м в ряду мерзлотной завесы смыкаются, что обеспечивает отсутствие фильтрации на отметках 185,00 - 142,00 м.

2. В последующие годы эксплуатации мерзлотной завесы наблюдается увеличение радиусов намораживаемых льдогрунтовых цилиндров и глубины замороженного грунта до отметки 121,00 м, что обеспечивает отсутствие развития фильтрации в грунтах основания цементационных штолен на отметках 185,00 – 121,00 м.

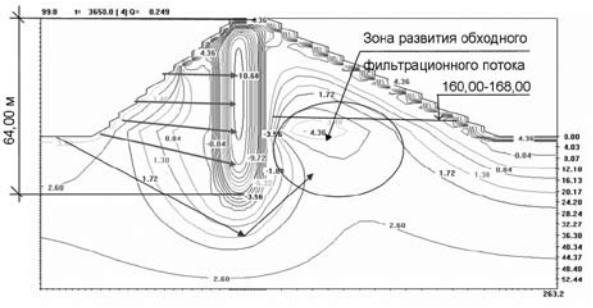


Рисунок 6 - Температура грунта на 15 сентября десятого года работы ТОВ с АВО в зимний период. Глубина мёрзлого нефильтрующего слоя грунта Нм=64,00 м.

3. Вследствие отсутствия водоупорных слоёв в грунте основания возможно развитие обходных фильтрационных потоков на отметках ниже 143,00 м. Выход фильтрационных потоков ожидается на отметках 155,00 - 168,00 м.

В связи с неизученностью и сложностью инженерно-геологических и фильтрационных условий рекомендуется эксплуатировать ТОВ глубинной коллекторной завесы в летний период, подключив холодильную машину.

Во втором режиме работы ТОВ глубинной коллекторной завесы работают в зимний период с ноября по март с аппаратом воздушного охлаждения.

В период с 15 марта по 15 ноября (в летний период) подключается холодильная машина с температурой на испарителе минус 31 0С. Результаты расчёта на конец лета первого и десятого года работы приведены на рисунках 7 и 8 и в таблице 3.

Результаты расчета распределения по глубине температур грунта основания условной плотны, в гребне которой расположены верховая и низовая цементационная штольни и грунт замораживается двурядными ТОВ длиной 60,00 м (шаг ТОВ в ряду не превышает 2,00 м) с холодильной машиной показывают:

Таблица 3 - Результаты расчёта на конец лета первого и десятого года работы

Режим работы ТОВ мерзлотной завесы	*Глубина мёрзлого слоя грунта завесы Нм, м*			
	Первый год	*Второй год*	*Пятый год*	*Десятый год*
ТОВ работают с АВО в зимний период и с холодильной машиной (ХМ) в летний период	*62,00*	*63,00*	*64,00*	*68,00*

1. После первого года эксплуатации ТОВ с ХМ радиусы смерзания льдогрунтовых цилиндров при шаге 2,00 м в ряду мерзлотной завесы смыкаются, что обеспечивает отсутствие фильтрации на отметках 185,00-123,00 м.

2. В последующие годы эксплуатации ТОВ с ХМ наблюдается увеличение радиусов намораживаемых льдогрунтовых цилиндров и глубины замороженного грунта до отметок 117,00 м, что обеспечивает отсутствие развития фильтрации в грунтах основания цементационных штолен на отметках 185,00 – 117,00 м.

3. Вследствие отсутствия водоупорных слоёв в грунте основания возможно развитие обходных фильтрационных потоков на отметках ниже 123,00 м. Выход фильтрационных потоков ожидается на отметках 155,00 - 168,00 м.

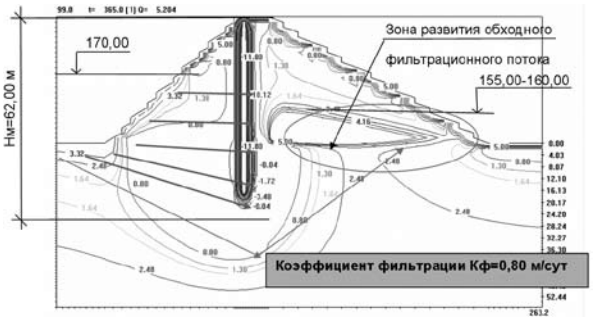


Рисунок 7 - Температура грунта на 15 сентября первого года работы. Глубина мёрзлого нефильтрующего слоя грунта завесы Нм=62,00 м.

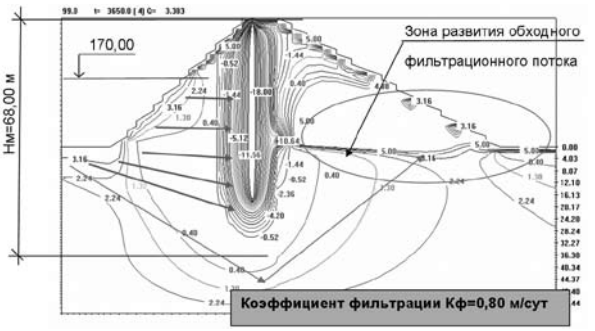


Рисунок 8 - Температура грунта на 15 сентября десятого года Глубина мёрзлого нефильтрующего слоя грунта завесы Нм=68,00 м.

Расчёт выполнен без учёта фильтрационного потока.

Таблица 4 - Результаты расчёта требуемой проектной холодопроизводительности

Работа с холодильной машиной (tисп=-20 ^{0}C - худшие условия эксплуатации). Первый год.				
Расчётные характеристики	1 апреля	1 мая	1 сентября	1 ноября второго года
Тепловая нагрузка, кДж/(сут*м)	3855,50	3457,52	2979,30	2747,28
Тепловой поток на 1 м охлаждающей системы, кВт/м	0,045	0,040	0,034	0,032
Требуемая проектная холодопроизводительность на 1800 м длины ТОВ, кВт	81,00	72,00	61,20	57,60
Работа с холодильной машиной (tисп=-20 ^{0}C – худшие условия эксплуатации). Второй год.				
Расчётные характеристики	1 апреля	1 мая	1 сентября	
Тепловая нагрузка, кДж/(сут*м)	1907,85	1887,14	2141,65	
Тепловой поток на 1 м охлаждающей системы, кВт/м	0,022	0,022	0,025	
Требуемая проектная холодопроизводительность на 1800 м длины ТОВ, кВт	39,60	39,60	45,00	

По результатам расчёта была подобрана требуемая проектная холодопроизводительность холодильной машины до 200 кВт.

Холодильная машина представлена в контейнерном исполнении.

Контейнерная холодильная установка предназначена для охлаждения

теплоносителя (водного раствора этиленгликоля 60%), подаваемого в конденсатор для

конденсации двуокиси углерода CO2, который используется в мерзлотной завесе в качестве хладагента.

Конденсация паров CO2 происходит на гладкой стальной трубе Ø33.7x3,5 при

tконд.= минус 31,5 0С, в трубке циркулирует промежуточный теплоноситель – 60% раствор этиленгликоля.



Рисунок 9 – Схема конденсации CO2 промежуточным теплоносителем.

В качестве рабочего вещества в установке используется холодильный агент R404a. Хладагент R404a относится к озонобезопасным фреонам и разрешён к применению Монреальским Протоколом и последующими международными соглашениями.

Все основное оборудование размещено в стандартном 40-футовом контейнере.

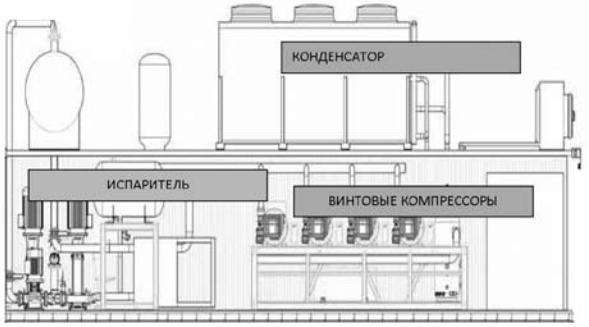


Рисунок 10 – Объёмное решение контейнерной холодильной установки.

Технические характеристики:

1. Холодопроизводительность – 208 кВт.
2. Холодильный агент – R404a.
3. Температура кипения холодильного агента – минус 40 0С
4. Температура конденсации холодильного агента – плюс 40 0С
5. Теплоноситель – раствор 60% этиленгликоля
6. Температура теплоносителя на выходе из испарителя – минус 35 0С.

7. Потребляемая электрическая мощность – 245 кВт.

В проекте контейнерной холодильной установки выделены по выполняемым функциям группы оборудования:

1. Винтовые открытые компрессоры, в которых в качестве привода выступают отечественные асинхронные электродвигатели мощностью 75 кВт;

2. V-образный конденсатор воздушного охлаждения. В конденсаторную группу входит линейный ресивер, расположенный внутри рамы агрегата. Ресивер линейный предназначен для сбора жидкого хладагента;

3. Испаритель (охладитель теплоносителя) - применён пластинчатый

теплообменный аппарат;

4. Ресивер низкого давления. Ресивер низкого давления предназначен для обеспечения жидким холодильным агентом испарителя по затопленной схеме. Ресивер одновременно является отделителем жидкости и служит для защиты компрессоров от влажного хода.

5. Центробежный насос для циркуляции теплоносителя между баком-накопителем и потребителем.

Конденсатор и маслоохладитель устанавливается сверху на специально предусмотренные для этого опоры. Кроме этого, на крыше контейнера установлен бак-аккумулятор и расширительный сосуд. Система теплоносителя пристыковывается к установке посредством фланцевых соединений. Для безлопастного обслуживания оборудования, установленного на крыше, контейнера имеются защитные ограждения.

Система охлаждения выполнена по безнасосной схеме по контуру хладагента R404a.

В испарителе затопленного типа жидкий хладон R404a кипит при температуре минус 40 0С. Насыщенный пар с каплями жидкости поступает в отделитель жидкости, где происходит отделение пара от капельной жидкости. Из отделителя жидкости пар всасывается компрессорами, где сжимается до давления конденсации. Очистка сжатого в компрессорах пара хладона от смазочного масла производится в маслоотделителе. Охлаждение масла, отделённого от пара хладона, осуществляется в маслоохладителе за счёт теплообмена с воздухом окружающей среды. После охлаждения в маслоохладителе масло подается в винтовые компрессоры. Пар хладона из компрессора поступает в воздушный конденсатор. В конденсаторе пар хладона охлаждается воздухом окружающей среды и конденсируется. Из конденсатора жидкий хладон сливается в линейный ресивер, откуда, охладившись в экономайзере, поступает через дроссельное устройство в отделитель жидкости и испарительную систему. Регулирование количества подаваемого жидкого хладона, производится по уровню в отделителе жидкости. Возврат смазочного масла из испарительной системы во всасывающий паровой коллектор винтовых компрессоров осуществляется за счёт отбора насыщенной маслом жидкости и выпаривания её в специальном теплообменнике.

Заправка системы хладагентом производится через заправочные вентили. На емкостных аппаратах установлены предохранительные клапаны, трубопровод от которых выведен в атмосферу.

Включение холодильной машины должно быть выполнено при температуре воздуха не выше минус 10 0С в весенний период. Отключение при устойчивом понижении температуры воздуха до минус 15 0С.

Схема охлаждения промежуточного теплоносителя – раствора этиленгликоля приведена на рисунке 10.

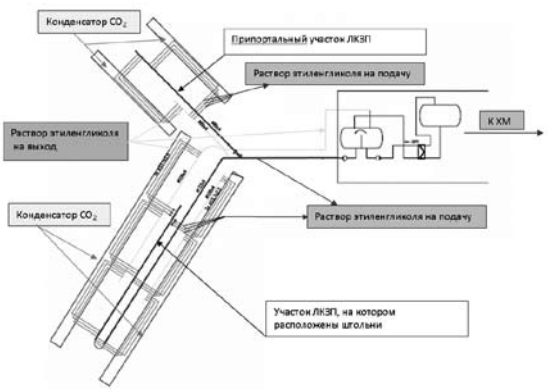


Рисунок 11 – Схема холодоснабжения по раствору этиленгликоля.

Заключение.

1. Техническое решение по уменьшению разрушающего воздействия обходного фильтрационного потока на ЛКЗП Вилюйской ГЭС-3 посредством устройства “висячей” глубинной мерзлотной завесы в сложных инженерно-геологических (отсутствует водоупор) и неизученных фильтрационных условиях в области отрицательных температур реализуется впервые.

2. Применение холодильной машины при отсутствии фактических значений коэффициента фильтрации на 2010-2011 год обязательно.

3. По результатам теоретических расчётов устойчивость левого борта плотины будет обеспечена при перекрытии фильтрационного потока на отметках 185,00-123,00 м.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВИДОВ СВАЙ ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

.А.В. Грузин[1], М.В. Кучеренко[1]

[1]Омский государственный технический университет, г. Омск, e-mail: maxim_85_07@mail.ru

Выполненные расчёты подтвердили возможность увеличения несущей способности свайного фундамента в условиях вечной мерзлоты без дополнительного расхода строительных материалов.

В последние годы в Российской Федерации наблюдается новый этап активного освоения нефтегазовых месторождений в районах вечной мерзлоты. Для уменьшения влияния сложных природно-климатических и погодных условий на стоимость добываемых углеводородов, очевидно, необходимо разрабатывать новые технологии, обеспечивающие более эффективное использование материалов, завозимых в районы Крайнего Севера. Примером таких прогрессивных технологий могут служить строительные технологии, направленные на снижение в условиях вечной мерзлоты стоимости свайных фундаментов таких нефтегазовых сооружений, как хранилища для нефти и газа, цеха по переработке и сжижению природного газа и т.д. Ранее выполненные исследования показали, что свайные фундаменты, использующие сваи с поперечным сечением в виде треугольника, имеют большую несущую способность в сравнении со свайными фундаментами на сваях традиционных сечений: круглого и квадратного [1].

Для оценки перспектив использования свай с поперечным сечением в форме правильного треугольника в природно-климатических условиях Ванкорского нефтегазового месторождения, расположенного в Туруханском районе Красноярского края, на основе существующей методики был выполнен расчёт её несущей способности [2,3]. В качестве исходных данных для расчёта геометрических параметров свай с сечением в форме круга и правильного треугольника была использована стандартная свая квадратного сечения длиной 5 метров, со стороной 25 см и массой 1,15 т [4].

Как видно из представленных на рисунке 1 данных, несущая способность в вечномёрзлом грунте сваи квадратного сечения равна 819 кН, круглого сечения – 733 кН, треугольного сечения - 924 кН. Таким образом, несущая способность треугольной сваи, при практическом равенстве расходуемых на её изготовление материалов, на 13% больше, чем у сваи квадратного сечения, и на 26% больше несущей способности сваи с круглым сечением.

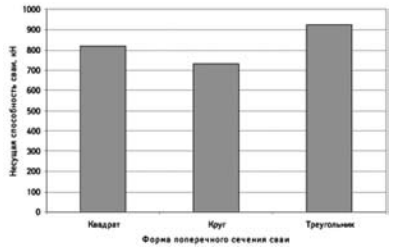


Рисунок 1 - Влияние формы поперечного сечения сваи на её несущую способность

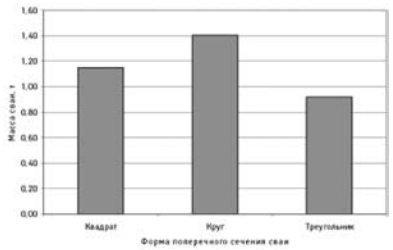


Рисунок 2 - Влияние формы поперечного сечения сваи на её массу

Расчёты показывают, что для обеспечения одинакового со сваей квадратного сечения значения несущей способности при условии равенства длины, масса сваи с круглым сечением должна быть порядка 1,41 т, а с сечением в форме правильного треугольника – 0,92 т (рисунок 2).

Таким образом, использование свай треугольного сечения позволяет уменьшить расход материалов и, соответственно, грузоперевозки необходимых для их изготовления компонентов по сравнению со сваями квадратного сечения на 25% и на 53% по сравнению с цилиндрическими сваями.

Выводы:

- несущая способность сваи треугольного сечения в вечномёрзлых грунтах Ванкорского месторождения в 1,13 раза превышает аналогичный параметр для сваи квадратного сечения и в 1,26 раза превышает аналогичный параметр для сваи круглого сечения;
- при устройстве свайных фундаментов зданий и сооружений на вечномёрзлых грунтах Ванкорского месторождения использование свай треугольного сечения обеспечит максимальную эффективность использования материалов и позволит уменьшить массу перевозимых грузов на величину от 25% до 53%.

Список литературы

1. Грузин А.В., Грузин В.В. Сравнительный анализ применения висячих забивных свай с треугольным сечением в технологиях возведения фундаментов в жилищном строительстве г. Омска (статья). Актуальные проблемы современности: Междунар. науч. журнал. – Караганда: РИО «Болашак-Баспа», 2010. - №6 (56). - С.30-35.

2. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты.

3. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах.

4. ГОСТ 19804.2-79*. Сваи забивные железобетонные цельные сплошного квадратного сечения с поперечным армированием ствола с напрягаемой арматурой.

РАСЧЕТ ГЛУБИННЫХ СЕЗОННЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Г.В. Аникин[1], К.А.Спасенникова[1]

[1]Институт Криосферы Земли СО РАН, г. Тюмень, e-mail: anikin@ikz.ru

В работе рассматривается тепломассоперенос в глубинных сезонно-охлаждающих устройствах, приводятся соотношения, описывающие механику перемещения хладагента внутри замкнутого контура и теплообмен с внешней средой.

Типичный испаритель глубинного сезонного охлаждающего устройства (СОУ) изображен на рисунке 1.

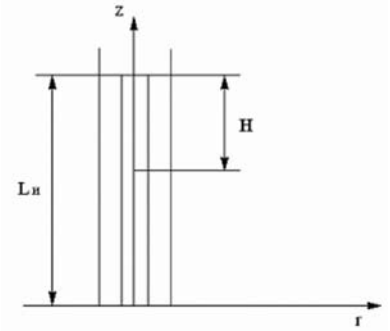


Рисунок 1 - Схема испарителя глубинного СОУ и система цилиндрических координат, в которой производятся вычисления. Li- длина вставной трубки; H- глубина зоны кипения; r,z- цилиндрические координаты.

Как видно из рисунка, испаритель глубинного СОУ представляем собой трубу, находящуюся в другой трубе. Причем, по внутренней круглой трубе жидкий хладагент течет вниз, а по кольцевому каналу между внутренней и внешней трубами жидкий хладагент течет вверх, и в некоторой точке кольцевого канала, начинает кипеть.

Уравнение движения для внутреннего круглого канала записываются в виде [1]

$$\frac{dP}{dz}=\frac{\xi_1\rho_1V_1^2}{d_{э1}}-\rho_1 g \qquad (1)$$

где $d_{э1},\xi_1,\rho_1,V_1$- гидродинамический радиус, коэффициент сопротивления, плотность и скорость жидкого хладагента во внутренней трубке соответственно,

P - давление,

g - ускорение свободного падения.

Для нижней части кольцевого канала аналогичное соотношение записывается в виде [2]

$$-\frac{dP}{dz}=\frac{\xi_2\rho_2V_2^2}{2d_{э2}}+\rho_2 g \qquad (2)$$

где $d_{э2},\xi_2,\rho_2,V_2$ - гидродинамический радиус, коэффициент сопротивления, плотность и скорость жидкого хладагента в кольцевом канале соответственно.

Пусть полный поток массы в каждом канале обозначается через , тогда выполняется условие

$$W=\rho_1V_1S_1=\rho_2V_2S_2 \qquad (3)$$

где S_1, S_2- площади сечений круглого и кольцевого каналов соответственно.

Подставляя (3) в (1) и (2) получаем для круглого канала

$$\frac{dP}{dz}=\frac{\xi_1W^2}{2d_{э1}\rho_1S_1^2}-\rho_1 g \qquad (4)$$

Для нижней части кольцевого канала выражение (2), с учетом (3) записывается в следующем виде

$$-\frac{dP}{dz}=\frac{\xi_2W^2}{2d_{э2}\rho_2S_2^2}+\rho_2 g \qquad (5)$$

Интегрируя (4) и (5), получаем

$$P_L-P_0=\frac{\xi_1W^2L}{2d_{э1}\rho_1S_1^2}-g\int_0^L\rho_1dz \qquad (6)$$

$$P_0-P_{L-H}=\frac{\xi_2W^2(L-H)}{2d_{э2}\rho_2S_2^2}+g\int_0^{L-H}\rho_2dz \qquad (7)$$

Здесь P_o, P_L, $P_{L\text{-}H}$- давления при z=0,z=L и z=L-H соответственно (рисунок 1).

Система координат, в которой производятся вычисления, изображена на рисунке 1 (точка z=0 соответствует нижней кромке круглого канала). Коэффициенты сопротивления ξ_1,ξ_2 вычисляются стандартным образом в соответствии с работой [2].

Уравнение движения в области двухфазного потока записывается в виде

$$-\frac{dP}{dz}=-\left(\frac{dP}{dz}\right)_F+\varphi_L\rho_L+\varphi_G\rho_G \qquad \varphi_L+\varphi_G=1 \qquad (8)$$

здесь φ_L,φ_G - доля сечения занятая жидкостью и газом соответственно, ρ_L,ρ_G - плотности жидкости и газа в данном сечении, $\left(\frac{dP}{dz}\right)_F$ - градиент давления, необходимый для преодоления трения в данном сечении, задающийся следующими выражениями [1]

$$\frac{dP_F}{dz}=\Phi_L^2\frac{dP_{SL}}{dz}=\Phi_G^2\frac{dP_{SG}}{dz} \qquad (9)$$

- градиенты давления, необходимые для преодоления трения жидкостью и газом соответственно, в том случае, если бы каждая из этих компонент занимала бы все сечение трубы. Данные величины равны

$$-\frac{dP_{SL}(z)}{dz}=\frac{\xi_{TOT}(\mathrm{Re}_L(z),\Delta_2)k(R_1,\mathrm{Re}_L(z))W_L(z)^2}{2\rho d_{Э2}S_2^2} \qquad -\frac{dP_{SG}(z)}{dz}=\frac{\xi_{TOT}(\mathrm{Re}_G(z),\Delta_2)k(R_1,\mathrm{Re}_G(z))W_G(z)^2}{2\rho_G d_{Э2}S_2^2} \quad (10)\ (11)$$

где $W_L(z)$, $W_G(z)$ - массовые потоки жидкости и газа соответственно в сечении с координатой z, $Re_L(z)$, $Re_G(z)$ - числа Рейнольдса жидкости и газа соответственно, задающиеся следующими соотношениями

$$\mathrm{Re}_L(z)=\frac{W_L(z)d_{Э2}}{\mu S_2} \qquad \mathrm{Re}_G(z)=\frac{W_G(z)d_{Э2}}{\mu_G S_2} \quad (12)$$

μ_G - динамическая вязкость газа., μ - динамическая вязкость жидкости.

Величины Φ_L^2, Φ_G^2 равны [1]

$$\Phi_L^2=1+\frac{\Omega}{X}+\frac{1}{X^2} \qquad \Phi_G^2=1+\Omega X+X^2 \quad (13) \qquad (14)$$

Здесь *X*- параметр Локкарта-Мартинелли, задающийся следующим соотношением

$$X(z)=\sqrt{\frac{\frac{dP_{SL}(z)}{dz}}{\frac{dP_{SG}(z)}{dz}}} \quad (15)$$

$\Omega=5$ если $\mathrm{Re}_L(z)\le 2320$ и $\mathrm{Re}_G(z)\le 2320$

$\Omega=10$ если $\mathrm{Re}_G(z)\le 2320$ и $\mathrm{Re}_L(z)\ge 2320$

$\Omega=12$ если $\mathrm{Re}_L(z)\le 2320$ и $\mathrm{Re}_G(z)\ge 2320$

$\Omega=20$ если $\mathrm{Re}_L(z)\ge 2320$ и $\mathrm{Re}_G(z)\ge 2320$

коэффициент трения, - отношение неровностей стенки к гидродинамическому радиусу кольцевого канала, - поправочный коэффициент кольцевого канала, - отношение внутреннего диаметра кольцевого канала к внешнему диаметру кольцевого канала [2].м

Проинтегрировав обе части (8) получаем

$$P_{L-H}-P_L=-\int_{L-H}^{L}\left(\frac{dP}{dz}\right)_F dz+\int_{L-H}^{L}(\rho_L\varphi_L+\rho_G\varphi_G)dz \quad (16)$$

$$-\Delta P_F=\int_{L-H}^{L}\left(\frac{dP}{dz}\right)_F dz=\int_{L-H}^{L}\Phi_L^2\frac{dP_{SL}}{dz}dz=\int_{L-H}^{L}\Phi_G^2\frac{dP_{SG}}{dz}dz \quad (17)$$

Выражение (16), с учетом выражения (17) перепишется в виде

$$P_{L-H}-P_L=\Delta P_F+\int_{L-H}^{L}(\rho_L\varphi_L+\rho_G\varphi_G)dz \quad (18)$$

Складывая уравнения (6), (7) и (18) и учитывая, что получаем основное гидродинамическое уравнение глубинного СОУ

$$\frac{\xi_1 W^2 L}{2d_{э1}\delta_L S_1^2}+\frac{\xi_2 W^2(L-H)}{2d_{э2}\delta_L S_2^2}+\Delta P_F=g\int_{L-H}^{L}\varphi_G(\delta_L-\delta_G)dz \quad (19)$$

Величина φ_G задается, как следует из работы [3], следующими выражениями

$$\varphi_G=\left(1+K\frac{(1-x)\rho_G}{x\rho_L}\right)^{-1} \quad (20)$$

где x- массовое газосодержание, K- коэффициент скольжения, дающийся следующим выражением [3]

$$K=\left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

Тепловой расчет системы приводит к уравнению следующего вида

$$Wc_{PL}\left(\frac{P_y(L-H)-P_y(L)}{\frac{dP}{dt}Q_y L}\right)=(\theta X(1-X)+(1-X)) \qquad \theta=\frac{L}{Wc_{PL}\left(\frac{1}{\pi\lambda_L Nu_1}+\frac{1}{2\pi\lambda_T}\ln\left(\frac{b_1}{a_1}\right)\right)} \quad X=\frac{H}{L} \quad (22) \qquad (23)$$

здесь C_{PL} - удельная теплоемкость жидкого хладагента, $P_y(L-H)$ - давление в кольцевом канале при z=L-H, $P_y(L)$ - давление в кольцевом канале при z=L, Q_y - тепловой поток на один погонный метр

поступающий в испаритель извне,

λ_L - коэффициент теплопроводности жидкого хладагента,

λ_T - коэффициент теплопроводности материала из которого сделана вставная трубка,

a_1 - внутренний радиус вставной трубки,

b_1 - внешний - радиус вставной трубки,

Nu_1 - число Нуссельта круглого канала [4].

С другой стороны выполняется следующее соотношение

$$P_y(L-H)-P_y(L)=\rho_L gH-\frac{\xi_1 W^2 L}{2d_{э1}\rho_L S_1^2}-\frac{\xi_2 W^2 (L-H)}{2d_{э2}\rho_L S_2^2} \tag{24}$$

и, следовательно, можно записать

$$Wc_{PL}\left(\frac{P_y(L-H)-P_y(L)}{\frac{dP}{dt}Q_y L}\right)=\tau X-\gamma-\omega(1-X) \tag{25}$$

$$\tau=Wc_{PL}\frac{\rho_L g}{\frac{dP}{dt}Q_y} \qquad \gamma=\frac{\xi_1 W^3 c_{PL}}{2d_{э1}\rho_L S_1^2\frac{dP}{dt}Q_y} \qquad \omega=\frac{\xi_2 W^3 c_{PL}}{2d_{э2}\rho_L S_2^2\frac{dP}{dt}Q_y} \tag{26}$$

Подставляя (25) в (22) и раскрывая скобки, получаем

$$\theta X^2+(\tau+\omega-\theta+1)X-(\gamma+\omega+1)=0 \tag{27}$$

Квадратное уравнение (27) имеет один положительный корень

$$X_+=\frac{-(\tau+\omega-\theta+1)+\sqrt{(\tau+\omega-\theta+1)^2+4\theta(\gamma+\omega+1)}}{2\theta} \tag{28}$$

И, следовательно, глубина зоны кипения с учетом (23) записывается в виде

$$H=X+L \tag{29}$$

Решая численными методами систему из двух уравнений, одно из которых задается выражением (19), а другое выражением (29), находим неизвестные величины W и H, что позволяет с помощью полученных выражений полностью смоделировать работу глубинных СОУ.

Список литературы:

1. Clayton T. Crowe Multiphase flow handbook. Boca Raton London New York, Taylor&Francis, 2006.
2. И.Е. Идельчик. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва, Машиностроение, 1992г.
3. Д. Баттерворс, Г. Хьюитт. Теплопередача в двухфазном потоке. М. Энергия, 1980г.
4. Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М. Атомиздат,1974г.

ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ НА ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОМ ПОЛИГОНЕ

Г.М. Долгих, С.Н. Окунев, С. Н. Стрижков,
Д. С. Паздерин, Н. Г. Гилев

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень, e-mail: nauka-fsa@mail.ru

Исследованы системы температурной стабилизации грунтов (ТСГ) оснований ВЕТ и ГЕТ выполненных в натуральную величину на опытно-промышленном полигоне НПО ФСА. Приведены технические параметры работы систем ТСГ.

Разработка новых нефтяных и газовых месторождений приводит к развитию инфраструктуры, появляется потребность в строительстве таких сооружений общественного назначения и промыслового в районах распространения многолетнемерзлых пород. Как правило, большинство зданий и сооружений представляют собой ширококорпусные развитые в плане крупногабаритные строения, где ТСГ с использованием индивидуальных термостабилизаторов затруднена, в этих случаях необходимо применять другие технические решения. В ООО НПО «Фундаментстройаркос» разработаны и с успехом на протяжении 20 лет применяются технические решения позволяющие решать эти задачи. На вооружении имеются два технических решения вертикальная (ВЕТ) и горизонтальная (ГЕТ) естественно-действующие трубчатые системы.

Система ГЕТ применяется при строительстве зданий и сооружение с полами по грунту в условиях сливающей мерзлоты, что позволяет поддерживать температурный режим грунта основания. Система ГЕТ используется при строительстве резервуаров, объемом до 100 тыс.м3, производственных корпусов, теплых стоянок, ремонтных и складских помещений с шириной свыше 200 м и многие другие. Система ВЕТ применяется при обустройстве нефтяных и газовых кустов скважин, а также промышленных строительств в тех случаях, когда существует необходимость глубинной ТСГ до 25 м., это требуется когда здание или сооружение расположено на грунтах с несливающейся мерзлотой.

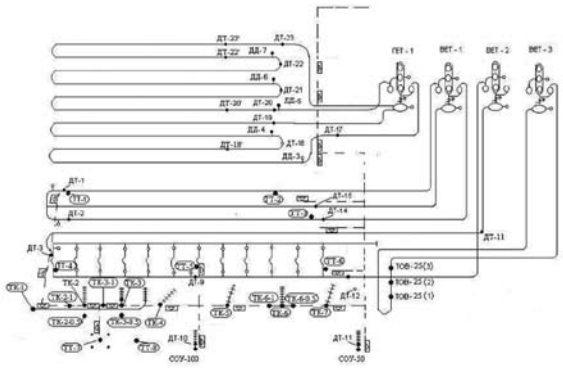


Рисунок 1 - Схема зимнего научно-практического полигона

НПО Фундаментстройаркос имеет один из самых больших в Мире опытно-промышленных экспериментальных специализированных полигонов для исследования систем термостабилизации грунта. На полигоне имеются опытно-промышленные экспериментальные установки и системы температурной стабилизации грунтов, выполненные в натуральную величину и служащие для изучения, моделирования и исследования теплофизических и теплогидравлических процессов протекающих, в различных узлах систем ТСГ, а также систем различных типов и конструкций. Многие установки единственные в мире, и не имеющие аналогов.

Передовые технологии, используемые для проведения исследований, позволяют получать высококачественные результаты измерения. Для определения расхода хладагента в системах ГЕТ и ВЕТ применяются турбинный расходомер производства немецкой фирмы «КЕМ» с точностью измерения до 0,001 литра/мин. А также применяется ультразвуковой расходомер производителя «Взлёт», позволяющий определять расход, не внося изменений в работу системы. Получение полной картины распределения и динамики температурного поля на поверхности систем ТСГ достигается с помощью тепловизоров IRTIS-2000 и FLIR. Определение локальных значений температуры производится датчиками ТСП и термопарами ТХА. На научно-практическом полигоне имеется сеть термометрических скважин (ТТ) для мониторинга температуры грунтов в зоне действия систем ТСГ, которые оборудованы цифровыми термокосами производства НПП «Эталон». Узлы замера барометрических параметров оснащены преобразователем разницы давления PR-28 и преобразователями давления RS-28 производства «Aplisens», а также стрелочными манометрами. Регистрация метеоусловий производится метеостанцией PRO-923.

ВЕТ-2

На зимнем полигоне имеется система ГЕТ и три системы ВЕТ. Система ВЕТ-2 представляет собой неразъемную конструкцию, состоящую из блока конденсаторного (БК), ускорителя циркуляции (УЦ), гидрозатворного узла и испарителя. Испаритель ВЕТ-2 состоит из горизонтальных труб и

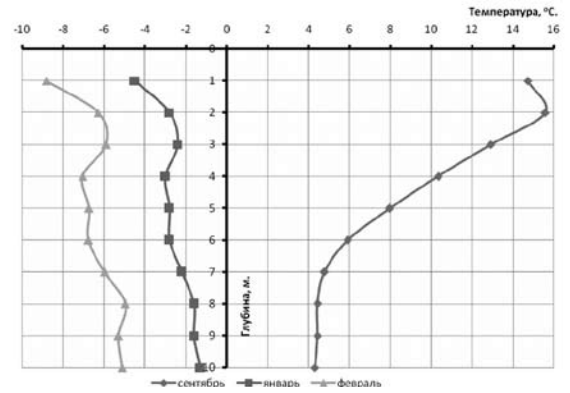


Рисунок 2 -Распределение температуры по глубине в зоне действия системы ВЕТ-2.

24 труб охлаждающих вертикальных (ТОВ) диаметром 33,7 мм и глубиной 10 м. Площадь БК составляет 110 м2, длина испарителя равна 360 м. Система ВЕТ-2 проходила испытания каждый зимний период с 2006 по 2011 года, только за февраль 2011 года было отведено 5 МВт тепла из грунта. Отведение тепловой энергии от грунта привело к изменениям температуры и фазового состояния воды в грунте. На рисунке 2 приведено распределение температуры по глубине в зоне действия системы ВЕТ-2 с течением времени.

ВЕТ-3

При обустройстве нефтяных и газовых кустов скважин в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) есть необходимость в глубинном промораживании устьев скважины. Применение индивидуальных термостабилизаторов для поддерживания грунта в твердомерзлом состоянии весьма не удобно, а зачастую и невозможно по многим причинам. НПО Фундаментстройаркос разработало техническое решение позволяющее решать эту проблему, это решение представляет собой систему ВЕТ с глубиной ТОВ до 30 м. Система ВЕТ-3 представляет собой неразъемную конструкцию, состоящую из БК, УЦ, гидрозатворного узла и испарителя. Испаритель ВЕТ-3 состоит из горизонтальных труб и 3 ТОВ диаметром 38 мм и глубиной 25 м. Площадь БК составляет 110 м2, длина испарителя равна 100 м. Принципиальная схема системы ВЕТ-3 показана на рисунке 3.

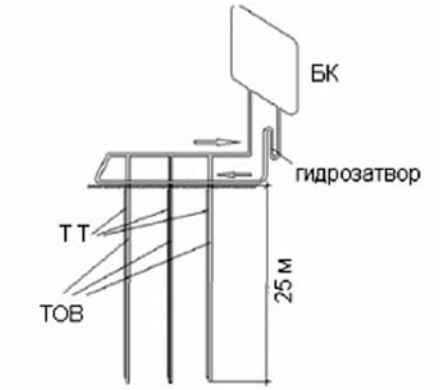


Рисунок 3 –Принципиальная схема системы ВЕТ-3.

В сроки с октября 2010 по март 2011 проводился мониторинг температуры датчиками установленными в термометрической трубе. Для обеспечения надежного теплового контакта вплотную к каждой ТОВ системы ВЕТ-3 установлена своя ТТ в связи с чем можно утверждать, что температура определяемая каждым датчиком соответствует температуре участка ТОВ.

На рисунке 4 показаны распределения средней температуры по длине охлаждающей трубы с течением времени для каждой трубы, кроме того на графике представлена зависимость температуры воздуха на полигоне

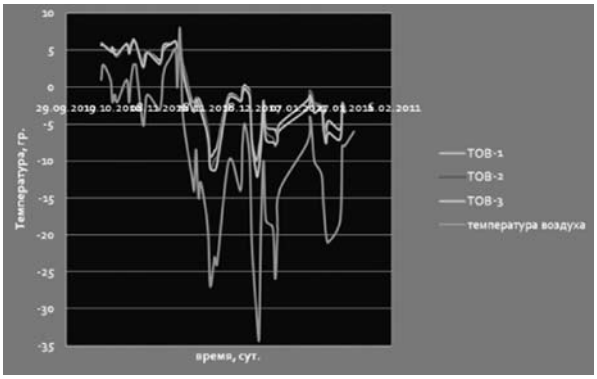


Рисунок 4 - Средняя температуры вертикальных охлаждающих труб с течением времени.

Проведена оценка неравномерности распределения температуры по длине вертикальных охлаждающих труб, в качестве критерия было выбрано среднее, за время наблюдения, значение среднего квадратического отклонения температуры по длине вертикальной охлаждающей трубы.

$$\overline{\sigma}_t = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sigma_i}{N},$$

σ_i - среднее квадратическое отклонения температуры по длине вертикальной охлаждающей трубы, N - количество наблюдений температуры.

Результаты расчетов сведены в таблице №1

Таблица 1 – Результаты расчетов

	ТОВ-1	ТОВ-2	ТОВ-3
$t,^{\circ}C$	- 0.5	-1.0	- 1.4
$\sigma_t,^{\circ}C$	0.7	1.1	1.3

ГЕТ-460

При использовании насыпных охлаждаемых оснований под ширококорпусные здания, крупногабаритные сооружения и суперблочные строительные объекты в условиях вечномерзлых грунтов целесообразно применение горизонтальной естественнодействующей системы охлаждения типа ГЕТ.

В работе системы ГЕТ заложен термосифонный принцип переноса тепла от нагретого охлаждаемого тела к холодному отводящему тепло телу. Специфической особенностью таких систем является течение легкокипящего хладагента в длинных горизонтальных трубчатых каналах с образованием двухфазного потока за счет испарения или кипения хладагента, при этом имеет место однонаправленное движение жидкой и паровой фаз по испарительному каналу в сторону к теплоотводящему элементу системы.

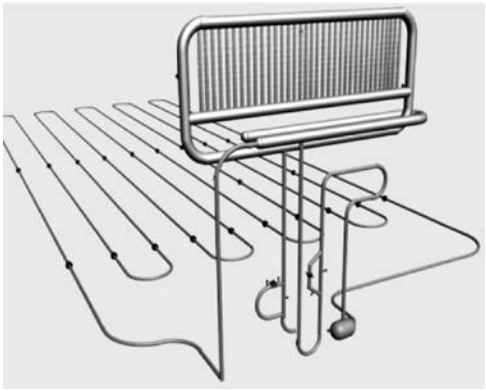


Рисунок 5 - Опытно-промышленная экспериментальная установка ГЕТ-460

Увеличение на практике размеров охлаждаемых оснований в плане приводит к неизбежному увеличению испарительных трубчатых элементов таких систем и они могут достигать сотен метров. Это в свою очередь вызывает повышение расхода хладагента, гидравлических сопротивлений внутри охлаждающих элементов, температурных потерь.

В связи с этим возникает необходимость в проведении как теоретического так и экспериментального исследования систем ГЕТ по определению совокупности их основных предельных параметров: длины охлаждающих (тепловоспринимающих) элементов, минимизации их гидравлических сопротивлений, обеспечение необходимого располагаемого напора, определение допустимых тепловых нагрузок и характеристик теплоотводящих элементов.

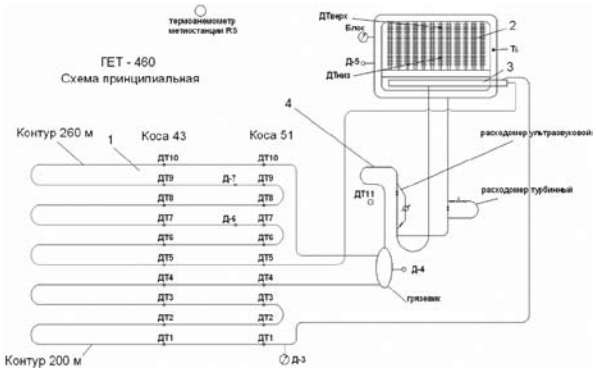


Рисунок 6 - Принципиальная схема ГЕТ-460 с двух контурным испарителем (200 м + 260 м)

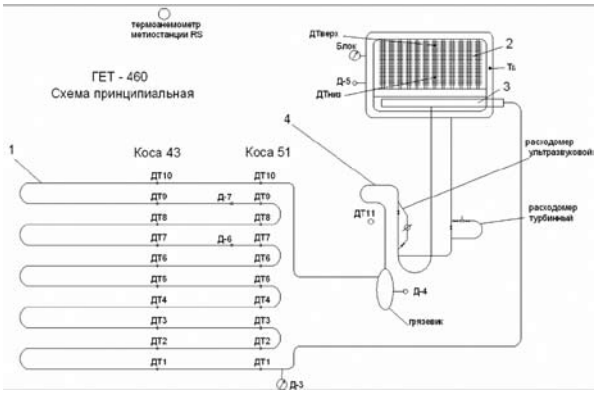


Рисунок 7 - Принципиальная схема ГЕТ-460 с одно контурным испарителем (460 м)
(ДТ (1÷10) – Датчик температурный; Д (4÷7) – Датчик давления RS 28; ДТверх, ДТниз. – накладной датчик температуры на конденсаторе верхней и нижней части соответственно; ТБ – термокарман с термопарой ТХА)

Принципиальная схема исследуемой нами системы ГЕТ на первом этапе приведена на рисунке 6, на втором этапе на рисунке 7.

Система ГЕТ-460 представляет собой неразъемную конструкцию, состоящую из блока конденсации с развитой площадью теплообмена, ускорителя циркуляции, гидрозатворного узла и горизонтального трубчатого испарителя длиной 460 м.

В испарительной трубе протекает хладагент, который воспринимает тепловой поток, подводимый через стальную стенку за счет джоулевого нагрева от источника постоянного тока. Снаружи испарительная труба тщательно теплоизолирована скорлупами из пенополистирола, так что почти все тепло от нагрева трубы передается внутрь трубы к хладагенту.

Для определения предельных параметров системы ГЕТ рассмотрим уравнение теплового баланса системы:

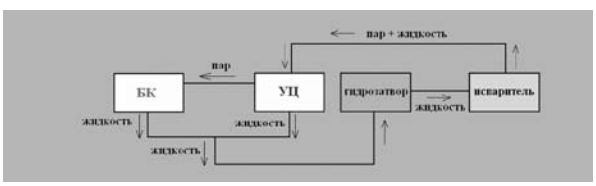


Рисунок 8 - Принципиальная блок-схема движения хладагента в системе ГЕТ-460

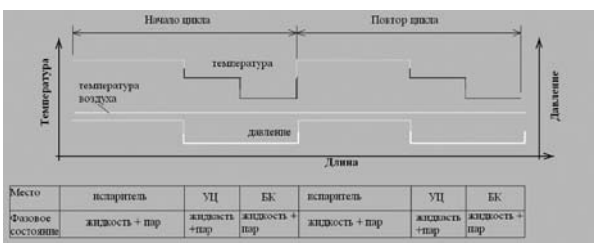


Рисунок 9 - Принципиальная диаграмма температуры и давления хладагента в системе ГЕТ-460

$Q_и = q_l L_и = q_s S_и = G r (X_2 – X_1)$, (1)

где: $Q_и$, q_l, q_s – общая и удельные тепловые нагрузки, Вт, Вт/м, Вт/м^2,

$L_и$ и $S_и$ – длина и площадь охлаждающего элемента (испарителя), м, м^2

G – расход хладагента, кг/сек,

r - теплота парообразования, кДж/кг,

X_2 и X_1 – конечное и начальное паросодержание хладагента.

Поскольку на вход в испаритель подается жидкость, то во всех случаях X_1=0. Предельным или критическим условием системы ГЕТ являются значения q_l, q_s, $L_и$, G', при которых X_2 =1. Этот означает, что на выходе из испарительной трубы идет парообразный хладагент, при этом отсутствует смачивание стенки этого участка жидким хладагентом, вследствие чего происходит резкое повышение температуры стенки и снижение интенсивности теплообмена.

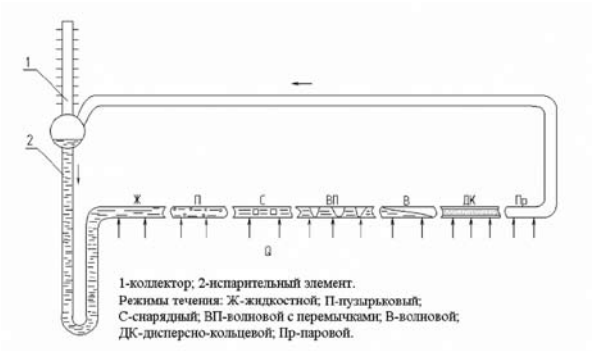


Рисунок 10 - Изменение структуры хладагента по длине испарительной трубы

Феноменологическая картина поведения хладагента по длине испарительной трубы такова, см. рисунке 8.

Из конденсаторного блока в испарительный канал поступает жидкий хладагент и на участке Ж под действием тепловой нагрузки происходит его нагрев. По мере движения нагретой жидкости и воздействия тепла происходит вскипание и образование пузырьков пара (участок П). Дальнейшее парообразование приводит к резкому увеличению объема пара, поскольку его удельный объем значительно больше удельного объема жидкости примерно в сотни раз, и образуется участок С, в котором пар в виде снарядов или пробок движется, увлекая жидкость. Следующий участок характеризуется увеличением паровых пробок уменьшением жидкостных перегородок, это участок ВП – волновой с перегородками. При дальнейшем парообразовании происходит разделение жидкой и паровой фаз – пар движется сверху над жидкостью со скоростью большей, чем жидкость и возникает разделенное лотковое течение с волнами на поверхности жидкости – участок В. По мере увеличения объема и скорости пара образуется дисперсно-кольцевой режим (участок ДК), при котором пар движется внутри жидкого кольца, расположенного по периметру трубы, частично захватывая капельную жидкость. На последнем участке ПР жидкость отсутствует и по трубе движется перегретый пар.

Выше описанная картина проявляется при достижении критических параметров системы ГЕТ, т.е. длины, тепловой нагрузки и расхода хладагента. Причем, определенной длине испарителя соответствует значение тепловой нагрузки и расхода и наоборот. Практически наличие дисперсно-кольцевого режима течения указывает на достижение критических параметров системы.

Циркуляция хладагента, в контуре системы ГЕТ, осуществляется за счет гидростатического напора, образуемого столбом хладагента стекающего по отводной трубе из нижней точки конденсаторного блока – Нг.н.. Под действием этого напора, возникает направленное движение в начале однофазного, а затем двухфазного потока хладагента из конденсаторного блока и УЦ в него же за счет преодоления сил трения на горизонтальных участках испарителя (на прямолинейных отрезках и поворотах), преодоления местных гидравлических сопротивлений и на подъем восходящего потока на входе в конденсаторный блок.

При сравнительно умеренных тепловых нагрузках на испаритель можно принять, что проскальзывание фаз в двухфазном потоке хладагента отсутствует и истинные скорости фаз равны, т.е. uск. = w'' - w' = 0. В этом случае можно записать для участка трубы Li, на которой подведено тепло в количестве:

$Q_и = q_l L_i = G_{см} (i_{см} – i_н)$, (2)

где: $i_{см}$, $i_н$ – энтальпия в конце участка Li и энтальпия насыщения в начале участка Li, соответственно, $G_{см}$ – массовый расход двухфазной смеси хладагента.

Так как весь подведенный поток тепла целиком расходуется на парообразование, поэтому массовый расход пара G'' в этом сечении определится уравнением:

$Q_т = q_l L_i = rG''$ (3)

Из (10) и (11) несложно получить паросодержание в любом сечении, соответствующего длине трубы L_i:

$X_i = q_l L_i / G_{см} r$ (4)

Из (12) несложно оценить критический расход хладагента, когда X_i = 1 для данной длины испарителя L и ожидаемой тепловой нагрузки на испаритель. Так при L=460 м и q_l =20 вт/м - $G_{см}$ = 32,2 кг/час. В этом случае уже в середине испарителя можно ожидать X_i = 0,5.

Располагаемый в системе ГЕТ напор, движущий хладагент в испарительной трубе, находится из выражения:

$\Delta P = (p'-p_{см}) g H_{г.н.}$ (5)

Плотность двухфазной смеси $p_{см}$ хладагента целиком и полностью определяется массовым рас-

ходным паросодержанием и находится из выражения:

$$\rho_{см} = \rho'\rho''/(\rho' x + \rho''(1-x)) \quad (6)$$

Натурные испытания системы ГЕТ-460 проводились в зимний период времени в естественных погодных условиях при отрицательных температурах. Целью испытаний на данном этапе было определение расхода конденсата жидкого аммиака при заданных тепловых нагрузках, воспринимаемых испарительной частью системы при фиксированной длине испарителя

Таблица 2 - Результаты экспериментов

ГЕТ-460	5,0 Вт/м		10,0 Вт/м		14,7 Вт/м		20,0 Вт/м	
	Тип контура		Тип контура		Тип контура		Тип контура	
	200 +260	460	200 +260	460	200 +260	460	200 +260	460
Твозд. С	-14,1	-14,0	-12,0	-11,0	-13,0	-16,5	-25,0	-16,0
Температура в блоке, С	-9,4	-11,6	-8,0	0,4	-8,6	-2,8	-11,5	7,7
Избыточное давление в БК, атм	2,13	2	2,4	3,4	2,2	3,1	1,95	5
Расход конденсата, л/ч	6,0	8,5	16,0	16,8	23,8	23,9	30,0	29,0
Расход конденсата (по нагр), л/ч	9,8		19,3		27,9		39,8	
Уровень в БК , мм	75	50	350	70	350	150	350	80
средняя температура по испарителю, С	-8,49	-6,46	-6	0,04	-3,46	-3,05	-11,8	8,03
Количество импульсов аммиака на выходе из испарителя 1/м	8		7		7		8	

В эксперименте обеспечивали фиксированную тепловую нагрузку на испарительную трубу и проводили измерение температуры по длине испарителя во времени при фиксируемых внешних параметрах окружающей среды – скорости воздуха и температуры воздуха. Заданную тепловую нагрузку выдерживали в течение времени до установления стационарного распределения температуры по длине испарительной трубы. Данные эксперимента приведены в таблице № 2. Первый этап эксперимента проводился на системе ГЕТ-460 с испарителем длиной 460 метров, два контура длиной 260 и 200 метров (рисунок 6). Второй этап эксперимента проводился на системе ГЕТ-460 с испарителем с одним контуром длиной 460 метров (рисунок 7).

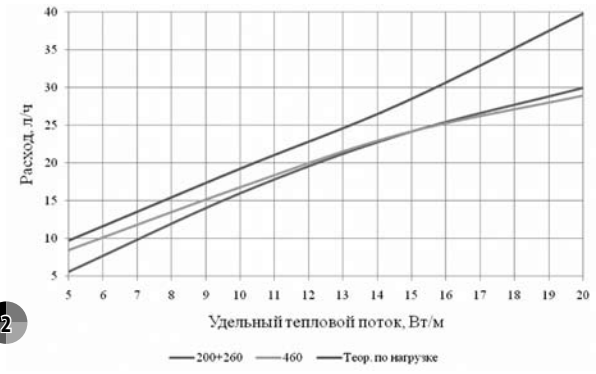


Рисунок 11 - Изменение расхода конденсата от нагрузки

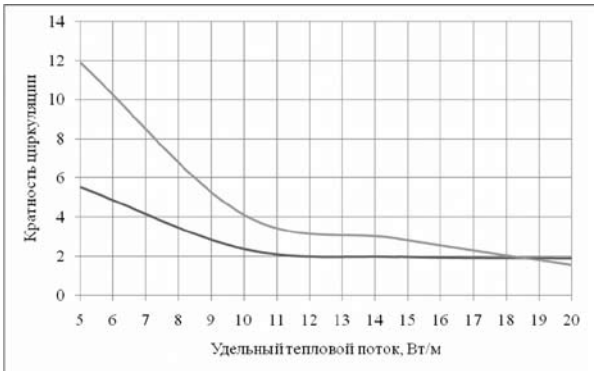


Рисунок 12 - Изменение Кратности циркуляции от нагрузки

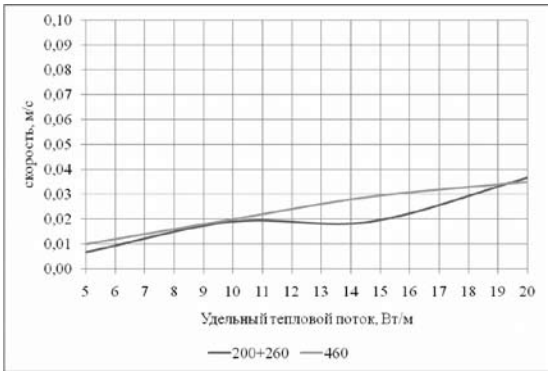


Рисунок 13 - Изменение скорости движения хладагента на входе в испаритель от нагрузки



Рисунок 14 - Принципиальная схема ГЕТ-250.

ГЕТ-250

Система ГЕТ-250 состоит из двух контуров теплообмена, это холодильная машина Битцер максимальной производительностью 12,5 кВт имеющая способ регулирования производимой мощности с рабочим хладагентом R404A и система ГЕТ-250 хладагент аммиак, принципиальная схема изображена на рисунке 12.

Конденсаторный блок ГЕТ-250 имеет возможность изменять высоту над уровнем испарителя, что позволяет провести серию экспериментальных исследований с различным значением высоты гидростатического столба, который варьируется на уровнях 2,4 и 5м. Конденсатор представляет собой кожухотрубный теплообменный аппарат, состоящего из кожуха в виде УЦ Ø159х6 и внутренними трубами Ø33,7х3,5, площадь рабочей поверхности теплообменника 3м^2. Принципиальная схема блока конденсации изображена на рисунке 12.

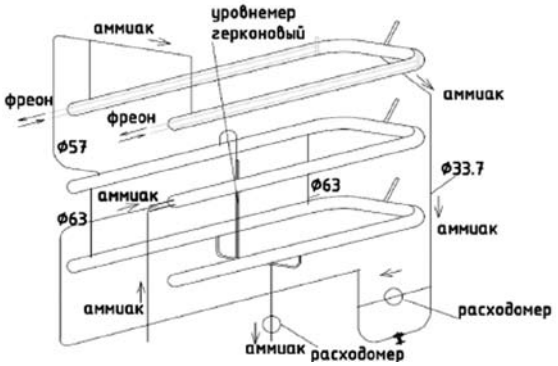


Рисунок 15 - Принципиальная схема блока конденсации ГЕТ-250.

Таблица 3 - Координаты расстановки контрольно измерительных приборов
на испарительной части ГЕТ-250 (I этап).

Термопары	
№	м
1	6,5
2	32
3	57,5
4	83
5	108,5
6	242

ПТП	
№	м
1	6,5
2	32
3	57,5
4	83
5	108,5
6	242

Давление	
№	м
1	6,5
2	57,5
3	108,5
4	242

Таблица 4 - Координаты расстановки контрольно измерительных приборов
на испарительной части ГЕТ-250 (II этап).

Термопары	
№	м
1	243.5
2	218
3	192.5
4	167
5	141.5
6	8

ПТП	
№	м
1	243.5
2	218
3	192.5
4	167
5	141.5
6	8

Давление	
№	м
1	243.5
2	192.5
3	141.5
4	8

По разработанному плану были проведены 2 серии экспериментальных исследований по определению тепло-гидравлических параметров системы ГЕТ-250 (длина испарителя 250 метров).

На первом этапе (на графиках А-В) опытная экспериментальная установка ГЕТ-250 имела вид, представленный на рисунке 13. На втором этапе (на графиках В-А) установка ГЕТ-250 была модифицирована, ее вид показан на рисунке 14. Принципиальное отличие двух этапов заключалось в направлении потоков хладагента. Направление потока хладагента изменялось для определения влияния местных гидравлических сопротивлений на тепло-гидравлические параметры системы ГЕТ-250. На графиках также представлены результаты расчетно-теоретических исследований, которые изображены зеленым цветом.

Испаритель представляет собой горизонтальную трубу Ø33,7х3,5 длинной 250м, общей площадью 26,4м^2. Испаритель имеет змеевидный участок общей длиной 100м, позволяющий моделировать потери давления на поворотах при движении хладагента по трубе, также существует возможность изменить направления хладагента по испарителю, что позволяет определить потери давления на змеевике при движении хладагента с различным паросодержанием и различных структурах потока. Схема испарителя представлена на рисунке 13.

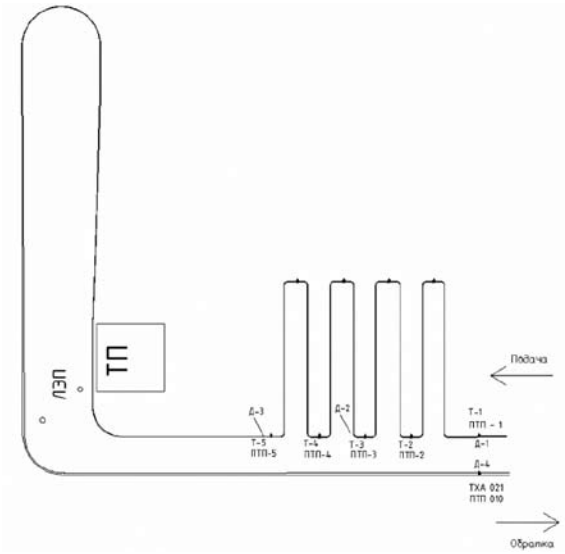


Рисунок 16 - Принципиальная схема (Первый этап) испарителя с расположением измерительных приборов (А-В).

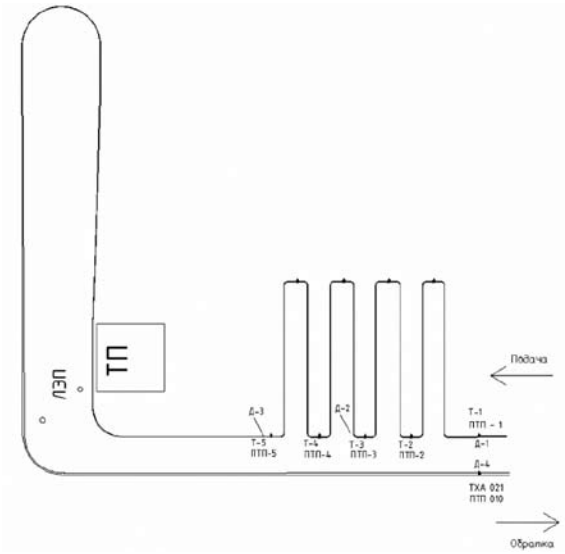


Рисунок 17 - Принципиальная схема (Второй этап) испарителя с расположением измерительных приборов (В-А).

Выводы:

1. Проведение испытаний системы ВЕТ-2 позволило экспериментально убедиться в возможности глубинного промораживания грунтов без использования ТК (рисунок 2), тем самым не внося изменений в общий план строительства.

2. Система ВЕТ-3 способна эффективно работать на глубинах свыше 25 метров (рисунок 4).



Рисунок 18 - Кратность циркуляции в зависимости от тепловой нагрузки на испаритель для двух типов контуров и расчетно-теоретическое значение кратности циркуляции.



Рисунок 19 - Массовое расходное паросодержание в зависимости от тепловой нагрузки на испаритель для двух типов контуров и расчетно-теоретическое значение массового расходного паросодержания.

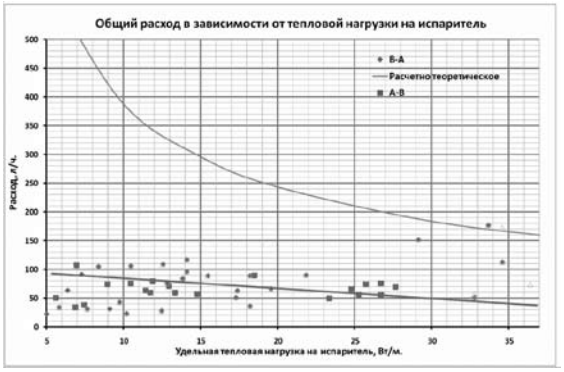


Рисунок 20 - Общий расход в зависимости от тепловой нагрузки на испаритель для двух типов контуров и расчетно-теоретическое значение общего расхода.



Рисунок 21 - Расход конденсата в зависимости от тепловой нагрузки на испаритель для двух типов контуров и расчетно-теоретическое значение расхода конденсата.



Рисунок 22 - Усредненная разница температур между испарителем и БК по давлению конденсации аммиака, в зависимости от тепловой нагрузки на испаритель, для двух типов контуров.

3. Получено соотношение связывающие средние, по длине, температуры вертикальных охлаждающих труб ТОВ-1, ТОВ-2, ТОВ-3.

4. Сравнение двух типов контуров системы ГЕТ-460 длиной 200+260 м и 460 м показало, что расход конденсата у того и другого контура отличается не более 5%. Это приводит к упрощению монтажа системы в полевых условиях.

5. При нагрузке 5,0 Вт/м; 10,0 Вт/м; 14,7 Вт/м; 20 Вт/м расчетные значения расхода конденсата системы ГЕТ-460 близко согласуются с данными эксперимента при обоих типах контуров испарителя. При всех нагрузках экспериментальный общий расход совпадает с теоретическим. Отклонения, потери и погрешности составляют в сумме от 5% до 20% (рисунок 9).

6. Предполагается, что использование 2-х контуров различной длины для системы ГЕТ-460 может влиять на общую работу всей системы. Необходимо продолжить исследование взаимовлияние двух контуров.

7. Место расположения блока местных гидравлических сопротивлений незначительно влияет на тепло-гидравлические параметры работы системы ГЕТ-250. Это обусловлено малой потерей давления при движении хладагента внутри системы, не зависимо от схемы испарителя (А-В и В-А).

8. Определен критический режим работы ГЕТ-250 с высотой блока конденсации 6м: для схемы А-В при нагрузке на испаритель свыше 24,8 Вт/м, а для схемы В-А 21,8 Вт/м. При критическом режиме происходит скачкообразное повышение температуры по длине испарителя, что говорит о выходе установки на критический режим работы.

9. Система способна работать и при малых удельных тепловых нагрузках на испаритель. Максимальные значения кратности циркуляции составляет 330 при нагрузке 0,2 Вт/м.

10. Оптимальная высота расположения блока конденсации (Теплообменного аппарата) исходя из, полученных, закономерностей составляет 4 м.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГРУНТА ПОД РЕЗЕРВУАРОМ С НЕФТЬЮ

К.А.Спасенникова

Институт Криосферы Земли СО РАН, г. Тюмень, e-mail: kspasennikova@gmail.ru

В данной работе приведены результаты, полученные в ходе компьютерного моделирования системы охлаждения резервуара с нефтью объемом 20000м^2, установленного на Ванкорском месторождении. В работе показывается, что результативность работы СОУ зависит не только от усредненных по определенному периоду температуры атмосферы и скорости ветра, но также и от стохастических флуктуаций этих величин.

Для укрепления оснований зданий и сооружений, построенных на вечной мерзлоте, используется метод замораживания грунтов, под этими основаниями. Замораживание грунтов производится либо с помощью холодильных машин, либо с помощью сезонных охлаждающих устройств, не требующих затрат электрической энергии. Использование сезонных охлаждающих устройств (СОУ), не только позволяет экономить электрическую энергию, но и производить охлаждение грунтов в районах, где электричество не доступно, например, на нефтепроводах и газопроводах. Начиная с середины двадцатого века в качестве СОУ используются термосифоны [1], однако в последние годы в строительстве стали применяться более совершенные СОУ, такие как горизонтальная естественно-трубчатая система (ГЕТ), позволяющая замораживать большие площади толщиной два-три метра [2]; система вертикальная естественно трубчатая (ВЕТ) [2], позволяющая замораживать объемы грунта большой площади и толщиной до десяти метров; глубинные СОУ [2], позволяющие замораживать грунт на небольшой площади на глубину до ста метров и т.д. СОУ всегда имеет испаритель и конденсатор. Испаритель представляет собой систему труб, контактирующих с грунтом, конденсатор контактирует с атмосферой и расположен на несколько метров выше испарителя (блок схема СОУ представлена на рисунке 1).

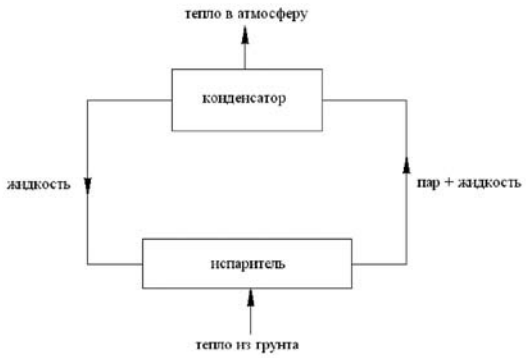


Рисунок 1 - Блок схема СОУ

Когда температура атмосферы становится ниже, чем температура грунта, давление насыщенных паров в конденсаторе падает, вызывая падение давления в испарителе. Поскольку температура в испарителе при этом не меняется, давление там становится ниже давления насыщенных паров, вызывая кипение хладагента и его циркуляцию внутри СОУ. Смесь парообразного и жидкого хладагента поступает в конденсатор. В конденсаторе пар конденсируется, и конденсат вместе с принесенной паром жидкой фазой под действием гравитации стекает в испаритель. Парообразование в испарителе сопровождается оттоком тепла из грунта, а конденсация выделением тепла в конденсаторе с последующим его отводом в атмосферу. В данной работе моделировались процессы тепломассопереноса в грунте, охлаждаемом системами ГЕТ [2] под резервуаром с горячей нефтью.

Рассчитаны температурные поля и динамика работы системы охлаждения резервуара, содержащего нефть при температуре 40°С. Система охлаждения состоит из 10 конденсаторных блоков с площадью оребрения 100м2 каждый, поднятых на высоту 3,83 м относительно труб испарителей. Трубы испарителей покрывают площадь круга с диаметром 46м, расстояние между трубами испарительной системы составляет 0,5м. Диаметр резервуара составляет 40м. Под резервуаром находится гидрофобный слой толщиной 280мм, затем слой песка толщиной 120мм, затем слой пенополэкса толщиной 450мм. Климатические данные взяты по Ванкору (метеостанция расположена на Советской Речке). Вычисление проводилось для среднесуточных значений температуры и скорости ветра. Расчет проводился с начала сентября 2009г. по конец августа 2010г., начальная температура грунта принималась равной 1°С. Для расчета тепломассопереноса в грунте применялся метод эффективной теплоемкости [3], в рамках которого уравнение теплопроводности записывается в виде

$$\left[c + L\delta(T - T_f)\right]\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \quad (1)$$

где с- объемная теплоемкость грунта,
λ- коэффициент теплопроводности грунта,
Т- температура,
T_f- температура фазового перехода,
x, y, z –декартовы координаты,

t- время,

$\delta(T-T_f)$- дельта функция Дирака,

L- задается следующим выражением:

$$L = r\cdot(w - w_{НЕ})\gamma_{СК} \quad (2)$$

где r-удельная теплота плавления льда, w-влажность грунта, $w_{нв}$ - влажность незамерзшей воды, $\gamma_{СК}$ - объемная плотность скелета.

Расчетная область изображена на рисунках 2,3,4.

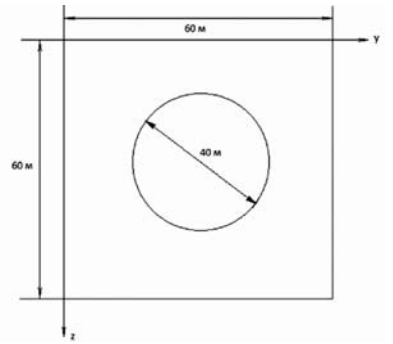


Рисунок 2 - Расчетная область

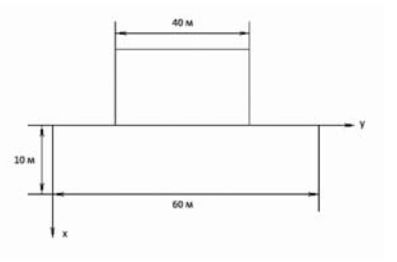


Рисунок 3 - Расчетная область

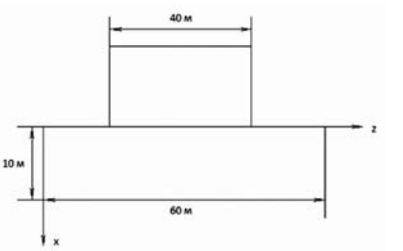


Рисунок 4 - Расчетная область

Сетка пространственных координат в расчетной области задается следующими выражениями

$x_i = i\cdot h_x$

$y_j = j \cdot h_y$

$z_k = k \cdot h_z$

$t_n = \tau \cdot n$ $\tau = 0.01$ сут.

Трубы испарительной системы расположены параллельно оси z. Разностная схема, соответствующая уравнению (1) записывается в следующем виде

$$T(i,j,k,n+1) = T(i,j,k,n) + \frac{a(i,j,k)\cdot\tau\cdot(T(i+1,j,k,n)+T(i-1,k,n)-2T(i,j,k,n)}{h_x^2} + \frac{a(i,j,k)\cdot\tau\cdot(T(i,j+1,k,n)+T(i,j-1,k,n)-2T(i,j,k,n)}{h_y^2} + \frac{a(i,j,k)\cdot\tau\cdot(T(i,j,k+1,n)+T(i,j,k-1,n)-2T(i,j,k,n)}{h_z^2} \quad (3)$$

Где a(i,j,k) - определяется следующими выражениями

$$a(i,j,k) = \begin{cases} a_M & \mathrm{T(i,j,k,n)} < T_f - \Delta \\ \dfrac{0.5(\lambda_M + \lambda_T)}{0.5(c_M + c_T) + \dfrac{L}{2\Delta}} & T_f - \Delta \le \mathrm{T(i,j,k,n)} \le T_f + \Delta \\ a_т & \mathrm{T(i,j,k,n)} > T_f + \Delta \end{cases}$$

Здесь $a_т$, $a_м$- температуропроводности талого и мерзлого грунта соответственно,

$\lambda_м$, $\lambda_т$ - коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта,

$c_м$,$c_т$ - удельные теплоемкости талого и мерзлого грунта.

Величина Δ определяет в методе эффективной теплоемкости (Самарский) диапазон температур при которых идет фазовый переход, а именно T_f-Δ< T(i,j,k,n)<T_f+ Δ. При расчете a(i,j,k) , дельта функция Дирака в выражении (1) заменена на функцию $f(T-T_f)$, задающуюся следующими выражениями [3]

$$f(T-T_f) = \begin{cases} 0 & |T-T_f| > \Delta \\ \dfrac{1}{2\Delta} & |T-T_f| \le \Delta \end{cases}$$

На боковых поверхностях расчетной области, принималось граничное условие второго рода с тепловым потоком равным нулю. На нижней границе расчетной области принималось граничное условие первого рода с температурой равной начальной температуре, на верхней границе расчетной области принималось граничное условие третьего рода, причем в той части, которая находится под резервуаром, учитывался теплообмен с резервуаром, в оставшейся части границы расчетной области учитывался теплообмен с атмосферой.

Вывод: Из таблицы №1 видно, что охлаждающая система работает в течение зимнего сезона не всегда. Так из 219 дней с отрицательной температурой 71 день система не работала, данный эффект связан с разной скоростью изменения температуры в атмосфере и грунте, так если в некоторый момент времени температура в атмосфере поднимется, оставаясь при этом отрицательной,

и станет больше, чем температура в грунте, охлаждающая система выключается, и включается только после того, как температура атмосферы снова станет меньше, чем температура грунта. Из расчетов видно, что продолжительность времени, когда система не работает составляет 32% от общей продолжительности зимнего сезона, а это в свою очередь означает, что данный эффект необходимо учитывать при проектировании охлаждающих систем.

Таблица 1 - Результат по суткам.

	Температура атмосферы ($^{\circ}C$)	Температура испарителей ($^{\circ}C$) (средняя)	Температура конденсаторов ($^{\circ}C$)	Температура под пенополэксом ($^{\circ}C$)	Количество суток в рассматриваемом периоде	Количество суток когда температура отрицательна, а СОУ не работает	Количество суток когда температура отрицательна	Мощность всей системы охлаждения (Квт)
конец ноября 2009	-31.6	-16.93	-18.01	1.73	91	0.5	48	109.19
конец декабря 2009	-45.5	-25.1	-26.19	0.52	122	1.5	79	114.3
конец января 2010	-35.6	-25.1	-26.18	-13.46	153	6.5	110	81.67
конец февраля 2010	-37.7	-27.06	-28.14	-19.36	181	7.5	138	56.57
конец марта 2010	-6.8	не работает	не работает	-12.74	212	28.7	169	не работает
конец апреля 2010	-3.1	не работает	не работает	-6.91	242	47.7	195	не работает
конец мая 2010	1.7	не работает	не работает	-1.98	273	70.7	219	не работает
конец июня 2010	6.8	не работает	не работает	0.01	303	70.7	219	не работает
конец июля 2010	15.5	не работает	не работает	0.2	334	70.7	219	не работает
конец августа 2010	6.1	не работает	не работает	0.33	365	70.7	219	не работает

Список литературы.

1. И.Л. Пиоро , Ф.А. Антоненко, Л.С. Пиоро. Эффективные теплообменники на основе двухфазных термосифонов. Киев, Наукова думка, 1991г., 222с.

2. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений. Международная конференция « Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения», г. Тюмень,2008г., ст.34-39.

3. А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. Вычислительная теплопередача. Москва, Едиториал УРСС, 2003г., 784с.

ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИНФРАКРАСНАЯ ДИАГНОСТИКА СИСТЕМ ТСГ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

С.Н. Стрижков, А.С. Загребнев

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г.Тюмень, e-mail: nauka-fsa@mail.ru

В статье описаны результаты тепловизионной диагностики систем температурной стабилизации в условиях опытно-экспериментального полигона и в трассовых условиях на Ванкорском месторождении. Приведены примеры термограмм сезонно-охлаждающих устройств различных производителей и конструкций. Приведены выводы и рекомендации по тепловзионной диагностике СОУ.

В России общая площадь районов распространения вечной мерзлоты равна ~10,7 млн. км2, что



Термограммы авторов статьи Стрижкова С.Н. и Загребнева А.С.

составляет около 63% территории страны. В районах распространения вечной мерзлоты на территории РФ сосредоточено более 80% разведанных запасов нефти, около 70% - природного газа, огромные залежи каменного угля и торфа, создана разветвленная инфраструктура объектов ТЭК. Исследования показали, что при оттаивании мерзлых грунтов изменяются их физико-механические свойства (объемный вес, влажность, пористость, адгезия к сваям-основаниям), что, в конечном счете, уменьшает несущую способность фундаментов, приводя к повреждению построенных на них сооружений. Поэтому, одной из главных составляющих успешного проектирования оснований и фундаментов является разработка и промышленное применение новых экономичных и надежных технических решений по замораживанию, температурной стабилизации и управлению температурным режимом грунтов оснований с помощью естественного и искусственного холода; использование программ автоматизированного расчета теплового взаимодействия грунтов оснований с системами замораживания, а также зданиями и сооружениями.

НПО “Фундаментстройаркос” созданы эффективные, надежные и экономичные устройства, обеспечивающие устойчивость мерзлого состояния грунтов за счет использования ресурсов естественного холода: горизонтальные трубчатые системы замораживания и температурной стабилизации грунтов -тип “ГЕТ”, вертикальные трубчатые системы замораживания - тип “ВЕТ”, индивидуальные сезоннодействующие охлаждающие устройства - “СОУ- термостабилизаторы” и ряд других. Использование этих разработок позволяет с наименьшими капиталовложениями на стадии нулевого цикла выполнить фундаменты различных зданий и сооружений и в последующем снизить затраты на их эксплуатацию в экстремальных, с точки зрения геокриологии, природно-климатических условиях Крайнего Севера и восточной части России в целом.

Срок службы систем ТСГ соответствует сроку службы сооружения, при правильной эксплуатации и многоуровневом контроле качества и работоспособности систем ТСГ. Первый уровень представляет собой контроль качества систем ТСГ во время их производства который осуществляет отдел ОТК. При этом постоянно применяются меры для улучшения и модернизации, как технологии изготовления систем ТСГ так и методов контроля качества выпускаемых систем. Как показывает практика, что будет отражено ниже, одним из важных вопросов в работе индивидуального термостабилизатора является качество заправки хладагентом. Учитывая, что за месяц ООО НПО «Фундаментстройаркос» может выпускать 1500 индивидуальных СОУ, поднимается вопрос о необходимости контроля качества заправки выпускаемых термостабилизаторов. Для этого было предложено произвести модернизацию программного обеспечения ведущего контроль заправки хладагентом термостабилизатора, а именно производить все необходимые замеры и расчеты для оценки критериев годности заправки индивидуального термостабилизатора. В процессе разработки программного обеспечения встал вопрос о необходимости изучения физических процессов протекающих на посту заправки индивидуальных термостабилизаторов (рисунок 1). Для этого было произведено тепловизионное исследование поста заправки (рисунок 2). На данный момент индивидуальные термостабилизаторы заправляются в автоматическом режиме. Разработанное программное обеспечение позволяет вести 100% компьютерный контроль качества заправки.

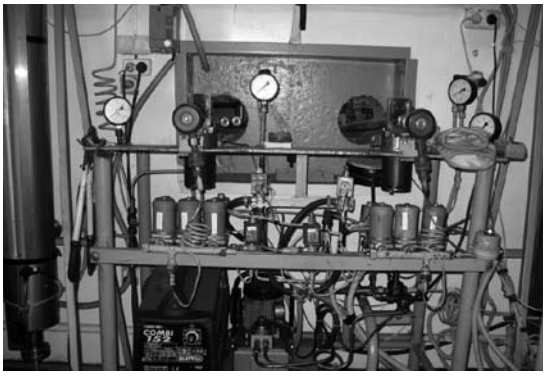


Рисунок 1 - Пост для заправки индивидуальных термостабилизаторов.

Следующим этапом контроля качества являются выборочные испытания индивидуальных термостабилизаторов в холодильной камере. Во время этих испытаний конденсаторная часть индивидуального термостабилизатора помещается в холодильную камеру, в результате чего происходит запуск термостабилизатора в работу. После выхода стабилизатора на стационарный режим работы производится замер температур оребренной поверхности конденсаторной части ТК. Критерием работоспособности считается градиент температур на поверхности оребрения, который не должен превышать 1 ˚С. Для повышения эффективности контроля качества было предложено производить тепловизионную съемку конденсаторной части индивидуальных СОУ в момент проведения испытания (рисунок 3). Испытания проводились в холодильной камере научно-исследовательского отдела, что дало возможность испытывать термоколонки в вертикальном положении, тогда как обычно угол наклона равняется 10˚. В результате была получена полная картина температурного поля на поверхности конденсаторной части. Полученные термограммы позволяют судить о качестве заправки по состоянию однородности температурного поля на поверхности конденсатора (перепад температур между верней и нижней частью не должен превышать 1 ˚С)

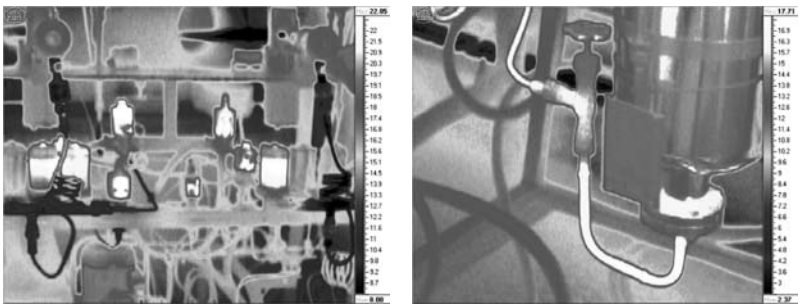


Рисунок 2 - Термограммы процесса заправки индивидуальных термостабилизаторов.

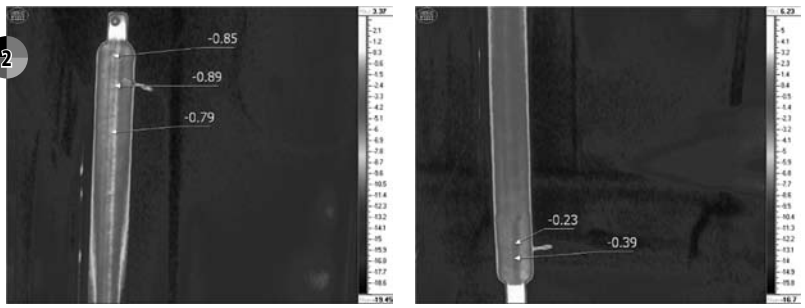


Рисунок 3 – Термограммы верхней (слева) и нижней (справа) конденсаторной части ТК 32/12 А.

Следующим этапом контроля работоспособности систем ТСГ является их диагностика, которая осуществляется в рамках авторского надзора специалистами НПО «Фундаментстройаркос» или прошедшими соответствующее обучение представителями заказчика. Традиционно контроль работы систем включает: внешний осмотр надземной части, контроль герметичности наружной части, измерение температур наружной части систем контактным способом либо при помощи пирометра, измерение температур грунта. Внешний осмотр систем ТСГ производится один раз в квартал. Он включает визуальный осмотр сварных швов, вентилей, состояния сохранности лакокрасочного покрытия и оребрения на отсутствие повреждений и утечек хладагента. Утечки хладагента определяются по запаху аммиака, изменению цвета лакокрасочного покрытия(в месте утечки образуется ржавое пятно) и шипящему звуку выхода газа. В зимнее время года при температуре воздуха ниже минус 15 °С на оребренной поверхности надземной части систем должен отсутствовать иней. Наличие инея на оребренной поверхности указывает на отсутствия хладагента. Измерение температур наружной части производится два раза в год: в начале зимнего периода (ноябрь) и в конце зимнего периода (март) при температуре наружного воздуха не выше минус 15 ° С. Измерение температур СОУ производится на оребрение при помощи: переносных пирометров, поверхностных датчиков температур, которые размещаются плотно между оребрением (рисунок 4). Признаком проектной работоспособности СОУ является разность температур между температурой наружной стенки СОУ и наружного воздуха в пределах 2-9 °С. В случае если разность температур между температурой оребрения СОУ и наружного воздуха составляет не более 1 °С, то это свидетельствует о том, что система ТСГ выключена из работы, в связи с высокой температурой воздуха (малым температурным напором – градиентом) или отсутствием хладагента. Замер температур грунтов производится не реже одного раза за полугодие путём установки в термометрические скважины термодатчиков в виде термокосс с пределом точности измерения или погрешностью измерения 0,1 ° С. Измерения температур производиться с шагом 1 метр по высоте или глубине в термометрической скважины. По результатам измерений строятся таблицы, графики и изоплеты и все это называется геотехнический мониторингом. Затем дается заклю-

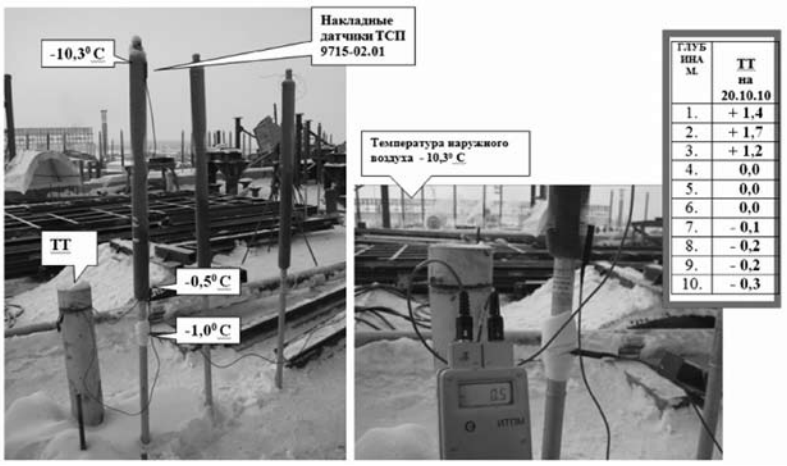


Рисунок 4 - Диагностика индивидуальных сезонно-действующих охлаждающих устройств традиционными контактным методом.

чение о работоспособности системы.

Описанная выше схема проведения геотехнического мониторинга позволяет достаточно достоверно и очень точно определить состояние систем и грунтов на момент проведения мониторинга. Тем не менее, у неё есть по крайней мере два недостатка. Во-первых, необходимость проведения контактных измерений, что не всегда представляется возможным. Во-вторых, большая трудоемкость работ которые необходимо произвести в трассовых условиях при низких отрицательных температурах достигающих 40 ° С и высоких скоростях ветра, что тем более важно в условиях постоянного роста количества эксплуатируемых систем (рисунок 5).

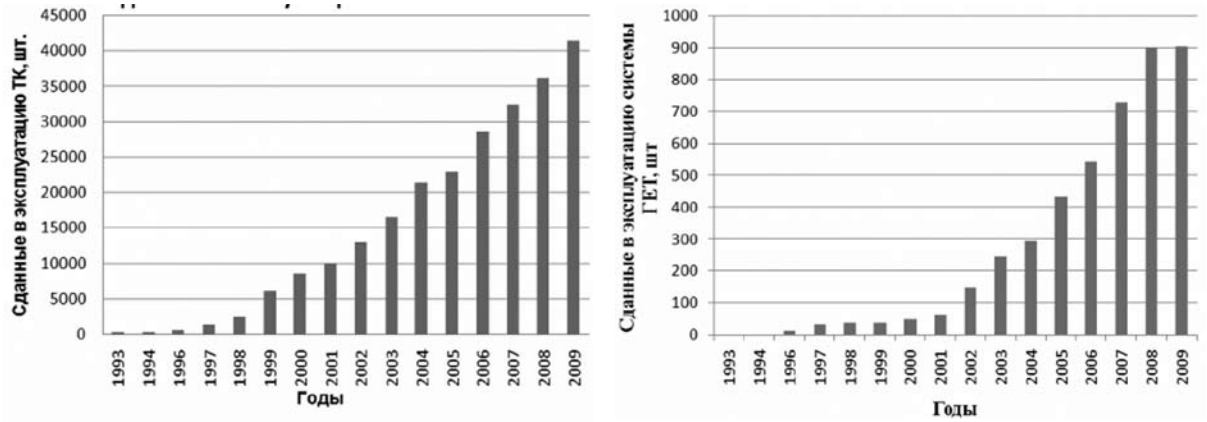


Рисунок 5 - Рост количества индивидуальных термостабилизаторов и систем ГЕТ сданных в эксплуатацию с 1993 по 2009 гг.



Рисунок 6 - Классификация инфракрасной измерительной техники

Для существенного повышения эффективности работ по проведению диагностики систем ТСГ необходимо было провести комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по поиску нового способа определения их работоспособности, уменьшающего и как следствие резко снижающего стоимость, трудоемкость процесса и увеличивающий информативность. Для этого был проведен анализ современного состояния и перспективные направления исследования в области современных методов неразрушающего контроля применяемых в энергетике, современной медицине, металлургии, машиностроении и строительстве. В настоящее время при анализе теплового состояния теплообменного оборудования и техническом освидетельствовании строительных конструкций, различных систем и установок в энергетике и машиностроении все шире используются такой метод неразрушающего контроля, как инфракрасная диагностика (ИК-диагностика). Классификация ИК-техники и области её применения в НПО «Фундаментстройаркос» представлена на рисунках 6, 7 и 8.

В связи с выше изложенным, в НПО «Фундаментстройаркос» было принято решение о проведении поисковых опытно-промышленных работ и исследованиях в области использовании инфракрасной техники при обследовании и диагностике систем температурной стабилизации грунта (ТСГ). Авторами были сформулированы основные требования к компьютерному тепловизионному комплексу ИРТИС-2000 (рисунок 9), который возможно было бы использовать в промышленных масштабах и условиях строительной площадки при низких температурах воздуха (до - 40°С). Первые промышленные испытания комплекса были проведены на опытно-экспериментальном полигоне в Тюмени в декабре 2010 г., на площадке которого представлены все виды систем ТСГ производства ООО НПО «Фундаментстройаркос».

На полигоне представлены более 20 опытных экспериментальных установок – систем, узлов,

деталей или фрагментов систем, моделирующих теплофизические и гидравлические процессы в натурных условиях: индивидуальные термостабилизаторы с различными конструктивными ис-

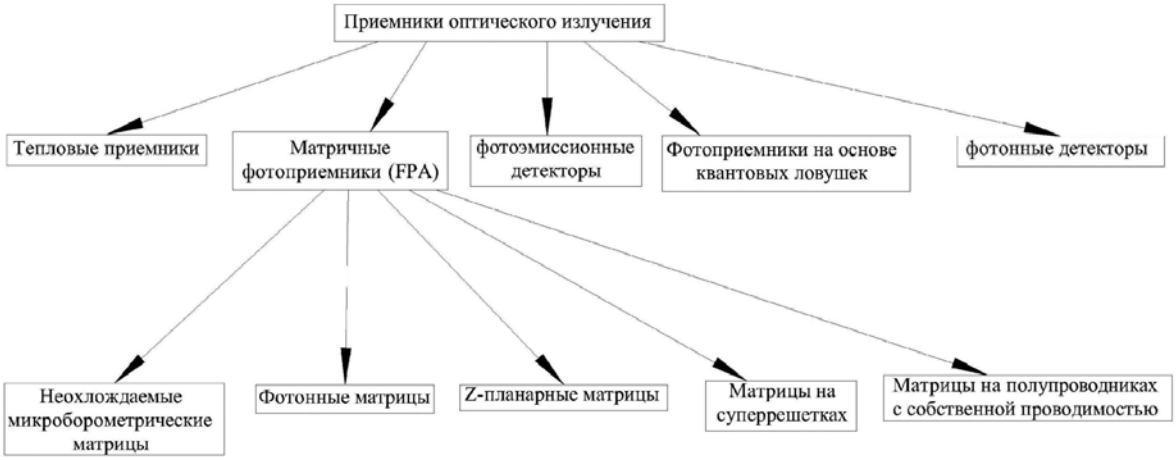


Рисунок – 7 Блок-схема классификации приемников оптического излучения

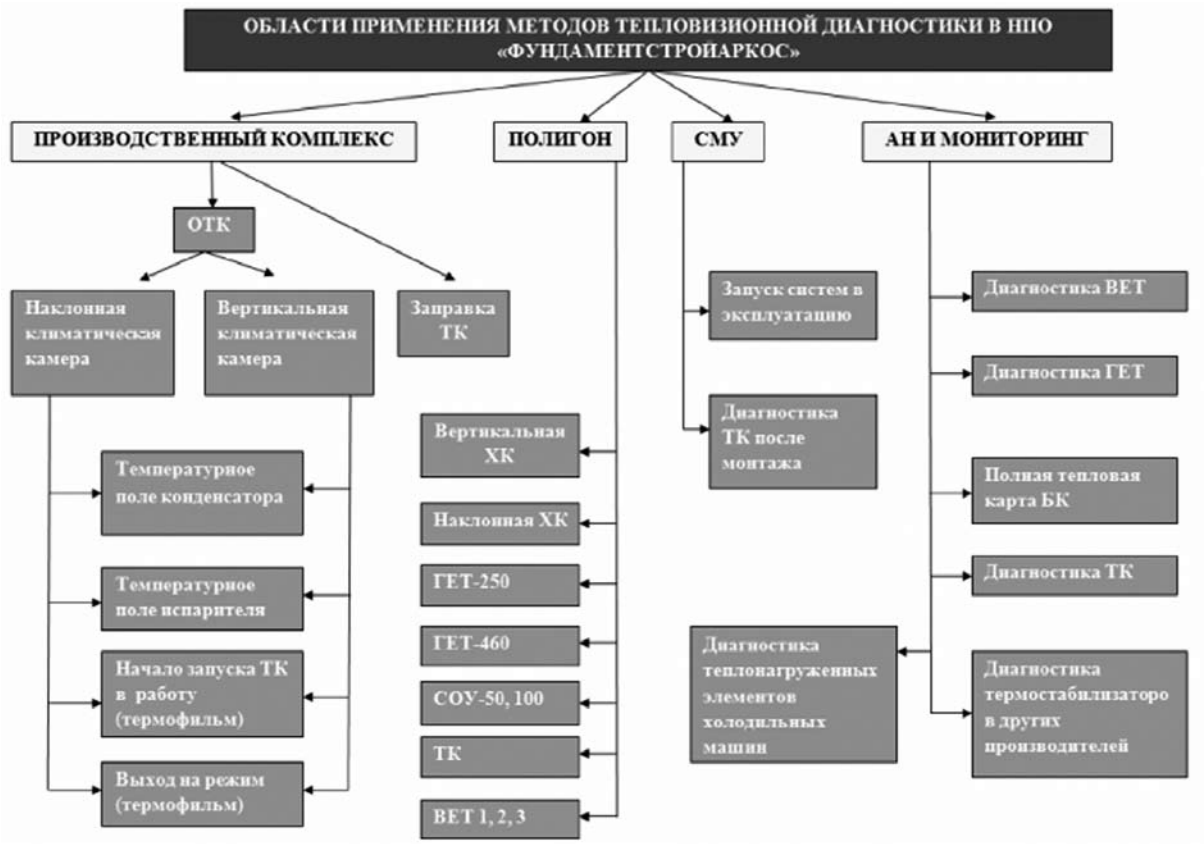


Рисунок – 8 Области применения ИК-диагностики в НПО «Фундаментсройаркос»

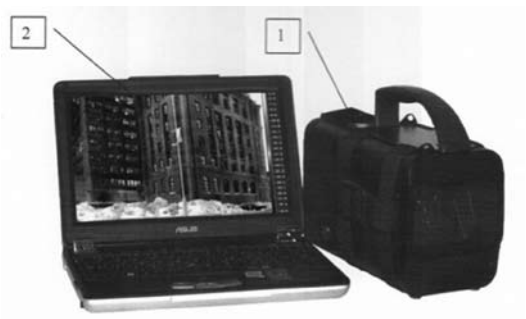


Рисунок 9 – Программный комплекс тепловизор-термограф «ИРТИС-2000». 1 – ИК-камера ИРТИС-2000; 2 –процессорный блок на базе Notebook

полнениями и типами хладагента; глубинные СОУ глубиной 100 и 50 метров; система ГЕТ-460 с длиной ипарительной части до 460 м; система ВЕТ-1, включает в себя 24 параллельно соединенных грунтовых теплообменника глубиной 10 м; система ВЕТ-2, включает в себя 24 последовательно соединенных грунтовых теплообменника глубиной 10 м; система ВЕТ-3 (ТОВ-25), включающая в себя три ТОВ глубиной 25 метров. Изначально и традиционно как и в условиях трассы на севере исследование систем термостабилизации в условиях полигона проводились контактными теплофизическими измерениями и мероприятиями инженерно-геокриологического мониторинга, который, в частности, включает в себя:

- наблюдение за температурами грунтов оснований;
- измерение температур на элементах конденсаторной части устройств;
- измерение температур окружающего воздуха;
- визуальный контроль работоспособности устройств;
- измерение скорости ветра - для оценки процессов теплообмена между устройствами и окружающим воздухом.

Задача наблюдений – в процессе мониторинга оценить и спрогнозировать температурное состояние наблюдаемого грунтового основания и дать заключение о работоспособности систем термостабилизации. В программах FROST-DK, Thermostab, MathCAD, одновременно с проведением геомониторинга осуществляется численное моделирование теплофизических процессов протекающих в грунте, с целью сравнения расчетных данных с экспериментальными. Данные полученные в ходе эксперимента оформляются в виде отчета.

Но существующие методы контроля работоспособности, как было сказано выше, имеют некоторые ограничения в применимости к отдельным видам систем термостабилизации. В частности, речь идет об индивидуальных термостабилизаторах. В условиях полигона для каждого термостабилизатора установлена термометрическая труба (ТТ), при помощи которой ведется мониторинг состояния грунтов, а также к каждой экспериментальной установке есть прямой доступ для контактного измерения температуры на конденсаторной части термостабилизатора. Данные условия позволяют составить более полную картину о работоспособности индивидуальных ТК.

Однако, на объектах, где число термостабилизаторов весьма значительно, такой метод контроля не применим: нет технической возможности устанавливать ТТ для каждой ТК. Поэтому на один объект, где может быть установлено несколько сотен ТК, устанавливается всего несколько ТТ, что естественно не дает возможности судить о работоспособности всех ТК. Измерение контактным методом температуры конденсаторных частей термостабилизаторов также не целесообразно, т. к. занимает значительное время в связи с огромным количеством установленных термостабилизаторов (по данным на 2010 г. сдано в эксплуатацию 103071 индивидуальных термостабилизаторов) количество которых постоянно растет.

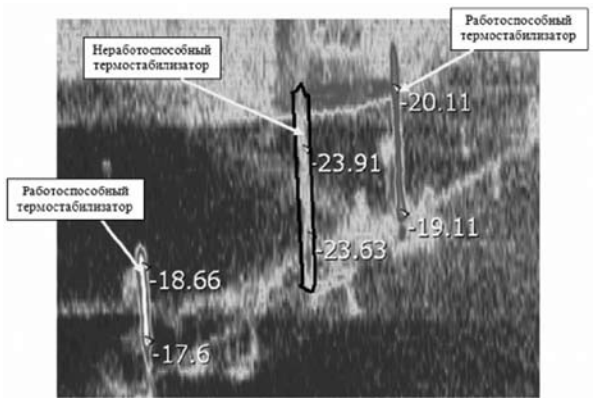


Рисунок 10 – Термограмма термостабилизаторов на испытательном полигоне НИО, температура воздуха минус 24°С

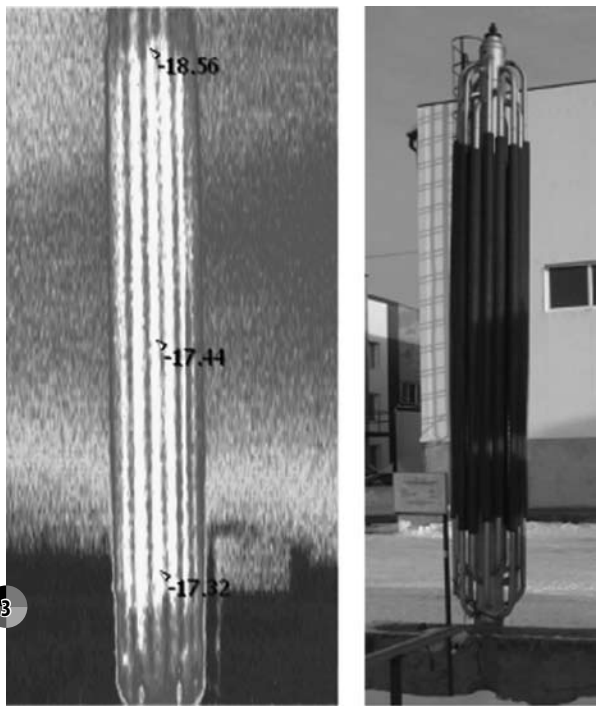


Рисунок 11 – Термограмма распределения температур по длине конденсатора на СОУ-100, температура воздуха минус 29°С

На полигоне в процессе испытаний тепловизионного комплекса ИРТИС-2000 проводилась ИК-съемка индивидуальных термостабилизаторов, конденсаторных частей СОУ и конденсаторного блока системы ВЕТ-3. Далее приведены термограммы исследуемых узлов и элементов различных экспериментальных установок (рисунки 10-12).

На термограмме (рисунок 10) четко видно, какие термостабилизаторы работают в штатном, проектном нормальном режиме, а какие неработоспособны. На термоснимках проходит явно видимая граница раздела температурных полей - температура на поверхности оребренной части работоспособных термостабилизаторов выше температуры окружающего воздуха на величину $\Delta t \approx 2$ °С и больше. В то время как у неработоспособного термостабилизатора температура на поверхности конденсаторной части практически не отличается от температуры наружного воздуха. Этот критерий и был взят нами за основу при определении работоспособности СОУ.

В процессе промышленных испытаний тепловизора нами был выявлен ряд преимуществ, которые позволяют утверждать, что тепловизионная диагностика – самый современный и экономичный метод диагностики систем термостабилизации:

- дистанционность: во время тепловизионной диагностики одновременно можно снимать несколько термостабилизаторов ТК, блоков конденсации БК, производить панорамные те-

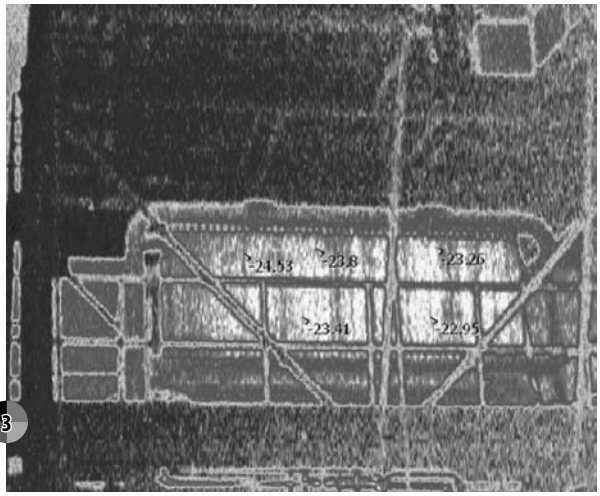


Рисунок 12 – Термограмма распределения температур на блоке конденсации системы ТОВ-25, температура воздуха минус 29ºС

пловизионные снимки значительных по размерам объектов, в том числе в труднодоступных и малопроходимых местах.

- информативность: тепловизор дает возможность получать полную картину тепловых полей на исследуемых объектах, что позволяет нам с достаточной точностью судить о работоспособности системы. Программный комплекс IRPreview позволяет получить температуру в любой точке термограммы и строить термопрофили и гистограммы.

- точность: точность тепловизора-термографа составляет 0,05ºС, что позволяет более качественно оценить изменение температуры по длине конденсаторной части.

- высокая производительность и экономия времени: нет необходимости обходить каждую ТК, которые зачастую находятся в труднодоступных местах, и измерять температуру конденсаторной части, что значительно экономит время.

Еще одно существенное преимущество тепловизионной съемки то, что при использовании тепловизора нет необходимости вмешиваться в систему, т. к. тепловизионная съемка относится к неразрушающим бесконтактным методам контроля и производиться без непосредственного контакта с исследуемым объектом.

Пакет программного обеспечения IRPreview позволяет проводить следующие математические обработки:

- измерение температуры в нескольких точках или областях;
- сглаживание, контрастирование, нормализация полученного изображения;
- построение термопрофиля вдоль прямой, направленной под любым углом;
- выбор различных цветовых палитр;
- построение графика изменения температуры в точке в зависимости от времени (для фильма);
- монтаж изображения;
- создание базы данных из записанных файлов (управление программой осуществляется нажатием левой кнопки мыши, активизируя соответствующие позиции на панели управления).

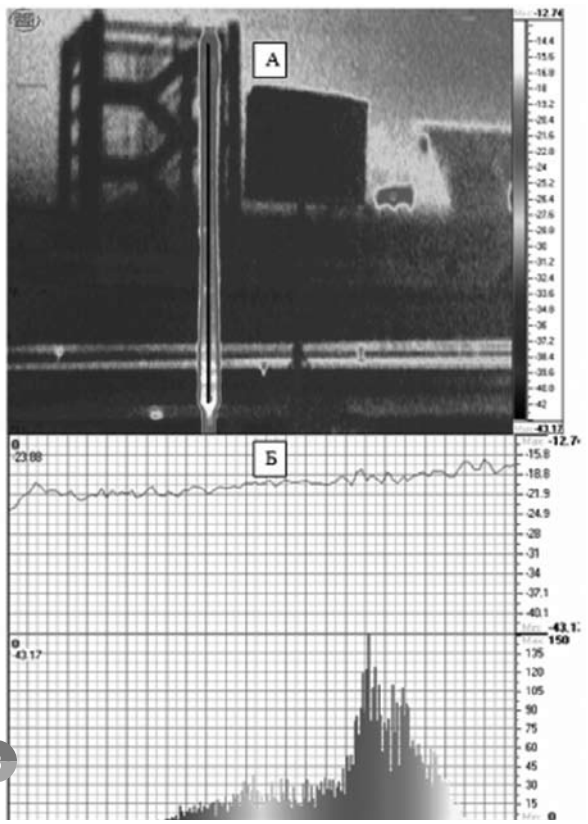


Рисунок 13 –Термопрофиль и гистограмма между точками А и Б. ТК 32/10 А на полигоне НИО в п. Матмасы г. Тюмень.

Возможности программного комплекса IRPreview представлены на рисунке 13.

В целях повышения качества и информативности тепловизионной диагностики данный вид работ должен проводиться в следующем порядке:

- тепловизор устанавливают на выбранном месте, включают, настраивают и проводят съемку в соответствии с инструкцией по его эксплуатации;

- в районе каждого объекта тепловизионной съемки производится замер температуры наружного воздуха (эти данные также могут быть получены с метеостанции);

- производится замер температур грунта в термометрических скважинах, установленных на данном объекте;

- полученные сведения, необходимые для дальнейшей обработки термограмм, записываются в журнал, а в дальнейшем заносятся в компьютерный банк данных;

- в дальнейшем в камеральных условиях проводится комплексная обработка полученных термоснимков, фотоснимков и дополнительных сведений с использованием программного комплекса.

По результатам испытаний компьютерного тепловизионного комплекса нами были предложены правила и рекомендации для проведения тепловизионной диагностики:

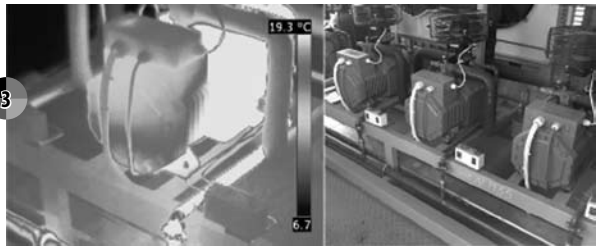


Рисунок 14 – Термограмма и фотография холодильной машины Bitzer



Рисунок 15 – Термограмма компрессорно-конденсаторного агрегата ПМ-40

- инфракрасную съемку следует дополнять визуальным осмотром или фотографированием;

- оценку тепловых аномалий следует производить как по температурному перепаду в зоне аномалии, так и путем сравнения с эталонной зоной. Эталонная зона должна выбираться аналогично контролируемой и находиться в тех же условиях теплообмена (располагаться вблизи исследуемой зоны);

- поверхности, визируемые под большим углом, кажутся холоднее. При съемке под большим углом удаленные объекты кажутся холоднее тех, которые находятся ближе. На больших расстояниях объекты контроля кажутся более холодными за счет поглощения в атмосфере.

На основании полученного в ходе испытаний опыта, нами был разработан нормативный документ: «Методические указания по диагностике работоспособности систем и устройств термостабилизации грунтов». В данных методических указаниях четко отражены порядок работ по тепловизионной диагностике, даны требования, предъявляемые к персоналу и приборному обеспечению данного вида работ, а также ссылки на нормативные документы и техническую литературу.

Также во время проведения испытаний ГЕТ-250 и ВЕТ-1 был получен опыт диагностики холодильных машин различных конструкций. Так на системе ГЕТ-250 используется фреоновая холодильная машина Bitzer. В ходе проведения испытаний системы компрессор работал при разных нагрузках. Примеры термограмм представлены на рисунке 14.

Целью испытания системы ВЕТ-1 было выявление возможности термостабилизации грунта с использованием передвижной холодильной машины. В холодильной машине применяется компрессорно-конденсаторный агрегат без смазки ПМ-40. В момент проведения эксперимента необходимо было проводить диагностику теплонагруженных элементов данного компрессора. Для этого использовался тепловизор flir B335. Термограммы работающего компрессора приведены на рисунке 15.

В будущем опыт диагностики работы холодильных машин с использованием тепловизора с успехом можно будет применять для контроля работы холодильных агрегатов непосредственно на реальных объектах.

Таким образом, можно утверждать, что в настоящее тепловизионная диагностика является самым современным, более эффективным и менее трудоемким методом диагностики работоспособности систем термостабилизации.

Тепловизор позволяет получить тепловое изображение тепловых полей оребренной поверхности термостабилизатора или конденсаторного блока, подведенных к нему труб с теплоносителем, других промышленных и бытовых объектов, воздушной среды, поверхности грунтов. Затем, проанализировав изображение на компьютере, принять научно-обоснованное экспертное заключение о работоспособности системы термостабилизации мерзлых грунтов и необходимости проведения корректирующих действий. А после выполнения необходимых работ по повышению работоспособности повторно снять термограмму исследуемого объекта и проверить качество выполненных работ.



Рисунок 16 - Программа и объемы выполненных работ на Ванкорском месторождении.

Методика тепловизионной диагностики была впервые внедрена в промышленных масштабах при обследовании систем термостабилизации на Ванкорском месторождении, проведенного инженерами научной части в рамках

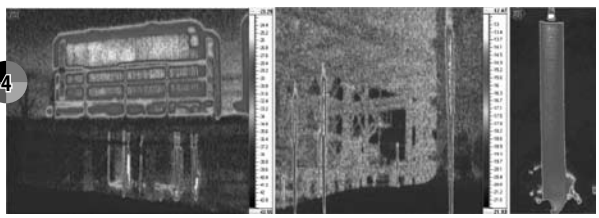


Рисунок 17 – Термограммы, полученные при проведении тепловизионной диагностики на Ванкорском месторождении



Рисунок 18 - Термограммы частично работающих термостабилизаторов А – ТК Фундаментстройаркос; Б- СПМГ Фундаментпроект; В – ОГН Фундаментпроект.



Рисунок 19 - График распределения температур в системе Грунт-ГЕТ-Воздух (ЦПС. РВС 2000 Т-4310 А). Обследовано 2 системы. Рабочих – 2

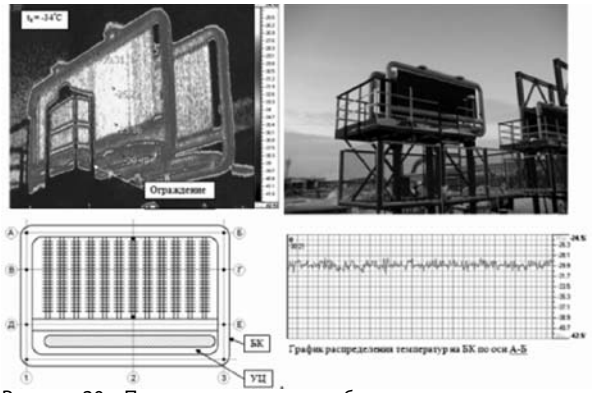


Рисунок 20 – Полная тепловая карта блока конденсации (начало)

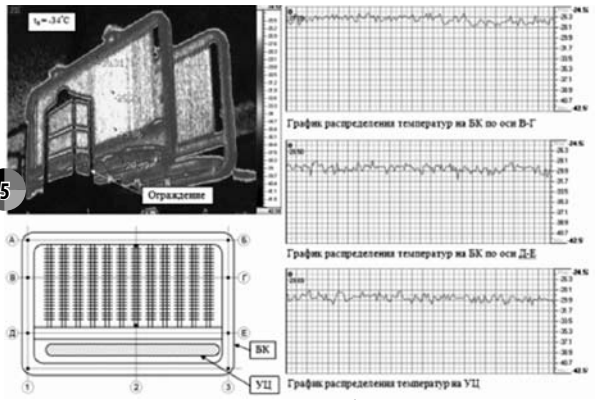


Рисунок 21 – Полная тепловая карта блока конденсации (продолжение)

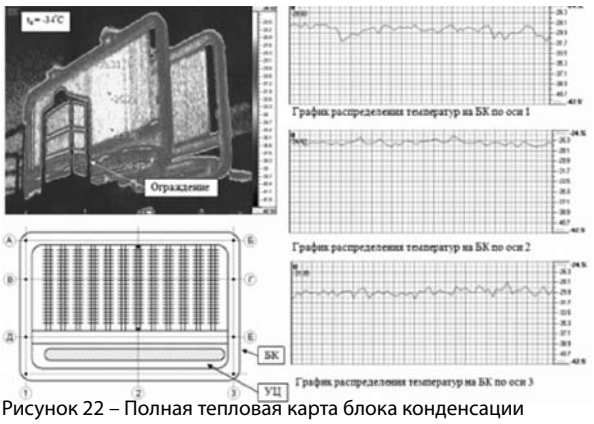


Рисунок 22 – Полная тепловая карта блока конденсации (окончание)

работ по авторскому надзору в феврале 2011 г.

Специалистами научной части ООО НПО «Фундаментстройаркос» в рамках авторского надзора на Ванкорском месторождении была проведена тепловизионная диагностика систем температурной стабилизации (СТС). В результате было обследовано 264 системы ГЕТ, 4 системы ВЕТ, 216 ТК производства ООО «Фундаментстройаркос» и 446 СПМГ производства ОАО «Фундаментпроект». На рисунке 16 приведена программа тепловизионной диагностики.

При выполнении работ по тепловизионному обследованию использовались приборы: портативный компьютерный термограф ИРТИС-2000, программный комплекс IRPreview, измеритель температуры ИТПМ (для измерения температуры контактным способом). Одновременно с проведением тепловизионной съемки велись замеры температуры наружного воздуха, а также велась фотофиксация объекта с той же точки, где был установлен тепловизор.

Основным достоинством ИК-диагностики по сравнению с контактными методами измерения температуры СТС является возможность получить полную картину распределения температур на конденсаторной части (рисунок 17). В совокупности с данными геокриологического мониторинга грунтов мы получаем довольно полную картину распределения температур в системе грунт-СОУ-воздух (рисунок 19, 20, 21, 23) и произвести анализ работоспособности СОУ, на основании которого принять решение о необходимости проведения корректирующих действий.

Главное преимущество тепловизионной диагностики перед обследованием традиционными методами геокриологического мониторинга проявляется при обследовании индивидуальных СОУ. Связано это с тем, что для корректного анализа необходимо устанавливать термометрическую трубу для каждого термостабилизатора в отдельности, что технически и экономически нецелесообразно. Таким образом, единственным способом определить работоспособность индивидуального СОУ является проведение замеров температуры на конденсаторной части. Однако проведение замеров температуры контактными методами или при помощи пирометра сотен, а иногда и тысяч термостабилизаторов осуществить практически невозможно, особенно на линейно-протяженных объектах (нефте- и газопроводы, дороги и т.д.). Проведение тепловизионной съемки существенно упрощает эту задачу, так как возможна съемка одновременно 10-20 термостабилизаторов. ИК-съемка помимо значительного уменьшения времени проведения работ позволяет получить полную картину распределения температуры по длине термостабилизатора.

Также необходимо отметить, что на тепловизионных снимках видны характерные линии раздела температурных полей (рисунок 18). При этом некоторая часть оребрения имеет температуру на поверхности выше, чем температура окружающей среды на величину $\Delta t \approx 2^{\circ}C$ и более,

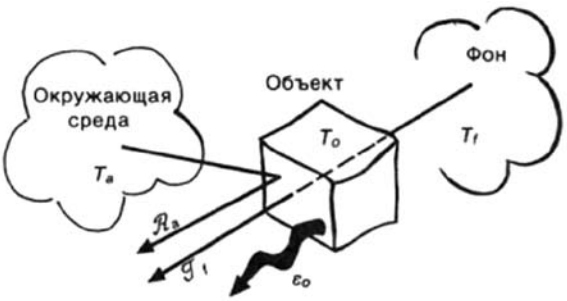


Рисунок 23 - Составляющие теплового излучения объекта

в то время как другая часть оребрения имеет цвет и температуру близкую к температуре окружающей среды. Линия раздела температурных полей на поверхности конденсаторной части говорит о частичной работоспособности термостабилизатора (разница температур между верхней и нижней частью Δt больше 1 ºС). Программный комплекс IRPreview позволяет обрабатывать тепловизионный снимок и получать на цветных термограммах распределение температурных полей. Кроме того, имеется возможность просканировать и получить температуру в любой точке теплового поля.

Помимо неоспоримых преимуществ есть у ИК-диагностики и некоторые недостатки. Во-первых, высокая чувствительность к погодным условиям, связанная с отражательной способностью объектов. Так съемку можно проводить только в темное время суток или в пасмурную погоду, чтобы исключить влияние энергии солнечного излучения, которая при отражении вносит погрешность в измерения. Негативное воздействие на результаты обследования оказывает также туман, сильный снегопад или дождь. Более подробно природа влияния различных факторов на результаты съемки рассмотрены ниже (рисунок 23).

Измеряемое излучение при наблюдении тела с температурой Т0 является результатом наложения трех явлений.

Тело отражает часть R0(λ) энергии излучения, испускаемого окружающей средой, эквивалентной энергии излучения черного тела при температуре Та.

Если тело частично прозрачно оно пропускает часть Ґ(λ) излучения фона, эквивалентного излучению абсолютно черного тела при температуре Tf.

Наконец температура T_0 обуславливает его собственное излучение ε(λ).

В результате регистрируемую плотность теплового потока можно описать формулой [1]:

$$R_{per} = \int_{\Delta\lambda} R_a(\lambda)\left[dR(\lambda,T_a)/d\lambda\right]d\lambda + \int_{\Delta\lambda} \Gamma_f(\lambda)\left[dR(\lambda,T_f)/d\lambda\right]d\lambda + \int_{\Delta\lambda} \varepsilon_0(\lambda)\left[dR(\lambda,T_0)/d\lambda\right]d\lambda$$

где $\varepsilon_0(\lambda)$ – коэффициент излучения тела
$R_0(\lambda)$ – коэффициент отражения тела
Г(λ) – коэффициент пропускания
λ – длина волны, мкм

Из этого уравнения видно, что если тело непрозрачно, то Ґ(λ)=0, и если T_0 намного больше чем Та, то первый член становится пренебрежительно малым. В этом случаи задача упрощается и эти факторы при анализе термограмм можно не учитывать.

Во-вторых, значительное влияние на результаты обследования оказывают источники теплового излучения искусственного происхождения. Так, если исследуемый объект окружен другими телами, имеющими иные температуры, зачастую более высокие, чем температура исследуемого объекта, возможно появление погрешностей измерений. Связано это с тем, что на член уравнения, описывающий собственное излучение тела и зависящий от T_0 и ε_0, влияют погрешности, связанные с отражением этим телом излучения окружающих объектов с температурой Те и коэффициентом излучения εе.

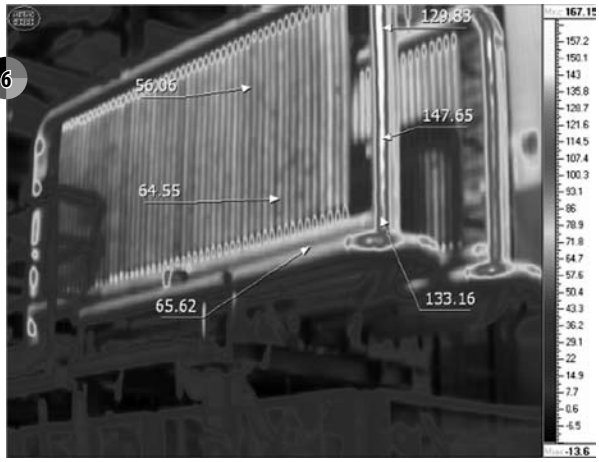


Рисунок 24 - Конденсаторный блок системы ГЕТ на УПСВ-Юг. Высокие значения температуры блока на термограмме обусловлены тепловым излучением факела, которое отражаясь от БК вносит погрешности в измерения.

Во время проведения обследования на объекте Ванкорского месторождения УПСВ-Юг инженерам и ученым ООО «Фундаментстройаркос» пришлось столкнуться с тем, что некоторые полученные результаты сильно отличались от действительности. Связано это было с тепловым излучением от факела открытого типа на объекте. Ниже приведены примеры термограмм снятых на УПСВ-Юг. Температура воздуха во время съемки -23˚С.

Как видно из термограммы, представленной на рисунке 24, температура оребренной части БК превышает температуру окружающего воздуха на 70-90 ˚С. В реальности по результатам замеров температуры при помощи термопары ТХА она равняется -20˚С. На рисунках 25 и 26 приведены фотография факела на УПСВ-Юг и термограмма распределения температур на поверхности грунта в непосредственной близо-



Рисунок 25 - Факел открытого типа на УПСВ-ЮГ

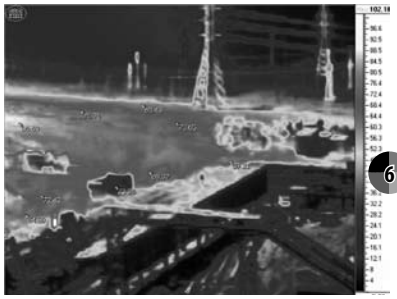


Рисунок 26 - Распределение температур на поверхности грунта рядом с факелом.

сти от факела. По термограмме, показанной на рисунке 26, не представляется возможным определить истинную температуру поверхности грунта в каждой точке снимка, тем не менее, картину распределения температурных полей можно считать довольно корректной. Таким образом, по тепловизионным снимкам можно определить зоны наибольшего влияния температурного воздействия факела на грунт. Эту информацию необходимо использовать при проектировании СТС на таких специфических объектах, как УПСВ-Юг, поскольку более достоверной информации не имеется.

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы.

1. Тепловизионная диагностика позволяет значительно повысить качество, информативность, точность и результативность обследования СТС.

2. Появляется возможность обследования и диагностики систем, замерить температуру конденсаторной части у которых контактным методом не представляется возможным.

3. Открываются широкие возможности и перспективные направления для диагностики индивидуальных СОУ.

4. При необходимости возможна визуальная оценка влияния искусственных источников теплового излучения на СТС и грунты.

5. По результатам обследования были сформированы следующие требования к проведению тепловизионных исследований. Рекомендуется проводить обследования систем в начале зимы (октябрь, ноябрь, первая половина декабря) при температуре воздуха не выше -20 ˚С, это связано с частичным растеплением грунта в летний период, соответственно для запуска и работы систем необходима более высокая температура наружного воздуха, чем в конце сезона. В случае если съемка проводится в середине или конце сезона температура наружного воздуха не должна превышать -30˚С.

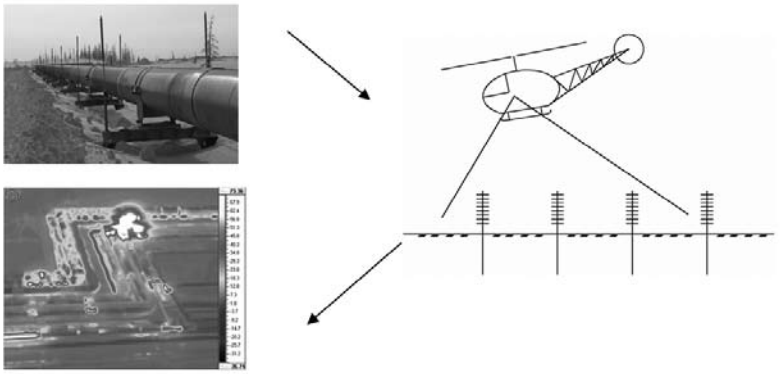


Рисунок 27 - Схема проведения тепловизионной диагностики СОУ на линейно протяженных объектах.

6. Необходимо принимать во внимание влияние посторонних источников теплового излучения, в спорных ситуациях проводить дополнительно измерение температуры контактным способом.

7. В перспективе съемку индивидуальных СОУ на линейно протяженных объектах целесообразно проводить с использованием различных видов транспорта. Съемку можно будет вести из автомобиля или вертолета в зависимости от специфики и расположения объектов исследований (рисунок 27).

Список литературы

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография, М.: «Мир», 1988, с. 9-34.
2. Вавилов В.П. Неразрушающий контроль. Том 5, М.: «Машиностроение», 2004, с. 179-182
3. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск, Наука, 1985, 165 с.

РАЗРАБОТКА ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРА КРУГЛОГОДИЧНОГО ДЕЙСТВИЯ

Ю.А. Кузма-Кичта[1], А.В. Лавриков[1],
И.Ф. Прокопенко[2], Ю.П. Штефанов[2]

[1]Московский энергетический институт (технический университет), lavrikovav@mail.ru
[2]ООО «Ньюфрост», г. Протвино, yury.shtefanov@mail.ru

Разработана конструкция термостабилизатора круглогодичного действия. Основу конструкции составляют тепловая труба и термоэлектрические модули (элементы Пельтье). Проведены исследования рабочих характеристик модулей и выбран оптимальный тип. Создан макетный образец термостабилизатора круглогодичного действия. Испытания макетного образца показали его высокую работоспособность.

Введение

Строительство объектов в условиях существования многолетнемёрзлых пород приводит к изменениям на обустраиваемых территориях (теплообмена на поверхности грунтов, теплообмена в грунтах под влиянием искусственного тепловыделения от подземных сооружений и искусственного обводнения верхнего разреза грунтов-оснований). Эти изменения приводят к появлению неблагоприятных условий для северного строительства.

Процессы: оттаивание «вечной» мерзлоты, протаивание (осадка) и пучение грунтов-оснований, термоэрозия и др. вызывают мерзлотные деформации и разрушения зданий и сооружений за счёт развития знакопеременных подвижек оснований объектов.

Существующие в настоящее время методы термостабилизации многолетнемёрзлых грунтов как правило требуют больших эксплуатационных затрат, расходов энергии и материалов, экологически небезопасны.

Значительный прогресс в создании практических средств обеспечения заданного температурного режима грунтов достигается при использовании сезонно-действующих охлаждающих установок (СОУ) на основе различного типа термосифонов. В настоящее время известны следующие типы термосифонов (термостабилизаторов), отличающихся принципом действия и состоянием рабочего вещества: воздушные, жидкостные и двухфазные (парожидкостные) [1]. Однако существует ряд приложений, где может понадобиться локальное искусственное замораживание грунта в течение круглого года.

Использование термостабилизатора круглогодичного действия с термоэлектрическими модулями даст возможность выполнения строительно-монтажных работ в наиболее выгодный весенне-летний период, что приведет к значительной экономии средств, ускорению строительства и монтажа объектов и улучшению качества строительства.

Настоящая работа посвящена вопросам разработки термостабилизатора круглогодичного действия (ТКД) на основе использования термоэлектрических модулей (ТЭМ) в конструкции парожидкостного термосифона.

Требуемые характеристики ТКД

Разрабатываемый ТКД предполагался для работы в следующих условиях: температура грунта +5ºС; среднесуточная температура воздуха +17ºС; количество тепла поступающего из почвы 150-200 Вт (для глубины погружения испарителя 8-10 м, и диаметра 40 мм).

Разрабатываемый ТКД должен иметь в своей конструкции холодильную установку малой мощности (<1.5 кВт), быть необслуживаемым и автономным. Сброс тепла от холодильной машины происходит в окружающую среду (воздух).

Обоснование выбора элементов конструкции

В качестве основы ТКД была выбрана серийно производимая компанией “Ньюфрост” двухфазная тепловая труба (термосифон), использующая в качестве теплоносителя хладон 22. Испаритель выполнялся в виде круглой трубы погруженной в грунт. Конденсатор соединялся АД-сваркой с основной трубой, но имел прямоугольный профиль и располагался над грунтом. Выбранная конструкция доказала свою надежность многолетними испытаниями сезонно-охлаждающих устройств в натурных условиях. Ее преимущества - простота конструкции, отсутствие энергозатрат и технического обслуживания, низкая стоимость и удобство при транспортировке.

Холодильная установка, работающая от электрического питания, должна обеспечивать в летнее время поддержание заданного температурного режима. Для решения этой задачи необходимо было привлечь тепловую машину, которая за счет совершаемой ею работы передавала тепло от более нагретого источника к менее нагретому. Таким элементом является термоэлектрический модуль (см. рисунок 1). В основе работы ТЭМ [2] лежит эффект, открытый Жаном Пельтье: при протекании постоянного электрического тока в цепи, состоящей из разнородных проводников, в местах контактов проводников поглощается или выделяется, в зависимости от направления тока, тепло-

та. Количество теплоты пропорционально току, проходящему через проводники. Единичным элементом ТЭМ является термопара, включающая в себя одну ветвь р-типа и одну ветвь n-типа. Ветви соединяются между собой при помощи коммутационной пластины из меди. В качестве материала ветвей традиционно используются полупроводники на основе висмута, теллура, сурьмы и селена.

Элементы Пельтье позволили создать компактную холодильную установку малой мощности, которая без труда размещается на одиночном термостабилизаторе, содержит минимум движущихся элементов (только система вентиляции), и имеет минимальную массу. Из большого семейства ТЭМ были выбраны элементы площадью 40×40 мм на основе алюминиевой подложки, такая конструкция по сравнению с кремниевыми пластинами, позволяет компенсировать огрехи крепления модулей к теплообменным поверхностям, что приводит к уменьшению брака при производстве.

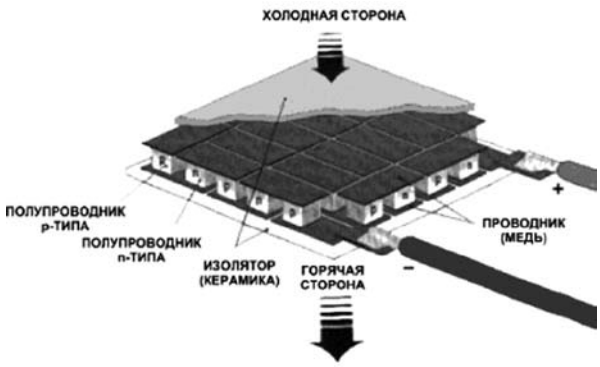


Рисунок 1 – Термоэлектрический модуль – элемент Пельтье

Охлаждение горячих поверхностей ТЭМ осуществлялось с помощью воздушных радиаторов, расположенных на вспомогательной тепловой трубе. Такая конструкция позволила отводить тепло от горячего источника при минимальном перепаде температур.

Применение термоэлектрических модулей, выращенных новым методом на подложке из сплава Д16Т, дает возможность значительно увеличить теплоотдачу в месте контакта ТЭМ с обоими теплопередающими устройствами. Данный подход позволяет с наибольшей эффективностью использовать возможности ТЭМ, что приводит к экономии затраченной энергии. Однако при выполнении данной работы стоит обратить внимание на зависимость напряжения питания ТЭМ от температуры охлаждаемой поверхности.

Использование последних достижений в области интенсификации теплообмена [3] позволяет создать условия стабильной работы ТЭМ при его максимальной производительности, не допуская перегрева его подложки. Следует отметить, что выбор ТЭМ нового поколения и применение методов интенсификации теплообмена дадут возможность авторам проекта получить современное изделие с улучшенными характеристиками работы и надежности.

Добавление в конструкцию термостабилизатора круглогодичного действия серийных элементов от производителей ТЭМ потребовало сопоставления заявленных и реальных характеристик оборудования, а также выявления особенностей работы элементов в выбранной конструкции. С этой целью, были поставлены лабораторные эксперименты по исследованию производимой холодильной мощности ТЭМ и эффективности работы системы воздушного охлаждения.

Определение мощности термоэлектрических модулей

Исследование проводилось на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рисунке 2.

Термоэлектрические модули и радиаторы водяного охлаждения устанавливались горизонтально в замкнутый контур, состоящий из теплообменника (1), рабочего участка (3), циркуляционного насоса (8), расходомера (9) и регулирующего вентиля (10). Активная структура ТЭМ подключалась к источнику постоянного тока (7). Плоский нагреватель запитывался переменным током. Падение напряжения на активной структуре ТЭМ и плоском нагревателе измерялись цифровым мультиметром Fluke 8845 (5). Ток в цепях с активной структурой ТЭМ и с плоским нагревателем определялся по падению напряжения на образцовых сопротивлениях (6), включенных в цепь последовательно. Измерение сигналов термопар (2, 4) осуществлялось цифровыми мультиметрами Fluke 8845 (5). Падение напряжения на образцовых сопротивлениях (6) измерялось мультиметрами В7-43 и В7-39.

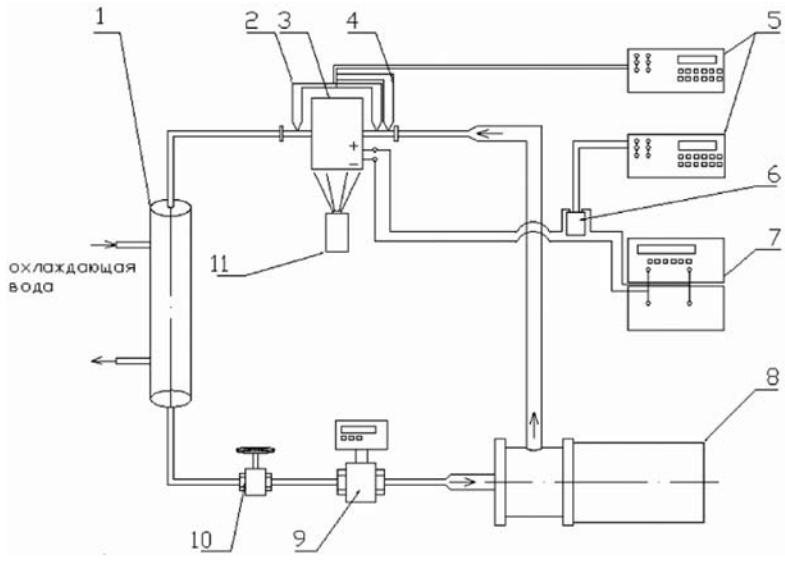


Рисунок 2 - Схема экспериментальной установки: 1 - теплообменник; 2 - дифференциальная термопара; 3 - рабочий участок; 4 - термопара; 5 - цифровой мультиметр "Fluke 8845"; 6 - образцовые сопротивления; 7 - источник постоянного тока "BVPpro"; 8 - циркуляционный насос; 9 - расходомер "ТБН Энергосервис КМ-5"; 10 - вентиль; 11 - тепловизор "Fluke 195"

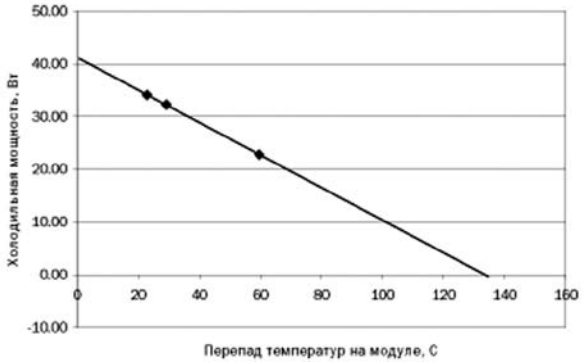


Рисунок 3 - Зависимость холодильной мощности термоэлектрического модуля от перепада температуры на его сторонах.

Разность температур на горячей и холодной сторонах модуля определялась с помощью тепловизора Fluke 198 (11).

При исследовании измерялась холодильная мощность ТЭМ и температуры на его сторонах, а также параметры потребляемой мощности. Распределение температуры измерялось с помощью тепловизора. Согласно оценкам погрешность определения холодильной мощности не превышала 10%.

В экспериментах наблюдалась характерная для ТЭМ зависимость производимой холодильной мощности от перепада температур на его сторонах (см. рисунок 3). В целом отмечались несколько более низкие параметры относительно заявленных характеристик модулей.

Определение суммарной мощности установки

Для исследования заморозки грунта с помощью ТКД была создана экспериментальная установка, состоящая из модели ТКД и измерительного комплекса. Модель ТКД состояла из тепловой трубы, с размещенными на поверхности зоны конденсации термоэлектрическими модулями, воздушной системы охлаждения и емкости с песком, моделирующей грунт. Методика исследования основывалась на измерении распределения температуры в емкости с песком при охлаждении ее с помощью ТКД и определении на основе этих измерений его передаваемой мощности.

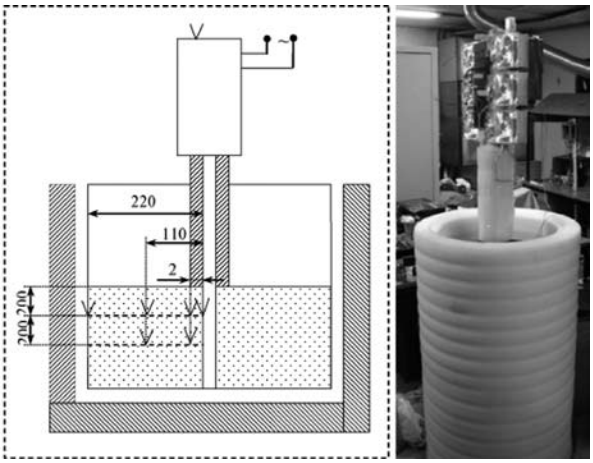


Рисунок 4 - Схема и внешний вид экспериментальной замораживающей установки

На рисунках 4 представлены схема экспериментальной замораживающей установки и ее внешний вид. Модель ТКД состояла из тепловой трубы (поперечное сечение 40×20×2) с ТЭМ на ней и радиаторами воздушного охлаждения, емкости объемом 150 л, наполненной до половины песком (массой 129 кг), влажностью 5-15%, и автоматизированного измерительного комплекса на базе измерительной платы LA-20 (ЗАО Руднев-Шиляев). В емкости устанавливались термопары на различной глубине и расстоянии от замораживающей поверхности. Емкость и наружная поверхность тепловой трубы теплоизолировались.

В экспериментах измерялись температуры на поверхности испарителя, в двух сантиметрах от него, на стенке емкости и посередине между испарителем и стенкой емкости.

Результаты испытаний макетного образца ТКД показали, что он обеспечивает требуемые проектом энергетические параметры – холодильную мощность 150 Вт при общей потребляемой мощности 350 Вт.

Макетный образец ТКД удостоен диплома X Московского международного салона инноваций и инвестиций (7-10 сентября 2010).

Выводы

1. Предложен вариант конструкции ТКД на основе использования термоэлектрических модулей и парожидкостного термосифона.
2. Проведены измерения мощности термоэлектрических модулей и системы воздушного охлаждения.
3. Измерена холодильная мощность макетного образца ТКД.
4. Показано, что разработанный ТКД обеспечивает требуемые параметры.

Список литературы

1. Васильев Л.Л., Вааз С.Л. Замораживание и нагрев грунта с помощью охлаждающих устройств. Минск: Наука и техника, 1986, 197 с..

2. Булат Л.П., Ведерников М.В., Вялов А.П. и др. Термоэлектрическое охлаждение: Текст лекций\ Под общ. ред. Л.П. Булата. Спб.:СПбГУНиПТ, 2002, 147 с.

3. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах». Дзюбенко Б.В., Кузма–Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008, 532 с.

ВЫБОР ПРИНЦИПА СТРОИТЕЛЬСТВА И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ГРУНТАХ

В.Н. Захарова, Н.А. Бургутова

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

В данной статье рассматриваются исследования мерзлотных свойств грунтов и рекомендации по строительству объектов обустройства Яро-Яхинского НГКМ с использованием различных систем температурной стабилизации грунтов в условиях недостаточной информации о грунтах.

Как в процессе строительства, так и при эксплуатации, основным критерием при проектировании систем температурной стабилизации грунтов, является обеспечение устойчивости сооружений. При проектировании и строительстве инженерных сооружений в криолитозоне применяются различные типы фундаментов. Здания и сооружения с полами по грунту требуют активной термостабилизации для сохранения твердомерзлого состояния грунтов основания, в то же время существуют конструкции допускающие оттаивание ММП в период эксплуатации здания.

Для температурной стабилизации и замораживания талых и охлаждения пластично-мерзлых грунтов оснований на объектах в районах с многолетнемерзлыми породами (ММП) в настоящее время ООО НПО «Фундаментстройаркос» использует различные сезонно-действующие охлаждающие устройства: системы «ГЕТ» и «ВЕТ», индивидуальные термостабилизаторы.

Система «ГЕТ» (горизонтальная, естественно действующая, трубчатая) предназначена для температурной стабилизации грунтов оснований зданий и сооружений с полами по грунту; резервуаров любой емкости; амбаров для сбора и временного хранения нефтепродуктов и полигонов; твердых бытовых отходов; насыпей; укрепления откосов; открытых площадок; создания противооползневых защитных сооружений; крепления оснований автодорог; предотвращения оттаивания грунтов оснований инженерных коммуникаций.

Система «ВЕТ» (вертикальная, естественно действующая, трубчатая) предназначена для замораживания грунтов оснований и сооружений, расположенных на вечномерзлых грунтах несливающегося типа.

Индивидуальные сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ) – термостабилизторы, предназначены для замораживания грунтов оснований различных сооружений с проветриваемым подпольем и без него. Индивидуальные термостабилизаторы предназначены для естественного замораживания талых и охлаждения пластично-мерзлых грунтов под зданиями с проветриваемым подпольем и без него, эстакадами трубопроводов и другими сооружениями с целью повышения их несущей способности и предупреждения выпучивания свай.

Глубинные СОУ с глубиной подземной части 20-50 м предназначены для замораживания и температурной стабилизации грунтов устьев скважин, плотин и других сооружений.

Передвижные холодильные машины с компрессорами без цилиндров подключаются при необходимости к системам «ГЕТ» и «ВЕТ» и производят замораживание грунтов в летний период.

Выбор технических решений по термостабилизации грунтов основания зданий и сооружений необходимо производить по средствам анализа таких факторов как климат, инженерно-геологические и геокриологические условия, температурный режим внутри помещения и др. Кроме того технические решения, касающиеся замораживания и температурной стабилизации грунтов принимаются в зависимости от конструкции сооружения.

Основными геологическими и геокриологическими факторами, влияющими на выбор технических решений, является льдистость, засолённость, тепло–физико–механические свойства многолетнемерзлых грунтов (ММГ) и изменения их свойств в процессе строительства и эксплуатации.

Часто ошибки при инженерно-геологических изысканиях и отсутствие достоверной информации о температуре грунта и его составе могут оказать влияние на выбор технического решения, необходимого для обеспечения устойчивости зданий и сооружений. Могут быть не выявлены сложные мерзлотно-грунтовые условия в которых присутствуют таликовые зоны различной мощности, засоленностью грунтов и неоднородным температурным полем.

Так на площадке установки комплексной подготовки газа (УКПГ) Яро-Яхинского месторождения инженерные изыскания были выполнены ООО ГП «Промнефтегазэкология». Площадка проектируемого строительства в административном отношении расположена в Пуровском районе Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области. Ближайший населенный пункт- пос. Уренгой. Площадка УКПГ расположена в верховьях р. Саловаяха, речная сеть относится к бассейну р. Пур. Климатические условия являются главным фактором, определяющим распространение

многолетнемерзлых пород. Прежде всего, это низкая среднегодовая температура воздуха – минус 7,8˚С (по метеостанции Уренгой), средняя температура за холодный период (с октября по май) – минус 16,7 ˚С, за теплый – плюс 10,1 ˚С. Абсолютные отметки поверхности земли изменяются от 45,65 до 49,55м. Гидрогеологические особенности площадки определяются современными мерзлотными условиями, во взаимосвязи с которыми выделяются два типа грунтовых вод: надмерзлотные воды и грунтовые воды на участках развития талых отложений. Надмерзлотные воды залегают на кровле многолетнемерзлых грунтов. Действие надмерзлотных вод как теплоносителя вызывает протаивание нижележащих слоев мерзлого грунта. С поверхности площадки вскрыты голоценовые озерно-болотные отложения, представленные торфом. Мощность торфяных образований составляет от 0,4 до 1,4 м, на некоторых участках мощность торфа достигает 3,2 м, кроме того в интервале глубин 4,7-6,8 м встречается погребенный торф.

На площадке строительства в результате инженерно-геологических изысканий было пробурено 82 скважины глубиной 15,0 м по сетке 50×50 м и выполнено статическое зондирование грунтов в 8 точках. Проведенные инженерно-геологические изыскания показали, что геокриологические условия в пределах площадки достаточно сложные из-за наличия несквозных таликов мощностью от 0,4 до 11,6 м, которые занимают значительные доли площади и встречаются в разных частях площадки, но в основном сосредоточены в центральной и северо-восточной ее частях. Наибольшие мощности таликов были отмечены в северо-восточном углу площадки (скв. №№ 79,81,82), где они составили 10,5-11,6м. В 46 скважинах грунты промерзлые на всю глубину бурения (до 15м).

Таким образом, многолетнемерзлые породы были вскрыты во всех 82 скважинах, но кровля их залегла на разных глубинах. Термометрические замеры были проведены лишь в 12 скважинах, большое количество оснований зданий и сооружений остались без определения температурного режима грунтов. В то время как для проектирования в соответствии с нормативными документами (СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства» Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов; ГОСТ 25358-82 «Грунты. Метод полевого определения температуры») является необходимым наличие информации о температуре грунтов для каждого сооружения.

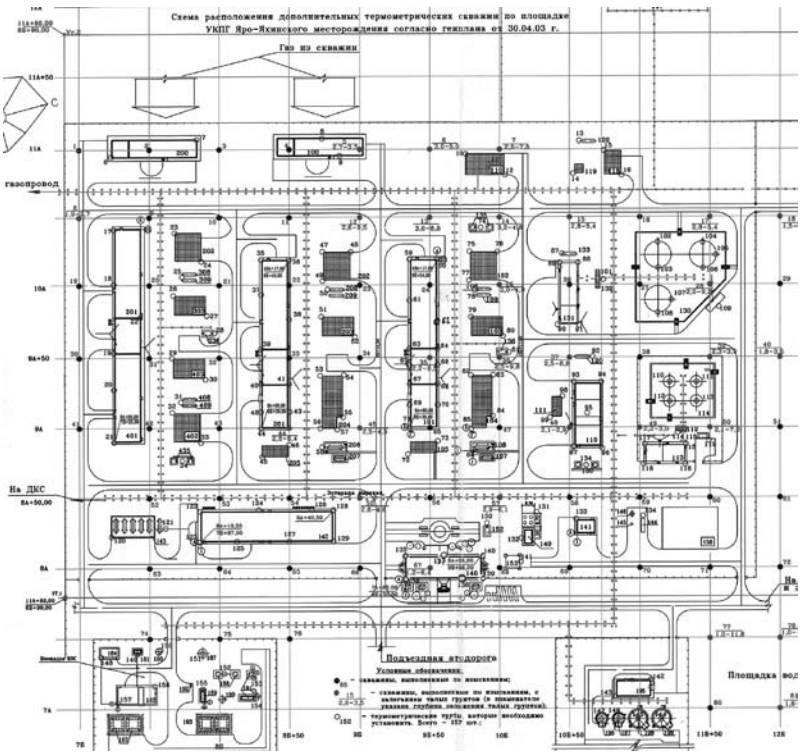


Рисунок 1 - Схема расположения дополнительных термометрических скважин по площадке УКПГ Яро-Яхинского месторождения согласно генплана

Температура мерзлых пород является важнейшим параметром инженерно-геокриологической обстановки,таккаконаопределяетсостояние и физико-механические свойства мерзлых грунтов, а следовательно и устойчивость оснований различных инженерных сооружений. Температурный режим грунтов формируется в процессе теплообмена их с окружающей средой, он является функцией комплекса природных условий, включающего в себя, с одной стороны, климат, растительный покров, а с другой – состав и свойства самих грунтов и условия циркуляции в них подземных вод.

Поэтому ООО НПО «Фундаменстройаркос» были выполнены доизыскания данной территории, был организован выезд в поле работников организации для установки термометрических скважин и замеров температур в них. На рисунке 1 приведена схема расположения дополнительных термометрических скважин по площадке УКПГ Яро-Яхинского месторождения.

Таким образом, было определено количество и расположение 157 термометрических труб в соответствии с предоставленным генпланом. Анализируя результаты исследований можно отметить, что зоны распространения талых грунтов в целом совпадают с результатами изысканий выполненных на стадии «проект».

В результате данного исследования мерзлотных условий были уточнены и обнаружены дополнительные зоны залегания талых грунтов (см. рисунок 2):

- здание ЗПА (поз. 100) – талые грунты до глубины 8 метров залегают на половине здания (скв. 8,9);

- технологический корпус (поз. 101) – талые грунты до глубины 8-10 метров расположены в

средней части корпуса и составляют до 50% его площади (скв. 61-70);

- площадка сырьевых емкостей (поз. 103) – талые грунты залегают по всей площадке до глубины 5-7 метров;

- аппаратная площадка УДК (поз. 104) – талые грунты до глубины 6-8 метров расположены на 70% площади (скв. 82, 83, 85);

- площадка печей УДК (поз. 105) – талые грунты до глубины 5-10 метров залегают на 50% площади с северной стороны (скв. 73);

- емкости дренажные (поз. 106, 107) – талые грунты залегают до глубины 8-10 метров);

- цех регенерации метанола (поз. 110) – талые грунты расположены на 20% площади здания в его западной части (скв. 93);

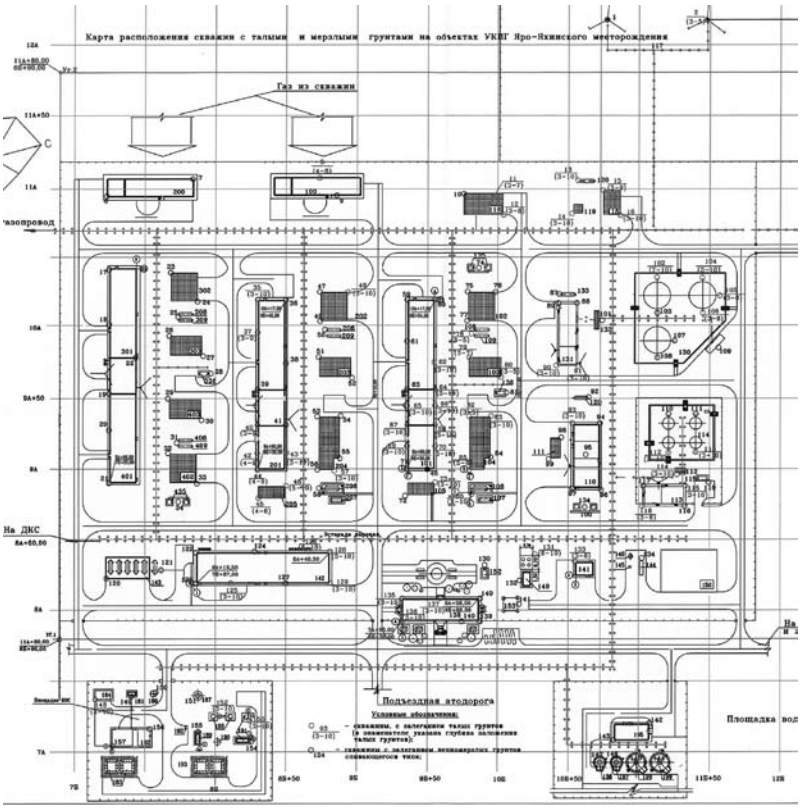


Рисунок 2 - Карта расположения талых грунтов на объектах УКПГ Яро-Яхинского месторождения

- площадка отключающей арматуры (поз. 112) – талые грунты до глубины 8-10 метров залегают по всей площади;

- насосная резервуарного парка (поз. 113) – характеризуется наличием на 50% площади талых грунтов, залегающих по диагонали здания (скв. 115, 118);

- резервуарный парк метанола (поз.114) – талые грунты до глубины 8-10 метров расположены на двух резервуарах (скв. 112, 113);

- площадка факелов (поз. 117) – правый факел расположен на талых грунтах до глубины 5 метров;

- концевая трапная установка (поз. 118), площадка печи подогрева конденсата газа (поз. 119) и емкость дренажная (поз. 120) – талые грунты залегают до глубины 9-10 метров;

- 3 РВС-3000 (поз. 130) – талые грунты до глубины 8-10 метров встречены в скважинах 104-106;

- насосная конденсата (поз. 131) – талые грунты до 10 метров залегают на 50% здания (скв. 90, 91);

- здание СЭБ (поз. 140) – талые грунты до 10 метров залегают на 50% южной части здания (скв. 135-137)

- склад хранения пенообразователя (поз.141) талые грунты до глубины 8 метров;

- энергетический комплекс (поз.142) – талые грунты глубиной до 10 метров залегают на 30% северной части здания (скв. 125, 126, 128, 129);

- компрессорная сжатого воздуха с ресивером (поз.149) –талые грунты до 9 метров залегают в скважине 131;

- очистные канализационные сооружения (поз 180-193) – талые грунты до глубины 8-10 метров;

- технологический корпус (поз.201) – талые грунты до глубины 8-10 метров располагаются по краям здания (скв. 35-38, 40,41,43,44);

- площадка теплообменников «газ-газ» (поз. 202) – талые грунты залегают до 10 метров по скв. 48;

- аппаратная площадка УДК (поз. 204) – талые грунты до глубины 8-10 метров (скв. 57);

-площадка печей УДК (поз. 205) – талые грунты до глубины 8-10 метров расположены по всей площадке.t

Данные исследования позволили более точно производить проектирование фундаментов и в соответствии с грунтовыми условиями применять системы замораживания и температурной стабилизации грунтов. На основании расчетов несущей способности свай было выявлено, что увеличение длины свай в талых грунтах на 1 метр приводит к увеличению несущей способности сваи на 1 тонну. Следовательно, увеличение длины свай или диаметра не обеспечивает проектную несущую способность свай.

Талые грунты, в основном, были представлены супесями и суглинками различной консистен-

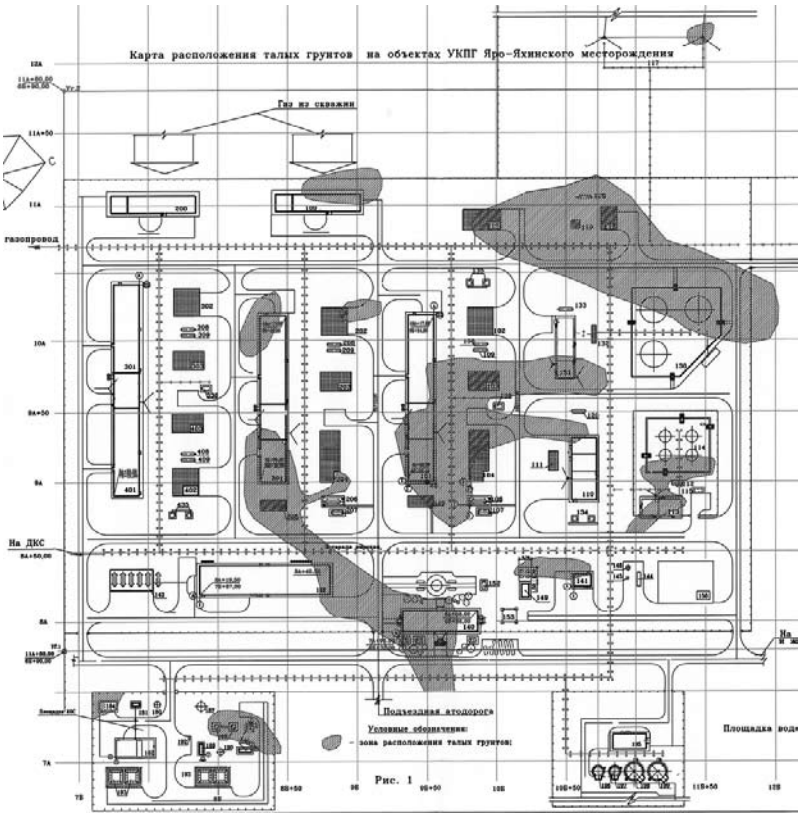


Рисунок 3 - Карта расположения талых грунтов на объектах УКПГ Яро-Яхинского месторождения. Штриховкой обозначена зона расположения талых грунтов

ции: от тугопластичных до текучепластичных – суглинки; от пластичных до текучих – супеси. По степени морозной пучинистости данные грунты средне- и сильнопучинистые.

Таким образом, проведенные инженерно-геологические исследования показали, что наблюдаемые мерзлотно-геологические условия можно охарактеризовать как неблагоприятные для строительства и достаточно сложные. Встречаются площадки с зонами островного распространения ММГ и сливающегося типа ММП; участки с кровлей мерзлоты, заглубленной на 8-12 м от дневной поверхности. Кроме того, в скважинах по разрезам встречен перелеток мерзлых грунтов толщиной 0,3-1,4 м, как подстилающий торфяные образования, так и залегающий в буграх пучения. На рисунке 3 приведена карта расположения талых грунтов на объектах УКПГ Яро-Яхинского месторождения. Зона расположения талых грунтов обозначена штриховкой. На рисунке 4 приведена геокриологическая карта Яро-Яхинского месторождения, на которой обозначены зоны прерывистого распространения многолетнемерзлых пород, участки талых пород, а также участки развития мерзлотных процессов. В силу отсутствия достаточного количества наблюдений талики показаны в предполагаемых границах.

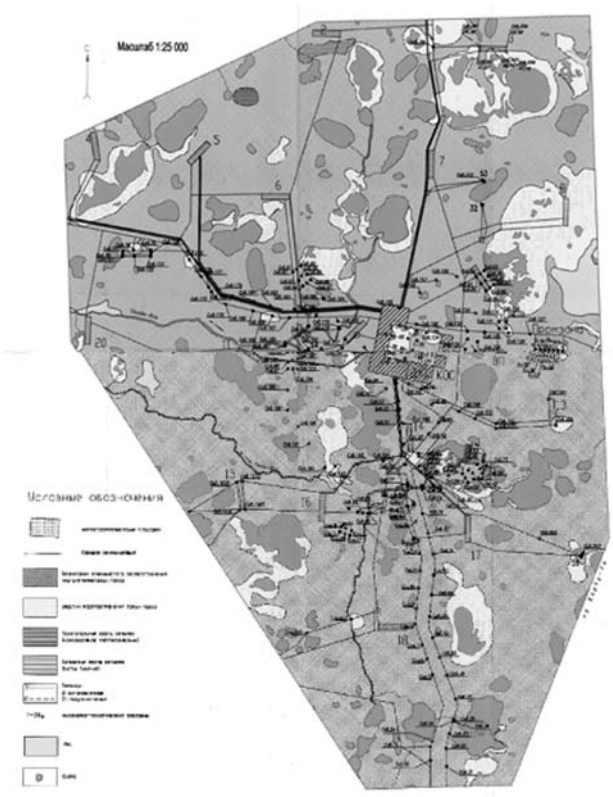


Рисунок 4 - Геокриологическая карта Яро-Яхинского месторождения

Анализ расположения, глубины заложения и механических характеристик талых грунтов подтвердил правильность принятого на стадии проект I принципа использования вечномерзлых грунтов.

Наиболее целесообразным решением обеспечения несущей способности свай является замораживание талых грунтов.

В результате были выданы следующие рекомендации по выбору принципов использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания зданий и сооружений а также по выбору типов температурной стабилизации грунтов.

Принцип I – использование ММГ в мерзлом состоянии следует применять в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов как сливающегося, так и несливающегося типов:

- с использованием сезоннодействующих охлаждающих устройств – термостабилизаторов и систем «ГЕТ» и «ВЕТ» на участках с залеганием кровли ММП несливающегося типа;

- с использованием термостабилизаторов и системы «ГЕТ» на участках с залеганием кровли ММГ сливающегося типа.

В зонах залегания сквозных таликов принять второй принцип, длину свай проектировать с учетом несущей способности грунтов, а также пучинистых свойств грунтов. Как ме-

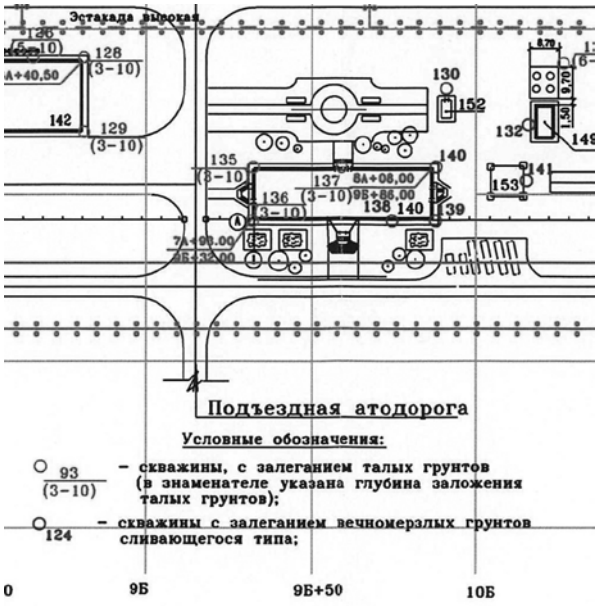


Рисунок 5 - Фрагмент карты расположения скважин с талыми и мерзлыми грунтами на объектах УКПГ Яро-Яхинского месторождения.

роприятие, уменьшающее глубину сезонного промерзания и тем самым уменьшающее воздействие сил морозного пучения, необходимо предусмотреть по контуру зданий и по площади площадок устройство теплоизоляции из пенополэкса толщиной 100-150 мм. В особо сложных условиях возможноразмещение под теплоизоляцией греющего кабеля или труб с циркуляцией горячей воды.

В наиболее неблагоприятных случаях на площадках необходимо применять два принципа строительства с разработкой специальных мероприятий, обеспечивающих устойчивость зданий и сооружений. К таким мероприятиям относятся: определение границ расположения мерзлых грунтов с точностью до 6 метров; проведение водопонижения; создание мерзлотных противофильтрационных завес на границе талых и мерзлых грунтов.

При строительстве фундаментов объектов УКПГ на талых грунтах основными критериями, обеспечивающими устойчивость оснований и фундаментов, является сохранение грунтов от обводнения, просадок и исключения сверх-

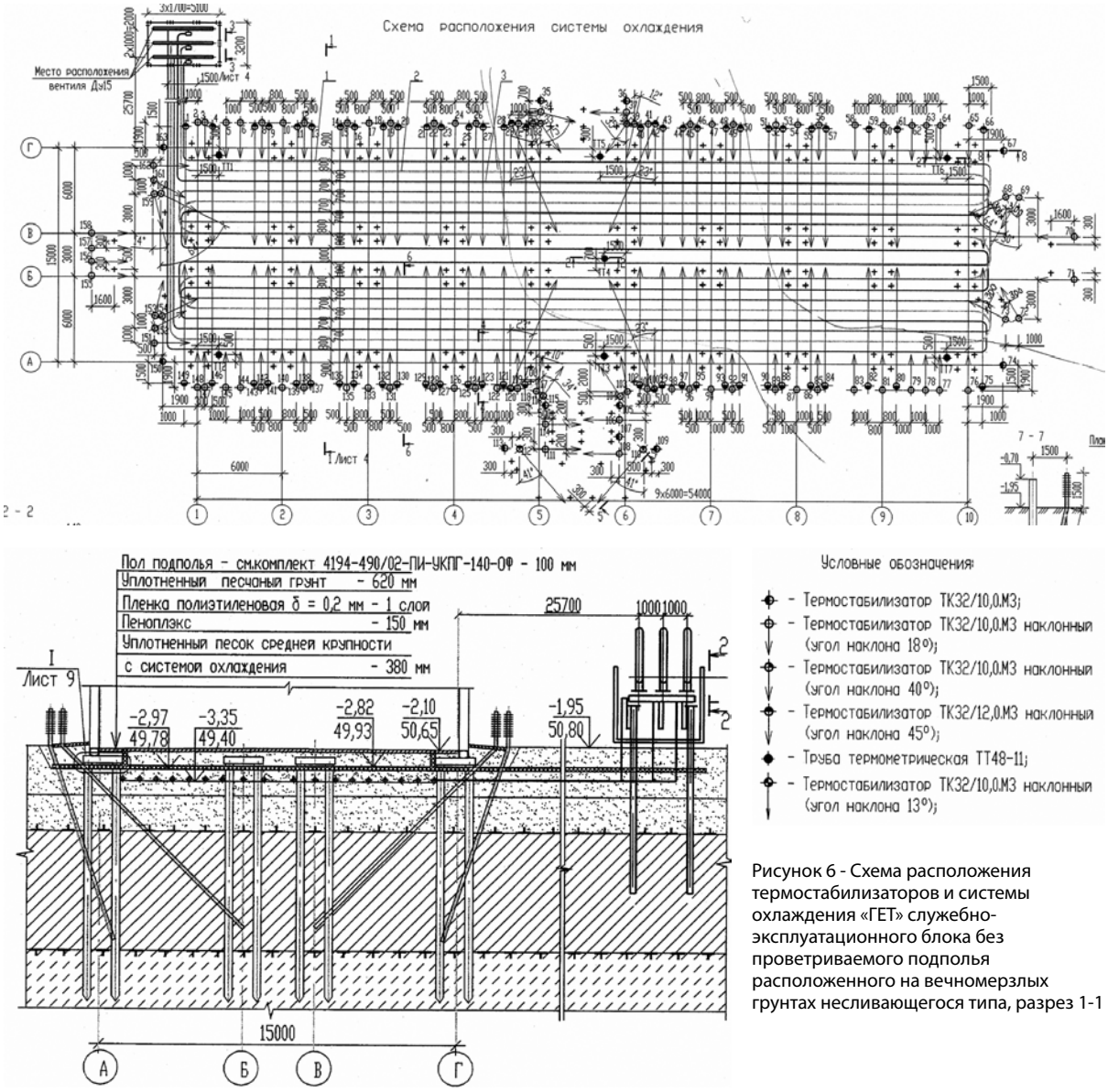


Рисунок 6 - Схема расположения термостабилизаторов и системы охлаждения «ГЕТ» служебно-эксплуатационного блока без проветриваемого подполья расположенного на вечномерзлых грунтах несливающегося типа, разрез 1-1

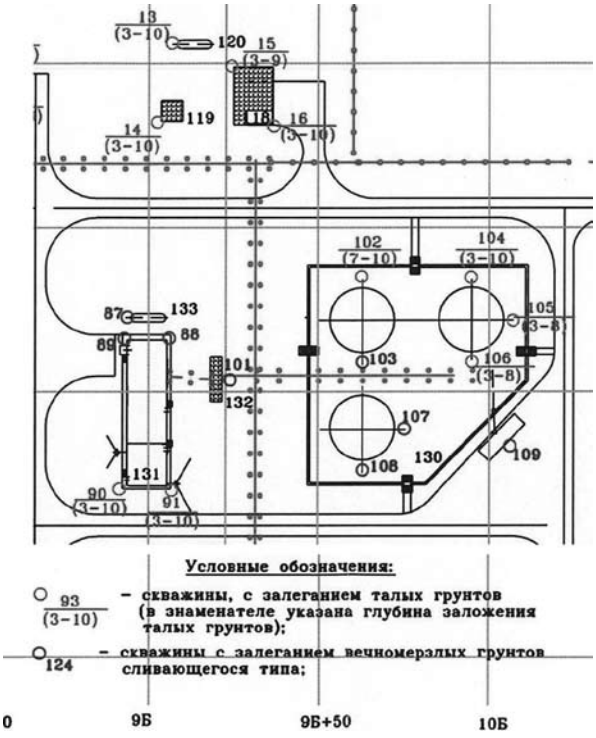


Рисунок 7 - Фрагмент карты расположения скважин с талыми и мерзлыми грунтами на объектах УКПГ Яро-Яхинского месторождения.

нормативного промерзания, а также усиление несущей способности грунтов. Основным типом фундаментов при строительстве на талых грунтах являются свайные. В дополнение к свайным фундаментам под резервуары могут применяться площадные фундаменты, выполненные из дорожных плит. Особенностью строительства объектов на талых слабонесущих грунтах является применение свайных оснований под резервуары взамен плитных.

Другим техническим решением, увеличивающим несущую способность талых грунтов, является их замораживание и температурная стабилизация грунтов (ТСГ) на период эксплуатации сооружения. Это техническое решение позволяет применять взамен свай длиной свыше 20 метров сваи длиной не более 10 метров или плитные фундаменты. Основное условие, которое должно быть учтено при применении замораживания грунтов, это учет пучения грунтов, т.е. замораживание грунтов должно быть проведено за один зимний период, после чего производится нивелировка фундамента и строительство объекта. На период эксплуатации таких объектов часть систем замораживания может быть выключена из работы для исключения дальнейшего промораживания и пучения грунтов.

Системы ТСГ оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на территории распространения ММГ, следует проектировать на основе результатов специальных инженерно-геокриологических изысканий с учетом конструктивных и технологических особенностей проектируемых сооружений, их теплового и механического взаимодействия с ММГ оснований и возможных изменений геокриологических условий в результате освоения территории.

Проектные решения по системам ТСГ оснований и фундаментов сооружений (конструкции, тип системы, необходимость, методы и параметры термостабилизации грунтов основания) должны соответствовать типу площадки обустройства, сроку службы, уровню ответственности, степени взрыво- и пожароопасности, конструктивно-технологическим характеристикам и режиму эксплуатации сооружения.

Основными устройствами для замораживания грунтов при обустройстве площадки УКПГ являлись сезоннодействующие термостабилизаторы и системы «ВЕТ». Конструкции оснований зданий с полами по грунту с применением термостабилизаторов или систем «ВЕТ» и «ГЕТ» и оснований с проветриваемым подпольем.

Для некоторых дополнительных зон залегания талых грунтов, которые были выявлены в результате замеров температур грунтов ООО НПО «Фундаментстройаркос» были приняты следующие технические решения по температурной стабилизации грунтов.

Для здания служебно-эксплуатационного блока (поз. 140) без проветриваемого подполья, расположенного на ВМГ несливающегося типа (талые грунты до глубины 10 метров залегающих на 50% здания) было принято решение использовать термостабилизаторы и систему охлаждения «ГЕТ». На рисунке 5 приведен фрагмент карты расположения скважин с талыми и мерзлыми грунтами на объектах УКПГ Яро-Яхинского месторождения, а на рисунке 6 показана схема расположения систем охлаждения.

Для аварийного резервуарного парка выветренного конденсата газа V=3×3000м3 (поз. 130), в основании которого были встречены талые грунты в скважинах 104-106 (рис. 7) до глубины 8-10 метров техническим решением являлось использование систем «ГЕТ» и «ВЕТ» (см. рис. 8).

Северо-западная часть площадки резервуарного парка характеризуется наличием талых грунтов до значительных глубин. Для температурной стабилизации грунтов данной части площадки наиболее приемлема система «ВЕТ», так как данная система была разработана для глубинного замораживания грунтов. В скважинах 107 и 108 были вскрыты вечномерзлые грунты сливающегося типа, поэтому для данного резервуара предлагается применить систему «ГЕТ».

Основными устройствами для температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов являлись сезонно действующие термостабилизаторы, системы «ГЕТ» и проветриваемые подполья. Примером может служить техническое решение по температурной стабилизации грунтов для резервуара V=100м3 (см. рис. 9) и технологического корпуса подготовки газа и конденсата без проветриваемого подполья, расположенных на вечномерзлых грунтах (см. рис. 10).

В процессе освоения площадки строительства УКПГ происходит увеличение глубины оттаи-

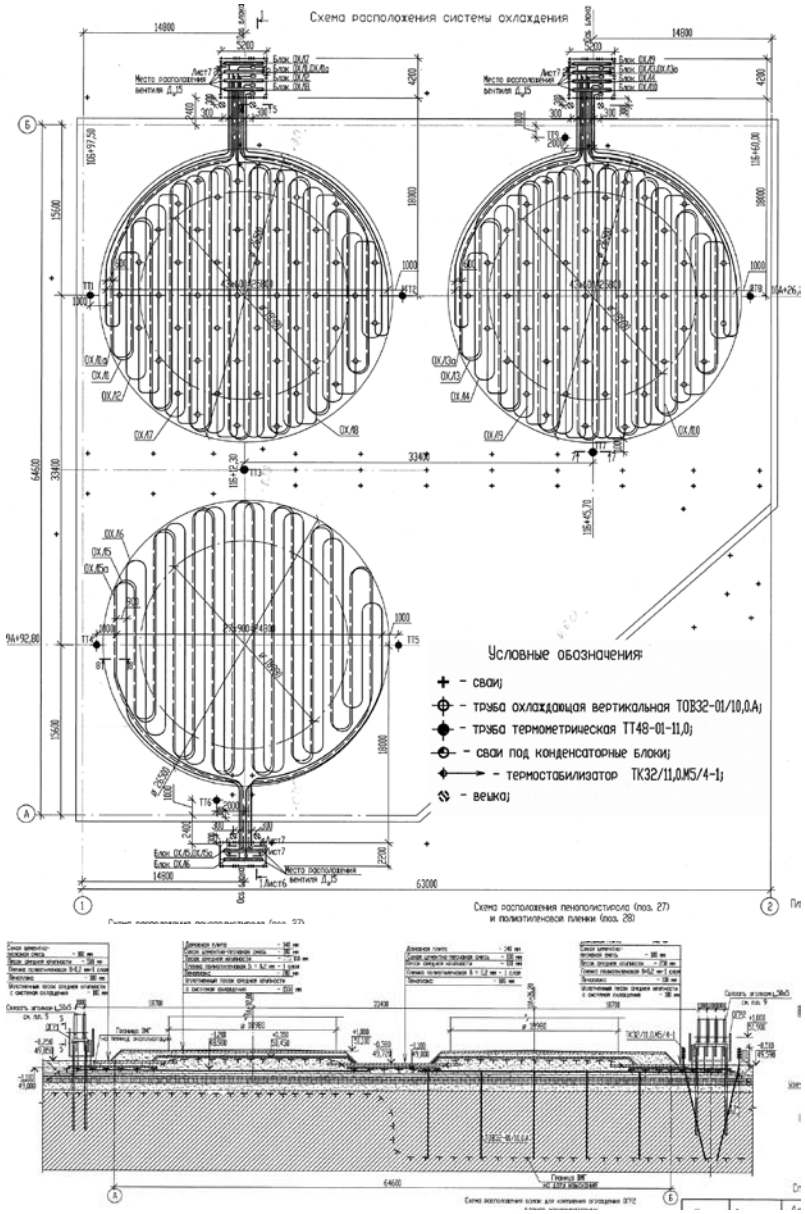


Рисунок 8 - Схема расположения системы охлаждения «ГЕТ» и «ВЕТ» резервуарного парка выветренного конденсата газа V=3×3000м3 без проветриваемого подполья расположенного на вечномерзлых грунтах несливающегося типа, разрез 1-1

вания и промерзания грунтов основания. Соответственно увеличится воздействие сил морозного пучения на фундаменты. В процессе эксплуатации воздействию сил морозного пучения будут подвержены сваи по наружному контуру зданий и сооружений. Поэтому, для уменьшения глубины оттаивании и промерзания рекомендуется установить по контуру в подпольях термостабилизаторы с шагом 2,5-3,0 м в сочетании с теплой отмосткой.

С помощью систем температурной стабилизации, при наличии многолетнемерзлого состояния грунтов и использовании I принципа строительства, в основаниях зданий и сооружений создается низкотемпературный твердомерзлый массив грунта. На участках островной мерзлоты, если здание или его часть находится на талых грунтах, последние замораживаются и охлаждаются перед началом строительства.

Выводы:

Ошибки при инженерно-геологических изысканиях и отсутствие достоверной информации о температуре грунта и его составе могут оказать влияние на выбор технического решения, необходимого для обеспечения устойчивости зданий и сооружений. Важным моментом является то, что на относительно небольшом расстоянии (до 50 м в соответствии с СП 11-105-97) инженерно-геологические условия могут значительно измениться и выбранное техническое решение по конструкции оснований и фундаментов, а также система термостабилизации грунтов может оказаться неэффективной. Это лишний раз подтверждает необходимость всестороннего изучения свойств грунтов основания и их температурного режима непосредственно под самим сооружением.

Инженерно-геокрилогические условия Яро-Яхинского месторождения как показали инженерно-геокриологические изыскания неблагоприятны для строительства зданий и сооружений. Поэтому была отмечена необходимость тщательного выбора площадки строительства с однородными грунтами (талыми или мерзлыми) с учетом возможных изменений геокриологических условий в результате строительства и эксплуатации сооружений и освоения территории.

В дополнение к изысканиям на стадии «проект», после установки дополнительных 157 термометрических труб, располагающихся непосредственно под проектируемыми сооружениями, были обнаружены и уточнены зоны распространения талых грунтов на исследуемой площадке, что позволило более точно производить проектирование фундаментов.

Анализ расположения, глубины заложения и механических характеристик талых грунтов подтвердил правильность принятого на стадии проект I принципа строительства (СНиП 2.02.01-88).

Наиболее целесообразным решением обеспечения несущей способности свай было признано замораживание талых грунтов, которое можно обеспечить при помощи криогенных устройств (систем «ГЕТ» и «ВЕТ», термостабилизаторов и пр.).

В результате проведенных исследований мерзлотных свойств и изучения температурного поля грунтов оснований проектируемых объектов, был выдан ряд рекомендаций по строительству,

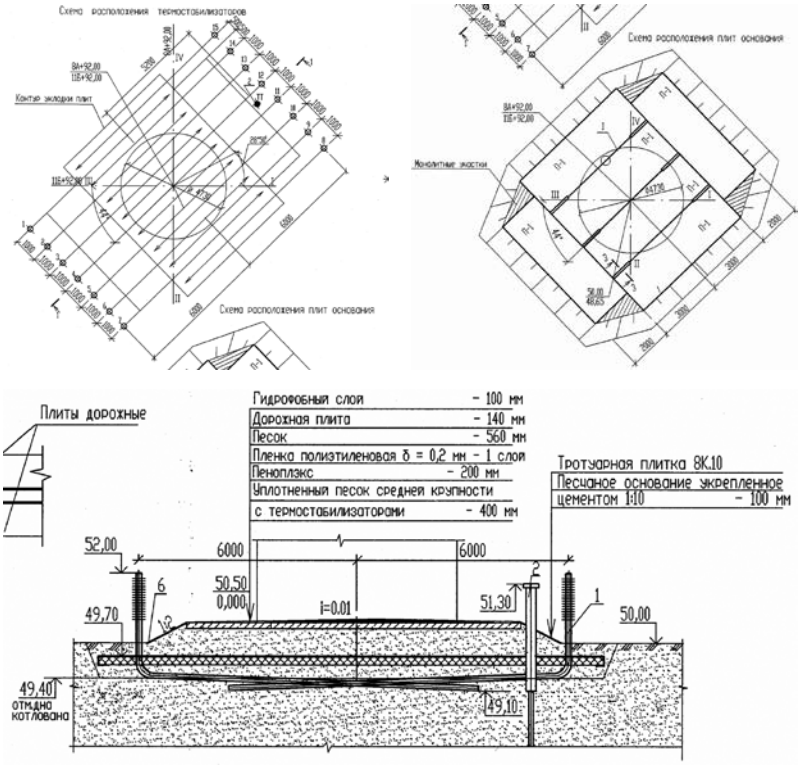


Рисунок 9 - Конструкция фундаментов резервуара V=100м3, расположенного на вечномерзлых грунтах сливающегося типа с применением индивидуальных термостабилизаторов, разрез 1-1

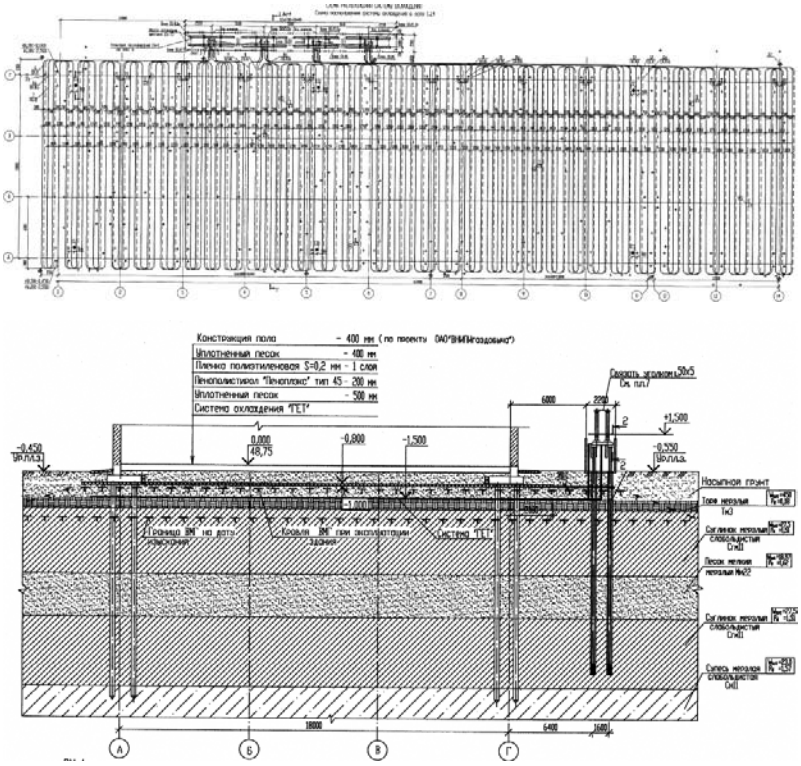


Рисунок 10 - Схема расположения системы охлаждения «ГЕТ» технологического корпуса подготовки газа и конденсата без проветриваемого подполья, расположенного на вечномерзлых грунтах сливающегося типа, разрез 1-1

определены принципы строительства для сооружений и технические решения по применению сезонно-действующих охлаждающих устройств.

Список литературы

1. ГОСТ 25100-95 Грунты. Классификация.-М.

2. ГОСТ 25358-82 Грунты. Метод полевого определения температуры.-М.

3. Отчет «Исследование мерзлотных свойств грунтов и выдача рекомендаций по строительству объектов обустройства Яро-Яхинского НГКМ. ООО НПФ «Стройаркос»

4. Отчет «Исследование температурного режима грунтов объектов УКПГ Яро-Яхинского месторождения». ООО НПФ «Стройаркос»

5. Отчет по инженерным изысканиям «Выполнение инженерно-геокриологических изысканий на площадке УКПГ Яро-Яхинского месторождения». ООО «Промнефтегазэкология»

6. РСН 67-87 Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами / Госстрой РСФСР. – М., 1988.

7. СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения

8. СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Госстрой России.- М.: ГУП ЦПП, 2005.-52с.

9. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. / Госстрой России.-М.

10. ТУ 3642-004-54098700-2006 Системы и установки криогенные / ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень, 2006.

ИНЖЕНЕРНОЕ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ: ИНФОРМАЦИОННОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ ДОКУМЕНТАЛЬНОГО ПОТОКА

В.В. Рыкова

Государственная публичная научно-техническая библиотека Сибирского отделения Российской академии наук (ГПНТБ СО РАН), г. Новосибирск, e-mail: onbryk@spsl.nsc.ru

В статье представлена система информационной поддержки (библиографические указатели и базы данных) прикладных научных исследований в криолитозоне, созданная в Государственной публичной научно-технической библиотеке Сибирского отделения Российской академии наук. Дан краткий наукометрический (библиометрический) анализ документного потока по инженерному мерзлотоведению из БД собственной генерации ГПНТБ СО РАН «Проблемы Севера» по следующим параметрам: динамика публикаций по годам; распределение документов по видам изданий и выявление наиболее продуктивных периодических изданий; тематическая структура документального потока.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, посвященные геокриологическим проблемам строительства на Крайнем Севере, нуждаются в полноценном информационном сопровождении. Обеспечение релевантной информацией научно-исследовательских программ различной направленности является приоритетным направлением деятельности отдела научной библиографии ГПНТБ СО РАН. Вопросы региональной геокриологии нашли отражение в библиографических базах данных собственной генерации ГПНТБ СО РАН «Проблемы Севера», «Природа и природные ресурсы Сибири и Дальнего Востока», «Четвертичный период в Сибири и на Дальнем Востоке», а также в текущих указателях литературы «Природа и природные ресурсы Сибири и Дальнего Востока» и «Проблемы Севера».

БД комплексной тематики «Проблемы Севера» насчитывает более 160 000 документов. Региональный охват БД «Проблемы Севера» весьма широк: Аляска, зарубежный Европейский Север (Гренландия, Шпицберген, арктические районы Норвегии, Швеции и Финляндии), северные районы Канады, Сибири, Дальнего Востока и Европейской части РФ. В БД нашли отражение вопросы истории освоения природы и природных ресурсов северных территорий Евразии и Северной Америки, дана характеристика рельефа, климата, вод, многолетней мерзлоты, почв, растительного и животного мира, экосистем, включены материалы по антропогенному воздействию на окружающую среду и охране природы российского и зарубежного Севера. Кроме того в БД освещаются прикладные исследования, связанные с природными особенностями арктических и субарктических регионов: техника и технологии в северном исполнении, особенности строительства и разработки полезных ископаемых в районах распространения многолетней мерзлоты, а также весь комплекс проблем, связанных с транспортным освоением криолитозоны.

БД «Природа и природные ресурсы Сибири и Дальнего Востока» включает более 220 000 документов по геологии, полезным ископаемым, разведочной и промысловой геофизике, климату, гидрологии суши и моря, гляциологии, почвам, растительному и животному миру, ландшафтной экологии, наземным и водным экосистемам, здесь же рассматривается широкий спектр экологических проблем. Документы, связанные с вопросами инженерной геологии, выделены в одноименный раздел, где сосредоточена большая часть материалов по исследованию многолетнемерзлых пород в регионах Азиатской части России.

БД «Четвертичный период в Сибири и Дальнего Востока» создана в 2010 г. (8 000 документов). Она кумулирует материалы по различным аспектам изучения квартера, включая геокриологию.

В таблице 1 приведены количественные характеристики документных потоков (ДП) по региональной геокриологии из БД собственной генерации ГПНТБ СО РАН.

Источниками отбора литературы для создания и текущего пополнения БД является обязатель-

Таблица 1 - Региональная геокриология в БД собственной генерации ГПНТБ СО РАН

Название БД	Документы на русском языке	В том числе на иностранных языках
Проблемы Севера	8489	1078
Природа и природные ресурсы Сибири и Дальнего Востока	10455	528
Четвертичный период в Сибири и на Дальнем Востоке	744	54

ный экземпляр отечественной литературы и зарубежные издания, поступающие в ГПНТБ СО РАН, а также материалы из удаленных БД. Каждый документ включает полное библиографическое описание, аннотацию, географическую рубрику, переводы к зарубежным публикациям. Материалы в БД систематизированы по предметным рубрикам, даются добавочные ссылки на другие области знания. Поиск документов осуществляется по ключевым словам из заглавия, аннотации или перевода, авторам, редакторам, году и месту издания, географической или предметной рубрике, языку и виду публикации. Для проведения «сложного» поиска по нескольким параметрам одновременно возможно объединение поисковых полей.

Региональные базы данных ГПНТБ СО РАН выгодно отличаются от аналогичных библиографических БД тем, что они имеют географическую рубрику (не только собственное название объекта, но и более крупные соответствующие единицы административного или физико-географического деления), поэтому легко можно найти всю информацию для абонента по интересующему его району. Например, БД «Проблемы Севера» включает более 12 000 документов по Тюменскому Северу (включая Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа).

БД ГПНТБ СО РАН в отличие от других БД включают самые разнообразные виды документов: монографии, обзоры, методические рекомендации, научные отчеты, авторефераты диссертаций, статьи из периодических и продолжающихся изданий, а также сборников научных трудов, карты, атласы, депонированные рукописи, патенты, материалы конференций, библиографические указатели на русском и иностранном языках.

Эффективность информационного сопровождения научных исследований в отделе научной библиографии ГПНТБ СО РАН подкрепляется отслеживанием документальных потоков по активно развивающимся направлениям науки и техники с использованием библиометрического (наукометрического) анализа. Состав и структура ДП может служить моделью развития того или иного направления или проблемы, позволяет сравнивать объекты по степени их разработанности и прогнозировать дальнейшую динамику [1].

Нами был отобран ДП по инженерному мерзлотоведению из БД «Проблемы Севера», включающей материалы с 1990 по 2009 гг. и проведен его наукометрический анализ, который позволил оценить качественно и количественно структуру массива по следующим параметрам:

динамика публикаций по годам;

распределение документов по видам изданий и выявление наиболее продуктивных периодических изданий;

тематическая структура документального потока.

Динамика ДП показана на рисунке 1, где четко прослеживается рост числа документов за 20-летний период почти в 2 раза, что свидетельствует об интересе ученых и специалистов к данной проблеме в связи с ее актуальностью.

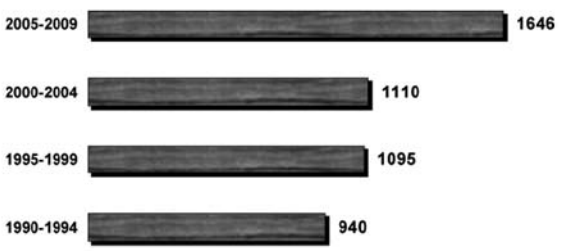


Рисунок 1 - Динамика ДП за 20 лет

Поскольку документы, вышедшие в свет в 2009 и 2010 гг. продолжают поступать в фонд библиотеки, они были исключены при построении диаграммы, но их количество уже свидетельствует о том, что наметившаяся тенденция роста документов сохранится и в дальнейшем.

Анализ видовой структуры ДП (Рис. 2) показывает, что основную массу документов составляют журнальные статьи (31,8%). Наиболее продуктивные периодические издания представлены в таблице 2, это так называемая «ядерная группа» журналов. За нижний порог ранжирования при включении в эту группы мы приняли 200 статей. Помимо перечисленных в таблице журналов материалы по инженерному мерзлотоведению активно публикуются в таких периодических изданиях как «Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология», «Основания, фундаменты и механика грунтов», «Транспортное строительство», «Строительство трубопроводов» и др.

Таблица 2 - Ядерная группа журналов по теме

%	Название журнала	Количество статей по теме
1.	Криосфера Земли	499
2.	Геотехническое строительство	260
3.	Permafrost and Periglacial Processes	226
4.	Известия вузов. Строительство	205

Существенная часть информационного массива представлена статьями из научных сборников (28%), а также материалами конференций, симпозиумов и семинаров (около 34%). Следует отметить, что регулярно проводятся международные и региональные встречи ученых и специалистов, где ведется обмен мнениями по проблемам изучения криогенных ресурсов полярных регионов, освоения шельфа арктических морей, инженерному мерзлотоведению и другим вопросам. Невозможно перечислить все научные форумы, посвященные обсуждению данной проблемы, поэтому назовем последние: «Гидрогеология, инженерная геология, геокриология и геоэкология Забайкалья и сопредельных территорий»: Всероссийская научно-практическая конференция (Чита, 2010 г.), «Ак-

туальные проблемы механики, прочности и теплопроводимости при низких температурах. Теория и методы замораживания грунтов» (ТМЗГ-2010): XII научно-техническая конференция, Четвертая конференция геокриологов России (Москва, 2011 г.) и др.

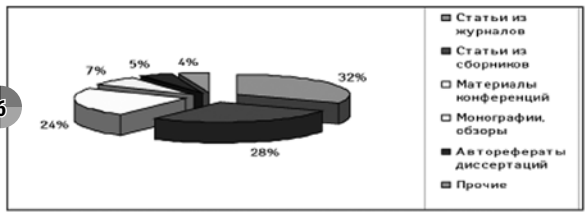


Рисунок 2 - Видовая структура ДП

7% ДП составляют монографии и обзоры, что свидетельствует о значительном количестве накопленного материала по теме, причем количество монографических изданий, выходящих ежегодно, в настоящий момент почти сравнялось с доперестроечным уровнем. В Приложении приведен список монографических изданий по теме, недавно поступивших в фонд библиотеки БД и вошедших в БД. Различным аспектам изучения геокриологических проблем строительства посвящены более 200 диссертационных исследований (авторефераты диссертаций составляют 5% ИМ). Не смотря на то что документы 20011 г. издания только начали поступать в библиотеку, в БД уже включены 5 авторефератов диссертаций по вышеозначенной тематике [2-6], поэтому в ближайшее время можно ожидать выхода в свет новых монографий

Научные работы по проблемам строительства в зоне многолетней мерзлоты ведутся в следующих научно-исследовательских и высших учебных заведениях: Институте криосферы Земли СО РАН (Тюмень), Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (Якутск), Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (Чита), Якутском государственном университете им. М.К. Амосова, Ухтинском индустриальном институте, Тюменском нефтегазовом университете., а также в технических университетах Читы, Хабаровска, Санкт-Петербурга, архитектурно-строительных академиях Тюмени, Новосибирска. Изучение криосферы активно поддерживается Научным советом по криологии Земли РАН, которым ежегодно проводятся конференции в Пущинском научном центре по различным аспектам исследования данной проблемы: «Криопедология» (1992, 1997), «Эволюционные геокриологические процессы в арктических регионах и проблемы глобальных изменений природной среды и климата на территории криолитозоны» (1995), «Проблемы криологии Земли: фундаментальные и прикладные аспекты» (1997), «Мониторинг криосферы» (1999), «Приоритетные направления в изучении криосферы Земли» (2005) и др. Российская инженерная академия при поддержке Фонда развития технологий Севера выпускает в свет серию «Развитие технологий Севера».

Анализ ДП показал, что тематически его структура подразделяется на следующие группы: 1) естественные изменения теплового и фазового состояния криолитозоны и ее антропогенная динамика; 2) современная динамика хионо- и криогидросферы; 3) технические особенности освоения криолитозоны.

В результате библиометрического анализа информационного массива нами были получены данные о распределении документопотока по годам, его видовой и тематической структуре, наиболее продуктивных периодических изданиях и ведущих научно-исследовательских организациях, работающих по данной теме. Данный ДП может быть использован учеными и специалистами в качестве источниковедческой базы в дальнейших научных исследованиях.

В заключение хотелось бы отметить, что все материалы из БД собственной генерации ГПНТБ СО РАН можно найти на сайте библиотеки по адресу www.spsl.nsc.ru, выбрав опцию «Базы данных», на следующей станице - строку «Библиографические базы данных ГПНТБ СО РАН». Далее в перечне баз данных собственной генерации найти необходимую для работы БД, названия которых даны в алфавитном порядке; после чего откроется окно с поисковыми полями, где необходимо отметить те характеристики, по которым будет осуществляться поиск информации.

Существенную помощь в научно-исследовательской и образовательной работе творческих коллективов может оказать метод информационного обслуживания ИРИ (избирательное распространение информации), который предполагает регулярное предоставление информации абонентам по постоянно действующим запросам. По системе ИРИ абоненты могут получать информацию о новых материалах по электронной почте onb@spsl.nsc.ru раз в 2 месяца. Кроме того, информационные ресурсы собственной генерации ГПНТБ СО РАН позволяют создать по заказу потребителей проблемно-ориентированную БД и ее печатного аналога с глубиной ретроспективы 50 лет.

Список литературы

1. Зусьман О.М. Библиографические исследования науки. – СПб., 2000. – 216 с.

2. Сальва А.М. Техноприродные криогенные процессы в зоне влияния магистрального канала Кюель-Таата (Центральная Якутия) : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. - Дубна, 2011. - 23 с.

3. Пьянников П.В. Повышение экологической безопасности разработки жильных месторождений за счет использования температурного ресурса криолитозоны : автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 2011. - 18 с.

4. Королева Н.А. Мерзлотно-экологическое картографирование криолитозоны России : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. - М., 2011. - 24 с.

5. Касымская М.В. Реликтовый термокарстовый рельеф и талики восточной части шелфа моря Лаптевых : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. - М., 2011. - 28 с.

6. Юрченко А.А. Методика оценки пространственного положения трубопровода в условиях пучинистых

грунтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Уфа, 2011. - 27 с.

Приложение

1. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы. - М., 2011. - 476 с. - Библиогр.: с. 472-473 (35 назв.). Аннотация: Взаимодействие вечномерзлых грунтов и периодически оттаивающих грунтов с подземными трубопроводами, с. 433-453.

2. Вааз С.Л. Сезонные охлаждающие устройства : обзор / С.Л. Вааз, А.А. Усачев ; ОАО «Газпром», ООО «Газпром экспо». - М., 2010. - 95 с. - (Обзорная информация. Серия: Транспорт и подземное хранение газа). - Библиогр.: с. 90-92 (27 назв.). Аннотация: Устройства используются в конструкции фундаментов для термостабилизации многолетнемерзлых грунтов оснований.

3. Владимир Алексеевич Кудрявцев - основатель кафедры мерзлотоведения в Московском университете / Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова ; ред. В.Н. Зайцев. - М., 2011. - 119 с. Аннотация: Кудрявцев В.А. - выдающийся российский ученый-геокриолог.

4. Гусев Е.М. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой / Е.М. Гусев, О.Н. Насонова ; Рос. акад. наук, Ин-т вод. проблем. - М. : Наука, 2010. - 326 с. - Библиогр.: с. 301-315. Аннотация: Версия SWAP для территорий с многолетней мерзлотой, с. 88-93.

5. Давыдов В.А. Автомобильные дороги на Крайнем Севере и в зоне вечной мерзлоты России : учеб. пособие / Моск. автомобил.-дорож. гос. техн. ун-т. - М. : МАДИ, 2010. - 216 с. - Библиогр.: с. 200-215.

6. Иванов И.А. Магистральные трубопроводы в районах глубокого сезонного промерзания пучинистых грунтов / И.А. Иванов, С.Я. Кушнир. - СПб. : Недра, 2010. - 175 с. - Библиогр.: с. 162-174 (225 назв.).

7. Игловский С.А. Криолитозона Двинско-Мезенской равнины и полуострова Канин / С.А. Игловский, Ю.Г. Шварцман, И.Н. Болотов ; отв. ред. Ф.Н. Юдахин ; Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, Арханг. науч. центр, Ин-т экол. проблем Севера, Помор. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, Науч.-учеб. центр «Природ. ресурсы Севера». - Екатеринбург, 2010. - 124 с. - Библиогр.: с. 114-123.

8. Использование космической информации в газовой промышленности / Н. А. Гафаров [и др.] ; ОАО «Газпром», ООО «Газпром экспо». - М. : Газпром экспо, 2010. - 130 с. - Библиогр.: с. 128-130 (33 назв.). Аннотация: Вопросы поиска перспективных участков на нефть и газ, мониторинга опасных геокриологических процессов в зоне распространения многолетней мерзлоты, оценки разрывов и зон трещиноватости, классификации месторождений нефти и газа по степени природной и техногенной опасности.

9. Компоненты безопасности линейных газонефтепроводов / А.И. Альхименко [и др.] ; С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. - СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. - 113 с. - Библиогр.: с. 111-112 (24 назв.). Аннотация: Рассмотрены особенности конструкций, прокладки и диагностики трубопроводных систем, проблемы экологической безопасности в мерзлотных условиях Якутии.

10. Криогенные системы: проблемы исследования и моделирования / В. П. Мельников [и др.] ; отв. ред. В. Р. Алексеев ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т криосферы Земли [и др.]. - Новосибирск : Акад. изд-во «Гео», 2010. - 380 с.

11. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири / Всерос. науч.-исслед. ин-т гидрогеологии и инженер. геологии. - М. : Науч. мир, 2010. - 351 с. - Библиогр.: с. 319-338.

12. Рыжков И.Б. Статическое зондирование грунтов / И.Б. Рыжков, О.Н. Исаев. - М. : Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2010. - 495 с. - Библиогр.: с. 481-491 (177 назв.). Аннотация: Применение статистического зондирования в особых условиях (в специфических грунтах - многолетнемерзлых, просадочных, с включениями крупных валунов или глыб), с. 345-405.

13. Северо-Сибирская магистраль: предпроектные исследования / В. Я. Ткаченко [и др.]. - Новосибирск, 2010. - 240 с. - Библиогр.: с. 235-239 (60 назв.). Аннотация: Исследование характеристик многолетнемерзлых грунтов.

14. Чижов А.П. Инженерная геология [Электронный ресурс] : учеб.-метод. комплекс / А.П. Чижов, В.Б. Смирнов ; Уфим. гос. нефт. техн. ун-т. - Уфа, 2010. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Аннотация: Имеется раздел «Вечномерзлые породы и их инженерно-строительные свойства».

15. Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / Н.С. Касимов [и др.] ; ред.: Н.С. Касимов, А.В. Кислов ; Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. - М. : МАКС Пресс, 2011. - 493 с. - Библиогр.: с. 473-493. Аннотация: Прогнозы изменения снежного покрова, многолетней мерзлоты, инженерно-геокриологических параметров.

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ

В. А. Матюхова, О. С. Анфилофьева

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

Рассматриваются виды применямых технических решений при проектировании оснований на вечномерзлых грунтах, каким образом осуществляется обоснование принятого решения и составляется алгоритм принятия технического решения, применимого к данному объекту. Последовательность действий показана на примере проектирования основания и фундаментов и системы температурной стабилизации грунтов основания Цеха очистки газа поз.10 Дожимной компрессорной станции на УКПГ- 1 АВ - 1 Цех Уренгойского НГКМ.

Устойчивость и надежность оснований и фундаментов под инженерными сооружениями, равно как и их стоимость, определяются выбранными конструктивными решениями. Использование вечномерзлых грунтов в качестве оснований в районах Крайнего севера базируется на 1-ом принципе, т.е. поддержании их в мерзлом состоянии в течение всего срока эксплуатации.

В настоящее время одним из перспективных решений в устройстве оснований на вечной мерзлоте является замораживание талых и охлаждение мерзлых грунтов оснований с использованием естественного ресурса холода в зимнее время года и сохранение накопленного «холода» в летний период времени.

Так, широко известны различные конструктивные решения термостабилизации на вечной мерзлоте - продуваемые или вентилируемые подполья [1], трубчатые рассольные системы [2], жидкостные и парожидкостные термостабилизаторы и системы [3]. Экспериментальные исследования различных авторов и практический опыт строительства показали, что в условиях Крайнего Севера для сохранения грунтов оснований сооружений в вечномерзлом состоянии и увеличения их несущей способности наиболее надежно и экономически выгодно использовать парожидкостные устройства [4] в качестве систем температурной стабилизации.

Особенно целесообразно применять данный тип термостабилизации грунтов оснований применительно к крупномасштабным сооружениям и ширококорпусным зданиям с габаритами в плане до 100 и боле м. Таковыми являются, в частности, нефтяные резервуары емкостью от 20000 до 50000 м3,, а также различные производственные здания.

При научно-обоснованном выборе технических решений необходимо производить анализ следующих факторов:

- инженерно-геологические и геокриологические условия;
- внешние факторы: влияние водотоков, эрозийных и склоновых процессов и т.д., под воздействием которых может произойти разрушение оснований и фундаментов;
- устойчивость при непредвиденных техногенных и климатических воздействиях в процессе эксплуатации.

Основными геологическими и геокриологическими факторами, влияющими на выбор технических решений, является льдистость, засолённость и физико-механические свойства многолетнемерзлых грунтов и их изменения в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

До начала выполнения проектных работ инженерами-исследователями проводится численное моделирование процессов взаимодействия зданий и сооружений с грунтами с использованием программ FROST-DK и Termostab.:

- прогноз изменения геокриологических условий площадки в процессе строительства и эксплуатации;
- прогноз изменения поверхностных условий относительно естественных, которые могут привести к увеличению величины сезонного промерзания - оттаивания и образованию талых зон или новообразованию мерзлоты;
- прогноз изменения величины снегозаносов, которые могут привести и к значительному повышению температуры грунтов, что в совокупности с другими факторами, приводит к растеплению грунтов.

По среднегодовой температуре, определяющей состояние грунтов, они разделены на три группы:

- талые грунты, имеющие среднегодовую температуру 00С и более;
- «высокотемпературные», имеющие среднегодовую температуру от -30С до 00С;
- низкотемпературные, имеющие среднегодовую температуру -3 0С и ниже.

Системы ТСГ оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на территории распространения многолетнемерзлых грунтов следует проектировать на основе результатов специальных инженерно-геокриологических (инженерно-геологических, мерзлотных и гидрогеологических) изысканий с учетом конструктивных и технологических особенностей проектируемых сооружений,

их теплового и механического взаимодействия с многолетнемерзлыми грунтами оснований и возможных изменений геокриологических условий в результате освоения территории, устанавливаемых по данным инженерных изысканий и прогнозных теплотехнических расчетов оснований.

При проектировании ТСГ оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах следует учитывать местные условия строительства, требования к охране окружающей среды, а также имеющийся опыт проектирования, строительства и эксплуатации сооружений в аналогичных условиях.

Проектные решения по системам ТСГ оснований и фундаментов сооружений (конструкции, тип системы, необходимость, методы и параметры термостабилизации грунтов основания) должны соответствовать типу площадки обустройства, сроку службы, уровню ответственности, степени взрыво- и пожароопасности, конструктивно-технологическим характеристикам сооружения, режиму эксплуатации сооружения.

Таблица 1 - Выбор типа системы температурной стабилизации грунтов зданий и сооружений

Температура грунтов, T_0	Требуемая система температурной стабилизации грунтов				
	Здания отапливаемые			Здания неотапливаемые с полами по грунту	
	Ширина здания, м				
	До 12 м	До 24 м	36 м и более	До 18 м	36 м и более
Твердомерзлые -1,5 °С и ниже	1. Проветриваемое подполье 1.1 Свайное основание 1.2 Ростверки, балочная клетка 2. Полы по грунту 2.1 Подсыпка с теплоизоляцией 2.2 Система «ГЕТ»	1. Проветриваемое подполье 2. Термостабилизаторы ТКВ по контуру с шагом 2 м 3. Термостабилизаторы в плане с шагом 3 м	1.Полы по грунту на подсыпке с теплоизоляцией 2. Система «ГЕТ»	Полы по грунту	
Пластичномерзлые от 0 °С до -1,5 °С	1. Проветриваемое подполье 2. Термостабилизаторы вертикальные по контуру	1. Проветриваемое подполье 2. Термостабилизаторы по контуру и под зданием с шагом 2 м 3. Система «ГЕТ»	1.Полы по грунту на подсыпке с теплоизоляцией 2. Система «ГЕТ»	1. Вертикальные термостабилизаторы ТК вдоль свай по контуру 2. Наклонные, пересекающиеся у продольной оси свай под колонны 3. Полы по грунту	1. Вертикальные термостабилизаторы ТК вдоль свай по контуру 2. система «ГЕТ» 3. Система «ВЕТ» под колонны по средним рядам 4. Полы по грунту
С погружением кровли мерзлоты (ВГВГ) до 10-15 м	1. Проветриваемое подполье 2. Термостабилизаторы вертикальные и наклонные	1. Проветриваемое подполье 2. Термостабилизаторы по контуру и под зданием с шагом 2 м 3. Система «ВЕТ», «ГЕТ»	1.Полы по грунту с теплоизоляцией 2. Система «ГЕТ», «ВЕТ»	1. Вертикальные термоколонки по контуру здания вдоль свай 2. Система «ВЕТ» под всем зданием 3. Полы по грунту	
Островная мерзлота Сквозные талики	1. Проветриваемое подполье 2. Термостабилизаторы вертикальные и наклонные	Предпостроечное промораживание грунтов основания: В зимний период – очисткой снега и с помощью СОУ В летний период – искусственное охлаждение Установка термоколонок по периметру вдоль свай Система «ВЕТ» под всем зданием Полы по грунту			

Таблица 2 - Выбор типа системы температурной стабилизации грунтов зданий и сооружений на типовых объектах

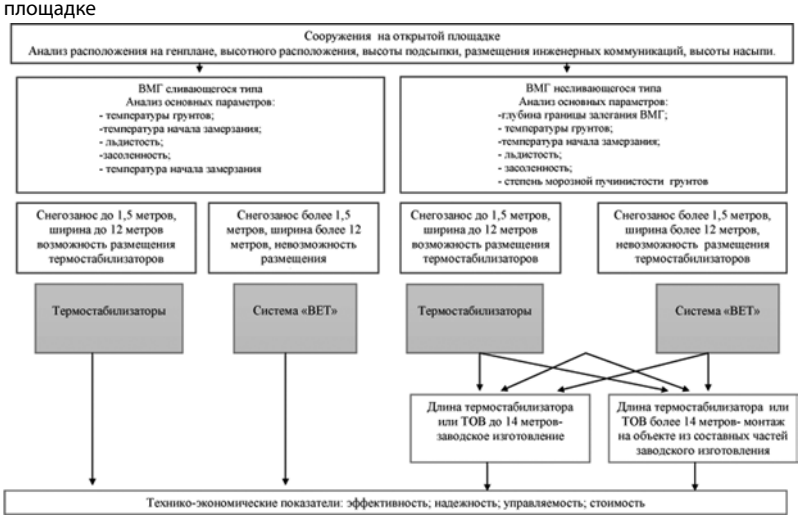
№ по генплану	Наименование сооружения	Темп, °С	Фундаменты	Система температурной стабилизации
2	Установка охлаждения газа		Свайные из металлических труб Д=159-219-277-325-426 мм или широкополочных двутавров №20-25-30-35-40Ш1 Для всех КС. Кроме КС 8,9,10, где можно использовать ж/б сваи по серии 1.01.1-8 м	На низкотемпературных ВМГ система «ВЕТ» или термостабилизаторы ТК с шагом 6м. На пластичномерзлых ВМГ: системы вертикальных или наклонных термостабилизаторов, система «ВЕТ» по расчету
3	Установка очистки газа			
4	Установка турбодетандерных агрегатов			
5	Установка рекуперативных теплообменников			
6	Установка подготовки топливного и пускового газа			Проветриваемое подполье в сочетании с вертикальными или наклонными термостабилизаторами, установленными по контуру с шагом 2 м и в подполье с шагом 3 м или система «ВЕТ»
7	Установка трансформаторная (КТП) установки			
8	Цеховой энергоблок			
9	Дизельная электростанция			
10	Закрытое распределительное устройство ЗРУ			На низкотемпературных ВМГ система «ВЕТ» или ТК. На пластичномерзлых ВМГ: системы вертикальных или наклонных термостабилизаторов
11	Электростанция собственных нужд (ЭСН) – 6шт.			Проветриваемое подполье в сочетании с вертикальными или наклонными термостабилизаторами
12	Маслохозяйство	+ 18-20		Проветриваемое подполье. По контуру термостабилизаторы
13	Блок-бокс электрообогрева коммуникаций	+ 10		На плите с наклонными термостабилизаторами
14	Канализационная насосная станция хозбытовых стоков	+ 18-20	Свайные из металлических труб Д=159-219-277-325-426 мм или широкополочных двутавров №20-25-30-35-40Ш1 Для всех КС. Кроме КС 8,9,10, где можно использовать ж/б сваи по серии 1.01.1-8 м Площадки поз. 20,22,23 покрыть асфальтом толщ. 70 мм	Наклонные термостабилизаторы. Теплоизоляции днища и стенок
15	Станция биологической очистки сточных вод	+ 18-20		Проветриваемое подполье в сочетании с вертикальными или наклонными термостабилизаторами
16	Установка очистки дождевых вод	+ 18-20		Проветриваемое подполье в сочетании с вертикальными или наклонными термостабилизаторами
17.1	Насосная станция водоснабжения (индивидуальная)			Проветриваемое подполье в сочетании с вертикальными или наклонными термостабилизаторами
17.2	Резервуары запаса воды V=700 м^3, V=2000 м^3, V=3000 м^3	От +50 до +20		Днище по грунту. Для емкостей на сливающейся мерзлоте применить систему «ГЕТ» Для емкостей на несливающейся мерзлоте применить систему «ВЕТ»
18	Административно-диспетчерский блок (АДБ)	+ 20-23		Проветриваемое подполье в сочетании с вертикальными или наклонными термостабилизаторами
19	Пожпост с теплой стоянкой	+10		Полы по грунту. На сливающейся мерзлоте применить систему «ГЕТ»; на несливающейся мерзлоте применить систему «ВЕТ»
21	Узел подключения КС совместный с узлом пуска-приема очистных устройств и дефектоскопов	-		Для температурной стабилизации использовать вертикальные термостабилизаторы
22	Укрытие крана	-		Термостабилизаторы ТК

Выбор технических решений ТСГ оснований и фундаментов следует производить на основании технико-экономического сравнения возможных вариантов. При выборе технических решений следует отдавать предпочтение решениям, позволяющим управлять надежностью оснований и фундаментов в процессе эксплуатации.

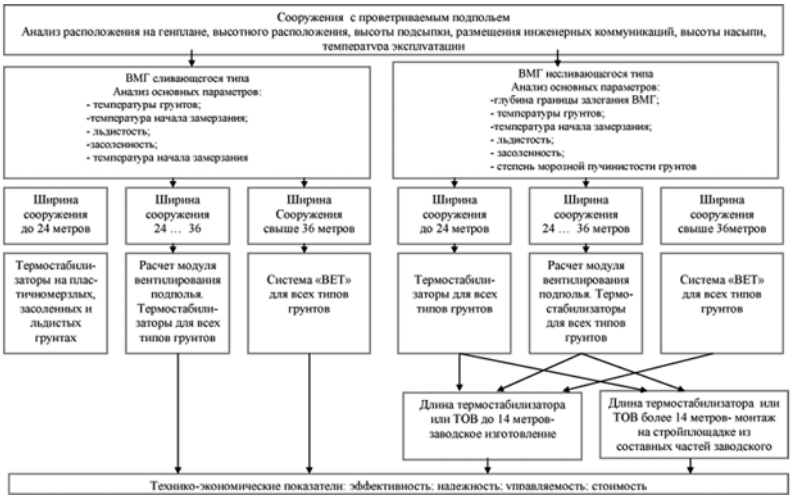
Разработка проектной документации на устройство систем ТСГ оснований и фундаментов сооружений осуществляется на основе данных инженерных изысканий, обосновывающих технико-экономических расчетов (при обязательной вариантной проработке). При разработке проектной документации разрабатывается генплан, и выбираются конструктивные решения систем ТСГ оснований и фундаментов, определяется и утверждается сводно-сметный расчет проекта.

Разработка рабочей документации осуществляется на основе технических решений разработанных в проектной документации или на основании результатов дополнительной проработки проектных решений. При разработке рабочей документации уточняются конструктивные особенности устройства оснований и фундаментов, разрабатывается комплект рабочих чертежей и рабочие (строительные) сметы. Разделы проектной документации должны содержать все необходимые обоснования технических решений, результаты прогнозных расчетов и

Блок-схема 1 - Алгоритм принятия технических решений сооружений на открытой площадке



Блок-схема 2 - Алгоритм принятия технических решений сооружений с проветриваемым подпольем



Блок-схема 3 - Алгоритм принятия технических решений сооружений с полами по грунту и резервуаров на насыпях



сведения.

- Алгоритм принятия технических решений сооружений на открытой площадке приведён на Блок-схеме 1

Выбор систем термостабилизации грунтов оснований

Грунты основания при наличии многолетнемёрзлого состояния используются по I принципу, т.е. с сохранением этого состояния на весь период строительства и эксплуатации (СНиП 2.02.01-88). При этом в основаниях зданий и сооружений создаётся низкотемпературный твёрдомёрзлый массив грунта с помощью систем температурной стабилизации (сезоннодействующими охлаждающими устройствами). На участках островной мерзлоты, если здания или часть здания находятся на талых грунтах, последние замораживаются и охлаждаются перед началом строительства (предпостроечное замораживание и охлаждение).

В процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений в зависимости от инженерно-геологических, геокриологических и техногенных процессов возможно проявление негативных процессов.

Опыт проектирования и строительства в районах Крайнего Севера даёт основание в настоящее время обобщить необходимые технические решения использования систем температурной стабилизации грунтов оснований в зависимости: от состояния ММГ, температуры ММГ, ширины зданий и теплового режима внутри зданий.

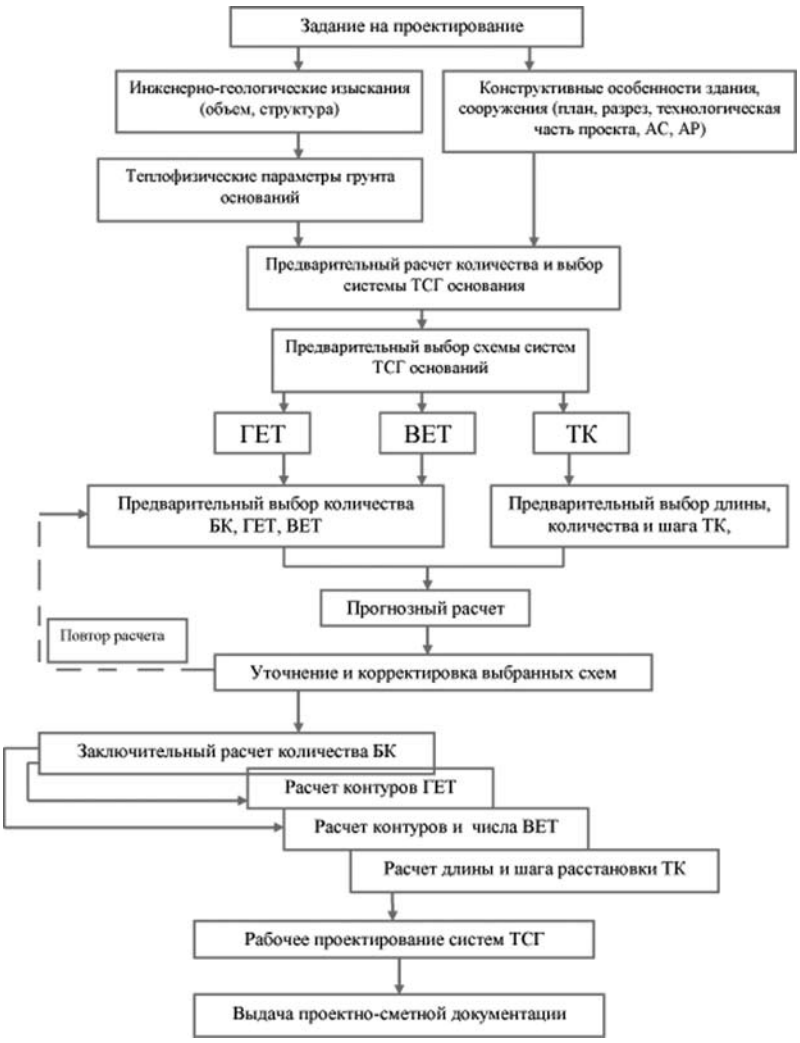
Подбор систем температурной стабилизации в зависимости от указанных параметров приведен в таблице 1.

Выбор типа системы температурной стабилизации грунтов зданий и сооружений на типовых объектах приведены в таблице 2.

Проектирование систем температурной стабилизации грунтов оснований, как и любое проектирование ставит своей целью реализовать Проектно-Сметную Документацию (ПСД) в соответствии с требованиями заказчика с учетом федерального и местного законодательства и строительных нормативов.

Подробнее алгоритм принятия технических решений можно рассмотреть на примере проектирования основания и фундаментов и системы температурной стабилизации грунтов основания Цеха очистки газа поз.10 Дожимной компрессорной станции на УКПГ- 1 АВ - 1 Цех Уренгойского НГКМ.

Блок-схема 4 - Проектирование оснований с использованием систем ГЕТ, ВЕТ, ТК



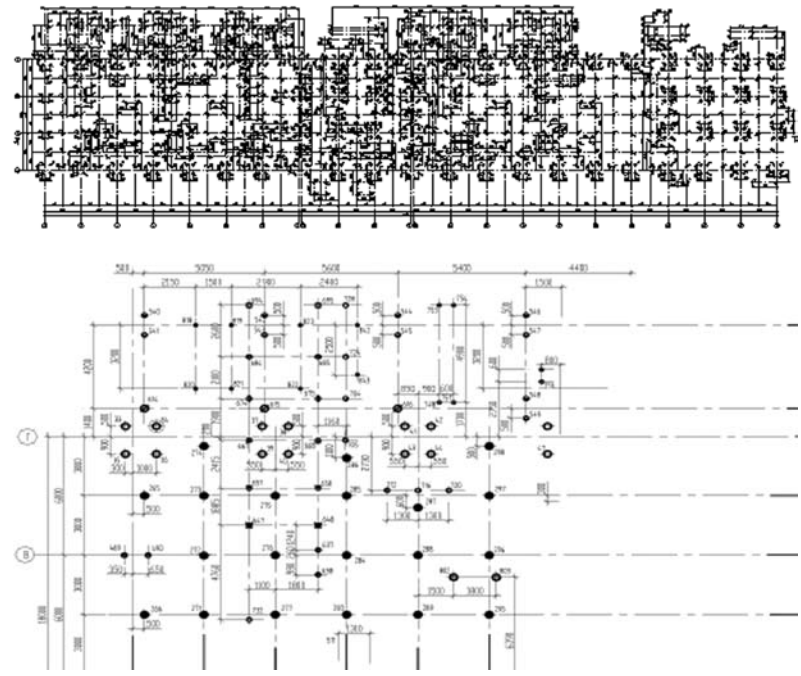


Рисунок 1 - Свайное поле с привязками к осям здания

В соответствии с техническим заданием от главного инженера проекта и генпроектировщика на разработку рабочей документации фундаментов и температурной стабилизации грунтов основания, необходимо запроектировать основание здания с полами по грунту

После изучения и анализа материалов инженерно-геологических изысканий и выполнения расчёта свайного основания стало понятно, что при существующем состоянии грунтов несущая способность свай недостаточна для восприятия заданных нагрузок от веса конструкций и оборудования.

Далее, в соответствии с требованием СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» при использованию грунтов по первому принципу, было определено, при какой температуре грунтов несущая способность свай достаточна для восприятия заданной нагрузки от веса конструкций здания и фундаментов под оборудование. После этого была разработана конструкция ростверков и фундаментов под оборудование и вычерчено свайное поле с привязками к осям здания (см. рисунок 1).

Далее, используя аналоги ранее разработанных проектов со схожими грунтовыми условиями, была вычерчена предварительная схема систем ГЕТ и ВЕТ температурной стабилизации грунтов основания. Для системы ГЕТ шаг основных стальных труб принят 0,5м, для резервных полиэтиленовых труб шаг 1,0м. Шаг труб охлаждающих вертикальных (ТОВ) для системы «ВЕТ» принят 2х3 м. После определения количество блоков для всех систем и размещения их на генплане, была передана выкопировка из генплана с местами расположения блоков на согласование ген-проектировщику.

Далее был вычерчен разрез по схемам, с указанием слоев грунтов по ближайшей скважине и их характеристиками и выдано задание в группу прогнозных расчетов с приложением схемы ТСГ, разреза (см. рисунок 2), таблицы температур грунтов, указанием температуры грунтов, до которой необходимо заморозить грунты и поддерживать её в период эксплуатации объекта.

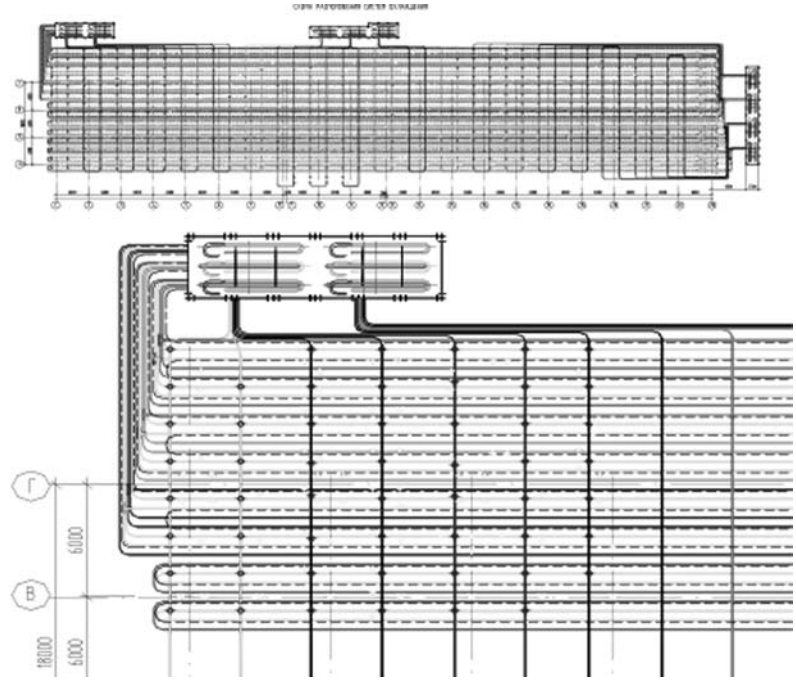


Рисунок 2 - Раскладка труб систем ГЕТ и ВЕТ. Задание на прогноз.

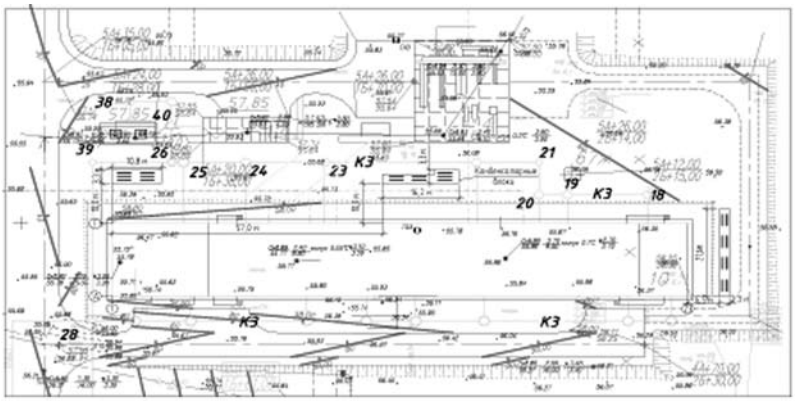


Рисунок 3 - Расположение конденсаторных блоков на генплане. I вариант.

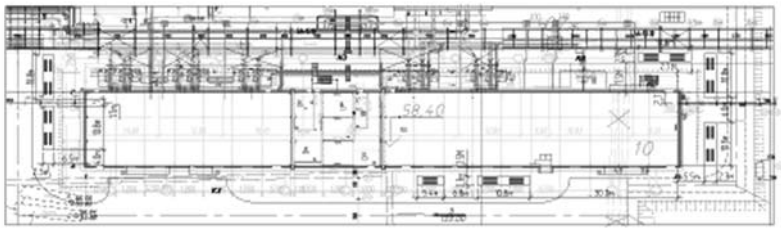


Рисунок 4 - Схема расположения труб систем ГЕТ



Рисунок 5 - Схема расположения труб систем ВЕТ

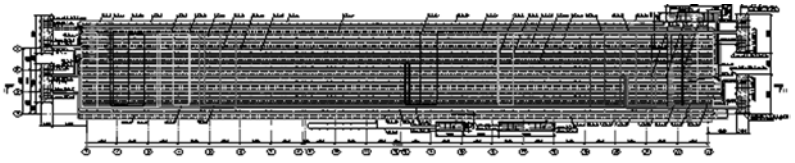


Рисунок 6 - Схема расположения систем охлаждения после прогноза

Расположение блоков на генплане генподрядчик не согласовал, так как к заданию не была приложена схема сетей и блоки попали на колодцы подземных сетей.

По результатам Прогнозного расчёта расстановка ТОВ была изменена (уменьшился шаг ТОВ по контуру до 1,5м и увеличилась длина ТОВ с10м до 12м,), в результате количество блоков конденсаторных увеличилось с 21 до 26 шт (см. рисунок 7)

Повторно была отправлена на согласование схема расположения блоков конденсаторных на генплане, одновременно была продолжена работа над проектом: – вычерчены общие листы (схема обвязки блоков. схемы отрывки котлована, раскладки пеноплекса схемы отдельных ОХЛ и другое), был подготовлен лист Общие данные.

После получения согласования посадки блоков конденсаторных на генплане, проект был доработан (начерчены схемы каждой системы ОХЛ) и чертежи сданы на нормо – контроль, готовый проект передан ГИПу.

Выводы:

1. Обобщен опыт проектирования и строительства на ВМГ.
2. Систематизированы основные схемы и конструктивные решения при проектировании и строительстве на ВМГ.
3. Предложены алгоритмы принятия проектных решений в процессе проектирования и строительства здания и сооружений на ВМГ.
4. Показано место и роль систем термостабилизации грунтов оснований разработанных ООО НПО «Фундаментстройаркос» в общей системе конструктивных решений при проектировании и строительстве на ВМГ.
5. Описанные в статье подходы и алгоритмы принятия проектных решений нашли отражение в нормативном руководящем документе. Разработанном научной частью ООО

НПО «Фундаментстройаркос» в формате стандарта организации «Руководство по проектированию систем температурной стабилизации оснований зданий и сооружений».

Список литературы

1. Кутвицкая Н.Б., РязановА.В., Дашков А.Г. Обеспечение устойчивости опор трубопроводов обвязки газовых и нефтяных добывающих скважин в условиях распространения вечномерзлых грунтов./ Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов», 21-24 апреля 2008, Тюмень, с.123-126.

2. Марамыгина М.С., Долгих Г.М., Окунев С.Н. Опыт применения глубинных сезоннодействующих охлаждающих устройств./ Там же, с.126-129.

3. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность, и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений./ Там же, с.34-39.

4. Андреев М.А., Миронов И.А., Терентьев А.В. Устройство оснований и фундаментов нефтяных резервуаров в сложных условиях Заполярья./ Промышленное и гражданское строительство, № 9, 2006, с. 35.

ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА НА «ВЕЧНОЙ» МЕРЗЛОТЕ

А.И. Андриянов

ОАО «Проекттрансстрой», г. Москва, pts@ptst.ru

В данной работе проведен некоторый временной мониторинг на таком строительном долгострое, как железная дорога Беркакит-Томмот-Якутск». Период наблюдения охватил восьмидесятые годы прошлого столетия и до настоящего времени.

Показано неоднозначное воздействие на мерзлую толщу тех или иных природных факторов во взаимодействии с самой железной дорогой. Сделана попытка показать, что геолого-географическая среда в зоне криолитозоны находится во взаимодействии (и противодействии) более широкого спектра факторов, приводящие к тем или иным деформациям.

Изыскания, проектирование и строительство железнодорожной линии Беркакит-Томмот-Якутск начались еще в начале восьмидесятых годов. Изыскания на стадии «проект» сделали на всю трассу, но построить успели только до Томмота.

Следующий этап изысканий и строительства начался в начале 2005 года. Изыскания закончились, а строительство продолжается по сей день. Весь этот долгострой был вызван печально известными событиями развала страны и безденежья девяностых.

Но нет худа без добра. Благодаря длительному перерыву в строительстве появилась уникальная возможность сравнить и проанализировать инженерно-геокриологическую разновременную ситуацию. К сожалению, серьезных исследований в этом направлении не проводились и строительство на трассе Томмот-Кердем, на мой взгляд, ведется без анализа и учета изменений инженерно-геокриологической ситуации до и после строительства. Позвольте мне, участнику изысканий как прошлых,так и нынешних, поделиться некоторыми своими впечатлениями и наблюдениями. Иными словами, провести некоторый мониторинг как по построенной трассе, так и на участке, где изыскания проводились дважды с интервалом в два десятка лет.

Динамика температур грунтов во времени (мониторинг) важна и интересна на участке уже построенной ж.д. Беркакит-Томмот.

Проведенные в 2003-2004гг исследования институтом «Проекттрансстрой», показали в частности понижение температуры грунтов под земляным полотном на участке развития подземных льдов (км 32, 36-37) при одновременном увеличении глубины сезонного оттаивания. Увеличение глубины протаивания мы получаем из-за попадания значительной части ливневой воды под насыпь, что способствует «слизыванию» подземных льдов, а так же дополнительного прогрева тела насыпи с трех сторон, Попадание воды под насыпь происходит из-за сильной трещиноватости алевролитов и песчаников. Необходимо отметить, что контакт воды с подземными льдами происходит во второй половине сентября, когда глубина сезонного оттаивания достигает данных льдов. Очевидно, что зарегулированный сток воды не привел бы к данному контакту и не принес бы данных деформаций. Иными словами, при благоприятном температурном режиме мы получаем неблагоприятные последствия. Поэтому искусственное или естественное понижение температуры грунтов не всегда является спасительной панацеей. Необходим учет и прогноз комплекса факторов, а также процессов, влияющих на данные факторы.

Мониторинг температурного режима выявил некоторую закономерность, а именно: на насыпях от двух и более метров верхняя граница ММП, как правило, входит в тело насыпи (км 37).

Хочу обратить внимание также на участок трассы, где строительство только начинается, там прорублена только просека зимой 2006-2007 года. Это «ледовый комплекс» Абалахской террасы р.Лены, на котором есть отрезок лесной дороги на ферму, отсыпанный глыбово-щебенистым грунтом. Высота полотна дороги не более полуметра. Частично нарезаны канавы, правда, без учета уклонов, так как в них стоит вода. Протяженность отрезка дороги около 7-8 км. На всем протяжении дороги наблюдается только один катастрофический на мой взгляд термокарстовый провал-понижение



Фото 1 - Термокарст на дороге

Фото 2 - В целом состояние дороги удовлетворительное



неправильной формы размером до 15 -20 метров, глубиной до 1-1,5 метров. См. фото 1.

Эта термокарстовая воронка явно связана с контактом ледяной жилы и надмерзлотных вод. Иными словами – вода «лизнула» лед. В целом же, если учесть низкое инженерно-техническое исполнение сооружения и минимальную высоту насыпи, то деформации данной дороги можно считать

минимальные. Частичные деформации в основном наблюдаются на нулевых местах с избыточным переувлажнением. По подросту кустарника и деревьев на откосах насыпи, возраст дороги можно оценить не менее 10 лет. См. фото 2.

В районе мостового перехода р. Кирим просеку рубили ранней весной. И в наступившее следом снеготаяние на этом участке произошло вытаивание сильнольдистых грунтов с соответствующими просадками. Просадки прошли по старой колее грунтовой дороги, поперек насыпи. См. фото 3.



Фото 3 - Новая термокарстовая форма на вырубленной просеке.

Фото 4 - Вода пошла под трубу, т.к. труба была забита льдом.



Данная термокарстовая форма на просеке в районе р. Кирим не является следствием протаивания ледяной жилы, т.к. деформация строго повторила контур старой колеи лесной дороги. То есть налицо процесс термокарста просто по льдистым грунтам (например, ледогрунт). Следует отметить, что этот участок деформации в половодье был затоплен. Возникает вопрос: почему не вытаяли льды? А если они не вытаяли, то все ли так страшно?

И еще вопрос: как поведет себя при строительстве притрассовая автодорога? Простоит она отведенное ей время или «утонет» в первое же половодье. Как поведут себя выемки?

Протяженность просадочной формы несколько десятков метров максимальной шириной до 5 метров и глубиной от одного до полутора метров.

Данный процесс говорит в пользу той версии, что не удастся избежать деформаций на начальном этапе даже при идеальном проектном исполнении.

Вырубкой леса мы нарушили ее «неустойчивое равновесие», в частности альбедо, растительный и моховой покров, условия впитываемости и дренажа и природа на это тут же отреагировала.

Районирование территории по температуре грунтов, написанное во всех учебниках, на мой взгляд шаблонное и излишнее. Очевидно, что долины и низины всегда и везде более проморожены, нежели водоразделы, а южный склон теплее северного. При строительстве железной дороги, которая становится запрудой для огромного количества воды, гораздо важнее знать и изучать прогноз и изменение гидрологического режима, который в свою очередь приведет к изменению температурного режима и поведению многолетнемерзлых пород во времени и пространстве. Важно знать, как эти изменения отразятся на самой железной дороге.

В продолжение хочу сказать несколько слов по гофрированным водопропускным трубам.

Их деформации при гораздо более благоприятных инженерно-геокриологических условиях заставляют посмотреть на данную проблему с другой точки зрения.



Фото 5 - Непредсказуемые и катастрофичные процессы суффозии на Бестяхской террасе

Фото 6 - Процессы термоэрозии по дороге на Бестяхской террасе



Водопропускную трубу необходимо рассматривать только в сочетании с прилегающим к ней земляным полотном. А коли это так, то очевидно, что нагрузки под трубой (по крайней мере статические) значительно меньшие, нежели под земляным полотном, в силу пустотности трубы. О динамических нагрузках пока говорить рано, хотя динамические нагрузки (на мой взгляд) приведут к деформации трубы, а не **грунтов оснований**, о чем говорят многочисленные подпорки в трубах. Геокриологическая обстановка под трубой должна ужесточиться, чему способствует сама скважность трубы. Но эта схема работает только при отсутствии контакта текучей воды с мерзлотой, хотя именно эту схему, как правило, мы обеспечить не в состоянии. Именно талая текучая вода буквально «сжирает» наши грунты оснований и приводит к деформациям труб, а не статические и динамические нагрузки. **Иными словами, нагрузки тепловые.** См. фото 4.

Очевидно, что основной причиной деформаций является вода (поверхностный сток), которая попадает под тело насыпи и под трубы. Тому немало примеров. Определенная часть канав, траншей, кюветов не справляется со своей задачей. Часть воды, и возможно немалая, уходит в грунт или

в насыпь.

Возможно также, что защитные экраны на трубах не полностью отсекают воду в нужном направлении. Не исключено, что часть воды обходит данные экраны.. На мой взгляд, вертикальные экраны не в полной мере справляются со своей задачей, нежели экраны горизонтальные или субгоризонтальные.

Мы все пытаемся сделать геолого-географической среде «стоп-кадр» после нарушения ее естественного состояния. Мы нарушили ее точку «нуля» и она обязательно придет в движение, чтобы вернуться в свою новую точку «нуля».

Резюмируя сказанное, хочу отметить, что большая часть деформаций связана с неправильным исполнением проекта: несоблюдение уклонов, дренажные свойства насыпи из за повышенной трещиноватости, что приводит к подпруживанию, а не транзиту воды. Хотя, как я говорил выше, даже идеальное исполнение проекта не избавит нас от деформаций в начальный период. И весьма ошибочным, на мой взгляд, является мнение о необходимости и правомерности вырезки и замены сильнольдистых грунтов на непросадочные. Проблема вырезки грунтов несколько преувеличена. Природная среда обладает своим определенным запасом «устойчивости» к внешним воздействиям, которая изменяется от широты местности. Как это не парадоксально, данная «устойчивость» уменьшается к северу и увеличивается к югу. Этим объясняются катастрофические последствия разового проезда вездехода в северной тундре и вполне «безобидная» техногенная освоенность южных районов мерзлоты, где температуры грунтов близки к нулю градусов. **Вырезая грунты и меняя их на несвойственные первичным, мы тем самым уменьшаем данную природе «устойчивость»**.

Вполне «удовлетворительное» состояние дороги на ферму на «ледовом» комплексе и непредсказуемый катастрофичный термокарстовый процесс по старой колее дороги, а также сохранность самих льдов говорит о более сложном комплексном процессе в экосистеме: атмосфера – грунт – вода. См. фото 5, 6.

Необходимо осознать, что целью человека является не сохранение естественных геолого-географических условий, а сохранение самой дороги и минимизация затрат при ее эксплуатации. Природные условия мы нарушаем при строительстве и природа сама себя восстановит без нашего на то согласия и влияния. Задача мониторинга – найти точки наиболее гармоничного соприкосновения природной среды с данной железной дорогой. То есть, предметом изучения является сама дорога (выемка, насыпь и т.д.), но в сочетании с прилегающим к ней природным комплексом. Мониторинг одного природного комплекса без дороги не имеет смысла и значения.

В заключение хочу озвучить, вероятно, для многих крамольную и антинаучную мысль.

Не секрет, что человеческое общество и природная среда развиваются по общим законам. И ошибочно полагать, что человек придумал эти законы. Коли среда и общество развиваются по общим законам, то весьма губительными, или в лучшем случае болезненными являются все радикальные меры воздействия на среду и общество. В нашем обществе такими радикальными мерами явилась перестройка, о которой мы знаем не понаслышке.

Уже давно и многими озвучивается теория о существовании общего космического разума, который контролирует и корректирует наши поступки. И развал нашей страны был необходимой вынужденной мерой для предотвращения неизбежной на тот момент переброски северных рек. Ибо это, так называемое воздействие было уже не болезненным, а губительным для среды.

Очень надеюсь, что этот высший разум, да и наш с вами разум и здравый смысл, не дадут нам возможности для губительного воздействия на природную среду.

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ УСТЬЕВ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Т. И. Тищенко, А. Ю. Гусев

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

В процессе проектирования систем температурной стабилизации грунтов оснований устьев нефтяных скважин Южно-Хыльчуюского месторождения, обустройства Ванкорской группы месторождений, а также проектирования, монтажа и эксплуатации устьев газовых скважин Бованенковского НГКМ выявлен ряд факторов, влияющих на работу как систем температурной стабилизации грунтов основания так и добывающих скважин. С учетом выявленных факторов и полученного опыта проектирования производится постоянная модернизация систем температурной стабилизации устьев добывающих скважин.

Для сохранения устойчивости и обеспечения минимальных деформаций грунтового основания приустьевой зоны газовых и нефтяных скважин, грунты основания должны использоваться по I принципу (согласно СНиП 2.02.04-88). С целью предотвращения оттаивания пород за пределами минимального радиуса растепления в устьевой зоне действующих скважин применяются сезоннодействующие парожидкостные колонки малого диаметра.

Геологические и геокриологические условия на площадках кустов нефтяных и газовых скважин характеризуются значительными отличиями в свойствах грунтов, таких как температура грунта, степень засоленности, льдистость, степень заторфованности и наличие прослоек льда в толще грунтов. Необходимо учесть все негативные факторы, влияющие на работу скважины и ухудшающие устойчивость её основания. При работе скважины выделяется значительное количество тепла, что приводит к повышению температуры окружающего грунта. Переход из твердомерзлого или пластичномерзлого состояния грунтов в охлажденное или талое, сопровождается потерей несущей способности основания, которые приводят к значительным просадкам устьевой зоны, деформациям скважин и обвязки.

На некоторых кустах в толще грунтов присутствует значительное количество торфа и льда, которые при растеплении дают значительные осадки. Перед монтажом системы стабилизации их желательно извлекать и засыпать освободившийся объём непучинистым грунтом. Часто при проектировании системы температурной стабилизации (ТСГ) возникает проблема сильно засоленных и сильно льдистых грунтов. Температуры фазового перехода у таких грунтов низкие и обеспечить их твердомерзлое состояние довольно сложно. Пластичномерзлые и твердомерзлые сильнольдистые грунты при растеплении становятся просадочными. Таким грунтам требуется уделять больше внимания при расстановке охлаждающих труб.

Условия задачи по замораживанию грунтов основания нефтяных и газовых скважин должны удовлетворять ряду критериев:

- в течение всего года температура на стенке кондуктора скважины должна быть положительной;
- ореол оттаивания грунтов вокруг скважины должен иметь минимальные размеры;
- грунты основания площадки должны находиться в твердомерзлом состоянии.

Проектирование первых систем температурной стабилизации ВЕТ грунтов основания устьев нефтяных и нагнетательных скважин на Южно-Хыльчуюском месторождении было выполнено в 2007г. Кусты скважин Южно-Хыльчуюского месторождения расположены на участке многолетнемерзлых грунтов. Многолетнемерзлые грунты площадок куста представлены слабозаторфованными мерзлыми песками и мерзлыми суглинками. Талые грунты представлены водонасыщенным пылеватым песком и суглинками тугопластичными и полутвердыми. Температуры грунтов основания на период изысканий (апрель 2006) на глубине 10м колеблются от минус 0,3 до минус 2 ºС

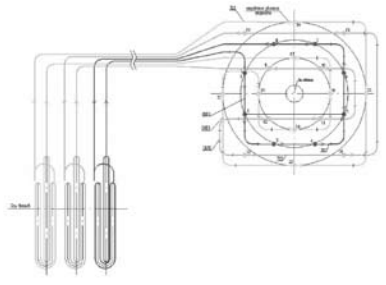
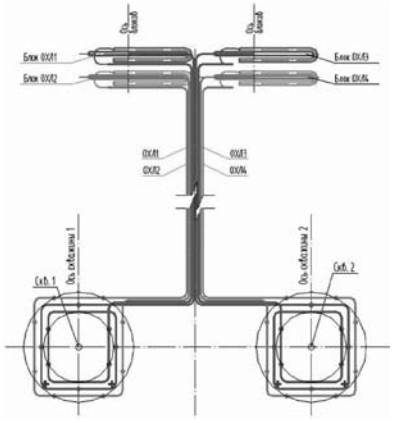


Рисунок 1 - Система температурной стабилизации нефтяной скважины куста 1 Южно-Хыльчуюского нефтегазового месторождения

Рисунок 2 - Система температурной стабилизации площадки куста скважин № 3 обустройства Ванкорской группы месторождений



На рисунке 1 показана одна из схем раскладки системы температурной стабилизации грунтов основания для куста скважин № 1 Южно-Хыльчуюского нефтегазового месторождения. Схема включает три автономные системы охлаждения для каждой скважины. Вертикальные охлаждающие трубы (ТОВ) расположены в три осесимметричных контура радиусами R1=1,2м, R2=1,8м, R3=2,4м вокруг эксплуатационных скважин. Длина ТОВ – 14 метров. Количество ТОВ в каждом контуре – 8 шт. Всего возле каждой скважины 24 ТОВ.

Обязательными условиями максимально эффективной работы системы охлаждения Южно-Хыльчуюского нефтегазового месторождения являлось следующее:

- все земляные работы по монтажу систем, укладке утеплителя и засыпке производятся только в зимний период и заканчиваются не позднее мая первого года строительства;
- в первый год работы системы ВЕТ нефтяная скважина не работает. В первый зимний период происходит замораживание грунтов охлаждающими трубами;
- во второй год работает система охлаждения ВЕТ и нефтяная скважина, температура нефти в которой достигает плюс 57 ºС (скважина не теплоизолирована).

Прогнозными расчетами подтверждается, что применение систем ВЕТ ограничивает радиус оттаивания грунта вокруг устья скважины до одного метра.

Для сохранения накопленной мерзлоты, дополнительно укладывается слой поверхностной теплоизоляции из пеноплэкса.

Дальнейшее проектирование ТСГ оснований эксплуатационных скважин – это Ванкорское и Бованенковское месторождения. Кусты скважин Ванкорской группы месторождений расположены на участке многолетнемерзлых грунтов. Многолетнемерзлые грунты площадок кустов преимущественно представлены супесями и суглинками твердомерзлыми льдистыми и слабольдистыми, песками мелкими твердомерзлыми слабольдистыми. Температуры грунтов основания на период изысканий колеблются от минус 1,6 до минус 4,9 ºС на глубине 10 м.

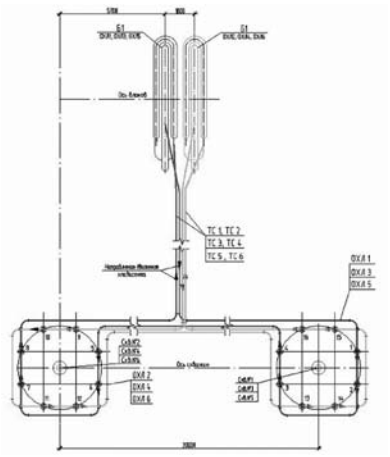


Рисунок 3 - Обустройство Бованенковского НГКМ (2009 г.). Система температурной стабилизации площадки куста газовых скважин № 28 с одним контуром

На обустройстве Ванкорской группы месторождений использована аналогичная схема систем температурной стабилизации (ТСГ) как в Южно-Хыльчуюском месторождении. Изменения коснулись лишь раскладки систем температурной стабилизации, которая теперь состоит из двух автономных систем охлаждения для каждой скважины. ТОВы расположены в двух кольцевых осесимметричных контурах вокруг эксплуатационных скважин с радиусами контура R1 = 1,5м и R2 = 2,0м (рис. 2). Уменьшить количество контуров стало возможным благодаря более благоприятным условиям:

- температура нефти в скважине плюс 40 ºС (для сравнения – плюс 57 ºС на Южно-Хыльчуюском нефтегазовом месторождении);
- температура грунтов более низкая;
- скважина теплоизолирована (полиуретан толщиной 145 мм).

В административном отношении площадки кустов газовых скважин сеноман-аптских залежей Бованенковского НГКМ находятся на территории Ямальского района Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области. Геологические условия на площадках кустов характеризуются значительными отличиями в свойствах грунтов от незасоленных и слабозасоленных до сильнозасоленных. Температуры грунтов низкие, от минус 1,6 до 5,4 ºС, но так как грунты засолены, то в основном грунты находятся в пластичномерзлом состоянии. На Бованенковском НГКМ необходимо заморозить основание газовых скважин при следующих исходных данных:

- температура газа в скважине равна плюс 28 ºС (в последующих проектах температура газа уменьшилась до 22 ºС);

Таблица 1 - Данные по температурам в устье скважины на начало летнего периода

Глубина, м	Термометрическая труба ТТ1, ºС	Термометрическая труба ТТ2, ºС
1	-9,4	-7,8
2	-5,1	-0,6
3	-2,4	-0,6
4	-1,0	-1,2
5	-1,1	-1,2
6	-1,3	-1,3
7	-1,2	-1,3
8	-1,4	-1,3
9	-1,4	-1,3
10	-1,3	-1,3

- скважины в основном неутепленные и только на последних кустах № 54, 55, 65, 68 заказчик принял утепление в виде теплоизолированной лифтовой трубы толщиной 57 мм);
- наличие на глубине 0,5 м вокруг скважины теплоизоляционного экрана из пеноплэкса толщиной 200 мм.

При проектировании систем ТСГ на обустройстве Сеноман-аптских залежей Бова-

ненковского НГКМ для кустов газовых скважин ГП2 в зависимости от состояния грунта применялись схемы как с одним осесимметричным контуром радиусом R=1,4 м (рис. 3, 4), так и с двумя контурами R1 = 1,6 м, R2 = 2,0 м (рис. 5). Охлаждающие трубы (длиной 13м) располагались вокруг ствола скважины на окружности с одинаковым шагом вдоль этой окружности.

Наглядным примером необходимости термостабилизации грунтов в устьях скважин служит пример включения в работу скважины № 6300 Бованенковского НГКМ без системы температурной стабилизации. Скважина расположена в зоне погребенного льда и сильнольдистых грунтов. Во время эксплуатации данной скважины, приустьевая зона стала оттаивать и проседать, необходимо было

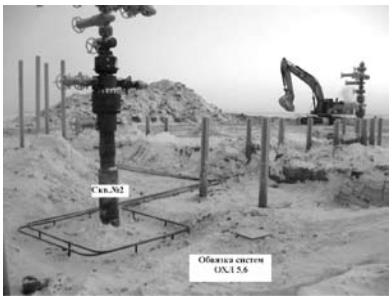
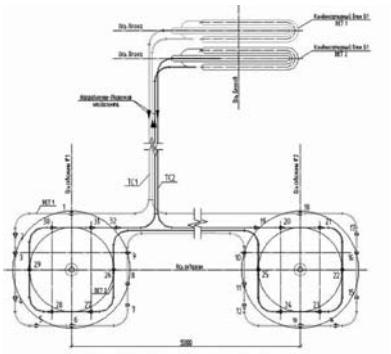


Рисунок 4 - Куст газовых скважин №29. Монтаж системы ВЕТ ноябрь 2010г.

Рисунок 5 - Обустройство Бованенковского НГКМ. (2010 г.) Система температурной стабилизации площадки куста газовых скважин № 52 с двумя контурами

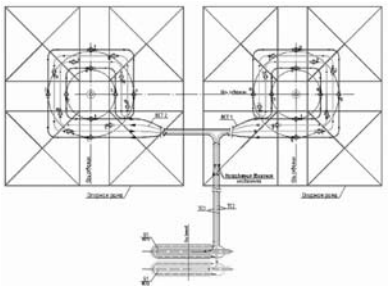


постоянно добавлять грунт в больших объемах вместо просевшего. Возникла необходимость срочной термостабилизации грунтов основания устья скважины. Так как грунт был уже растеплен, то система ВЕТ, не успев заморозить основание, ушла вместе с постоянно проседающим грунтом. Было принято решение остановить работу скважины, смонтировать новую систему ВЕТ на опорной раме для предотвращения её просадки (рис. 6). Сейчас начинается первый цикл охлаждения системы ТСГ, скважина пока не работает. Через год после проморозки основания устья скважины будет проведен



Рисунок 6 - Опорная рама скважины № 6300 для установки системы температурной стабилизации (зима 2011 г.)

Рисунок 7 - Обустройство Бованенковского НГКМ. (2011 г). Двухконтурная система температурной стабилизации площадки куста газовых скважин № 47 с опорной рамой



мониторинг температуры грунтов и сделаны соответствующие выводы.

Последние замеры температур были произведены в начале марта 2011 года, после монтажа новой системы ВЕТ. Данные по температурам в устье скважины на начало летнего периода непосредственно после монтажа системы охлаждения приведены в таблице 1.

В начале 2011 года с учетом опыта заморозки устья скважины № 6300 в проектах ТСГ, эксплуатационные скважины, где в основном залегают сильнольдистые (просадочные при оттаивании) грунты, во-избежание просадки под каждую систему ВЕТ устанавливается опорная рама. В ходе проектирования систем ВЕТ устьев газовых скважин происходит постоянное совершенствование раскладки охлаждающих труб исключающих их пересечение, тем самым уменьшая взаимодействие хладагента от конденсатора и испарителя, а также, исключая взаимный контакт поверхностей труб во избежание разрушения защитного покрытия. Все вышеперечисленные меры повышают надежность систем ТСГ.

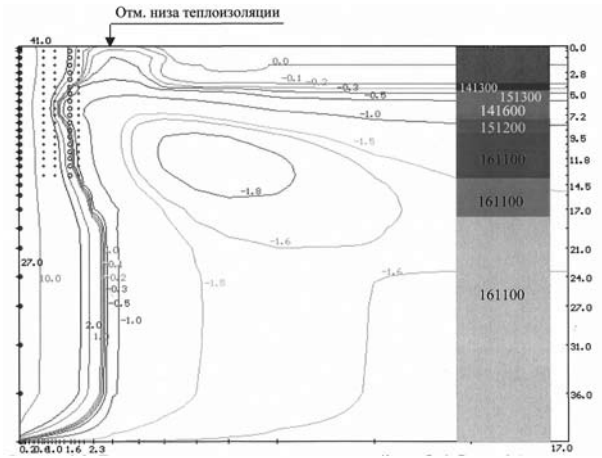


Рисунок 8 - Температура грунта на конец лета первого года эксплуатации газовых скважин куста № 26 с системой охлаждения по прогнозу

Схема расстановки охлаждающих труб с с опорной рамой, показана на рисунке 7 для куста скважин № 47.

Скважин № 26 по термометрическим трубам после первого цикла работы системы ВЕТ

Термометрическая труба ТТ1 находится внутри охлаждающего контура на расстоянии 1,8 м от устья скважины. Труба ТТ2 находится за пределами контура охлаждения на расстоянии 4,5 м. На рисунке 8 показано распределение температур с учетом работы скважины 1 куста №26 при наихудших условиях по прогнозу.

При проектировании во второй половине

Таблица 2 - Фактические температуры грунтов основания куста газовых,

Глубина, м	Куст 26 (15.08.2011) Фактические замеры		По прогнозу	
	ТТ1, ºС	ТТ2, ºС	ТТ1, ºС	ТТ2, ºС
1				
2				
3	-0,7	-0,8	+1,0	0,0
4	-2,4	-2,5	+0,6	-0,1
5	-3,4	-3,3	-0,2	-0,2
6	-4,0	-3,9	-0,4	-0,7
7	-4,3	-4,2	-0,7	-1,1
8	-4,2	-4,1	-0,7	-1,4
9	-4,1	-4,2	-0,7	-1,7
10	-4,1	-4,1	-0,6	-1,7

2011 года систем ТСГ, на обустройстве валанжинских залежей Самбургского месторождения для кустов газовых скважин применялась схема с четырьмя осесимметричным контурами различного радиуса (рис. 10). Схема с большим количеством контуров и вертикальных охлаждающих труб (32 шт) обусловлена отсутствием теплоизоляции скважин и достаточно высокой температурой газа +35 ºС.

По результатам полученных данных можно сделать вывод, что системы ВЕТ эффективно произвели заморозку приустьевой зоны газовых скважин с запасом в сравнении с прогнозом и при вводе их в эксплуатацию можно рассчитывать на надежную и безаварийную работу. В дальнейшем необходимо производить регулярный мониторинг температур приустьевой зоны, и сравнивать полученные данные с данными прогноза, что будет возможно после включения в работу непосредственно самих скважин. Полученные данные позволят в полной мере оценить эффективность систем ВЕТ при термостабилизации устьев нефтяных и газовых скважин.



Рисунок 9 - Куст газовых скважин №26. Монтаж системы ВЕТ октябрь 2010г.

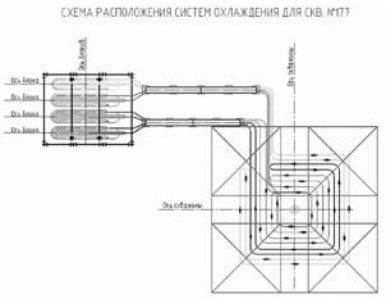


Рисунок 10 - Обустройство валанжинских залежей Самбургского месторождения. Четырехконтурная система температурной стабилизации площадки газовой скважины № 177 с опорной рамой и защитными коробами

Список литературы

1 СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2005. – 52 с.

2 ТУ 3642-004-54098700-2006 Системы и установки криогенные/ ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень, 2006.

3 Рекомендации по определению прочности мерзлых грунтов с морским типов засоления/ ФГУП ПНИИИС Госстроя России, Москва 2001.

4 Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах / НИИ оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР – М.: Стройиздат, 1980. – 303 с.

5 Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах/ Стройиздат Ленинградское отделение, Ленинград 1977. – 551 с.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГРУНТОВ

Г.В. Аникин, С.Н. Плотников

Институт криосферы Земли СО РАН, г. Тюмень
e-mail: anikin@ikz.ru, plotnikov59@yandex.ru

Проведен анализ и компьютерный расчет работы систем горизонтального охлаждения грунтов. Рассмотрены случаи турбулентного и ламинарного течения жидкого и газообразного хладагента. Рассчитаны параметры системы горизонтального охлаждения грунтов при средней температуре хладагента -200С.

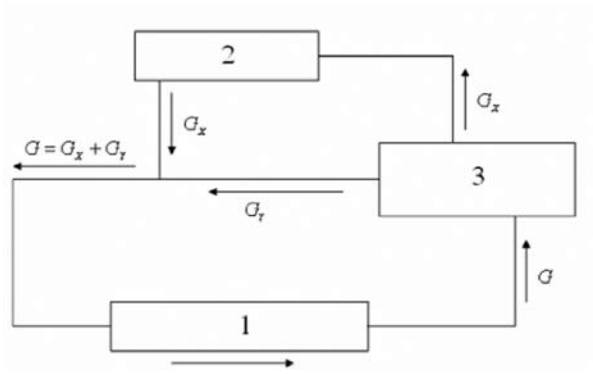


Рисунок 1 - Блок-схема установки: 1– испаритель; 2- конденсатор; 3- сепаратор.

В настоящее время основная добыча и транспортировка энергоносителей (нефть, газ) в России происходит в криолитозоне, где и находится большинство эксплуатируемых месторождений. Поэтому особое значение приобретает вопрос надежности и устойчивости оснований и фундаментов, строящихся в условиях вечной мерзлоты. Одним из инженерных решений этой проблемы является использование парожидкостных термосифонов [1], а также систем горизонтального и вертикального охлаждения грунтов [2] для стабилизации оснований.

В данной статье проведен компьютерный расчет работы системы горизонтального охлаждения грунтов типа «ГЕТ» (горизонтальная естественно-действующая трубчатая система) [2]. Блок-схема установки приведена на рис.1

Испаритель представляет из себя расположенную в основании сооружения протяженную стальную трубу уложенную горизонтально в виде прямолинейных участков, чередующихся с поворотами на 90-180 градусов. В испарительной части протекает хладагент (аммиак), который воспринимает тепловой поток, подводимый через стенку трубы от окружающего грунта.

Конденсатор системы состоит из набора оребренных теплоотводящих труб, вмонтированных в замкнутый трубчатый коллектор. Конденсаторный блок отвечает за отвод тепла принятого испарителем в атмосферу.

Сепаратор служит для отделения жидкой части теплоносителя от его паров и представляет из себя стальную трубу большего чем испаритель диаметра. В следствии этого в сепараторе замедляется движение парожидкостного потока и происходит осаждение капель хладагента, что приводит к разделению жидкой и паровой части теплоносителя. Введем следующие обозначения:

G_X- поток хладагента из сепаратора в конденсатор (кг /с)
G_Y - поток хладагента из сепаратора в испаритель (кг /с)
G_G - поток пара (кг/с)
G_L - поток жидкости (кг/с)
G - полный поток хладагента (кг/с)
Введем также следующие величины
U - полная тепловая нагрузка (Вт)
$f = \frac{G_Y}{G_X}$ - отношение потоков
$P_н$ - давление насыщенных паров (Па)
$A(t) = \frac{dP_H(t)}{dt}$ - производная от давления насыщенных паров по температуре (Па/гр)
L_i - длина испарителя (м)
L_H - длина участка нагрева (м)
H - высота столба жидкости над уровнем испарителя в установке (м)
q - тепловая нагрузка на единицу длины испарителя (Вт/м)
h_c - теплота испарения хладагента в конденсаторе(Дж/кг)
h_i - теплота испарения хладагента в испарителе (Дж/кг)

Кроме того выполняется соотношение $G_X = \frac{U}{h_c}$ (1)

означающее, что все тепло выделяющееся при конденсации, уходит в атмосферу и равно теплу, получаемому испарителем. В испарителе имеется два участка: участок нагрева, на котором температура хладагента нагревается до температуры кипения и участок кипения. Пусть длина участка

нагрева равна zh.

Будем считать, что тепловая нагрузка распределена по длине трубы равномерно, тогда для участка нагрева получаем

$$c_{pL}(t_{max} - t_c)G = U\frac{z_H}{L_i} \quad (2)$$

здесь - удельная теплоемкость жидкого хладагента, - температура кипения в испарителе, – температура кипения в конденсаторе, G- полный поток, Li- длина испарителя, U- полная тепловая нагрузка на испаритель.

Очевидно, выполняется соотношение

$$(t_{max} - t_c) = \frac{\rho_L g H}{A} \quad (3)$$

где – плотность жидкого хладагента, - ускорение свободного падения, - высота столба жидкости, A- производная от давления насыщенных паров по температуре. Из (2) и (3) получаем

$$y_H = \frac{z_H}{L_i} = \frac{c_{pL}G}{U}\frac{\rho_L g H}{A} \quad (4)$$

На участке кипения выполняется соотношение

$$h_i G_X = \frac{U(L_i - z_H)}{L_i} + Q \quad (5)$$

где Q- тепло отдаваемое хладагентом на испарение (сам хладагент при этом охлаждается), - теплота испарения в испарителе, - поток пара на выходе из испарителя. Введем величину , дающуюся следующим выражением

$$\varepsilon = \frac{h_c - h_i}{h_c} \quad (6)$$

h_c- теплота испарения в конденсаторе. Из (1), (5) и (6) получаем

$$Q = U(y_H - \varepsilon) \quad (7)$$

Полагая, что Q распределено по участку кипения линейно, что справедливо в случае малого изменения температур в испарителе, получаем следующее уравнение для изменения потока пара по длине испарителя

$$h_i \frac{dG_G}{dz} = \frac{U}{L_i} + \frac{Q}{L_i - z_H} \quad (8)$$

где z- длина от начала испарителя до рассматриваемой точки. Введем относительную длину, задающуюся выражением

$$y = \frac{z}{L_i} \quad (9)$$

Тогда, решая уравнение (8), с учетом (7), для полного потока пара при получаем

$$G_G(y) = \frac{U(y - y_H)(1 - \varepsilon)}{L_i h_c (1 - y_H)} \quad (10)$$

Или с учетом (6)

$$G_G(y) = \frac{U(y - y_H)}{L_i h_c (1 - y_H)} \quad (11)$$

Поток жидкости на участке кипения дается следующим выражением

$$G_L(y) = G - G_G(y) \quad (12)$$

Рассчитаем теперь гидродинамическое сопротивление системы. На любом участке, где имеется и пар и жидкость, сопротивление дается выражением

$$\Delta P_F = \Phi_L^2 \Delta P_{FG} = \Phi_G^2 \Delta P_{FG} \quad (13)$$

где ΔP_{FL} - сопротивление однофазного потока жидкости величиной $G_L(y)$,

ΔP_{FG} - сопротивление однофазного потока газа величиной $G_G(y)$. Φ^2_L и Φ^2_G задаются следующими выражениями[3]

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{c}{x} + \frac{1}{x^2} \quad (14) \qquad \Phi_G^2 = 1 + CX + X^2 \quad (15) \qquad X = \sqrt{\frac{\Delta P_L}{\Delta P_G}}, \quad (16)$$

Константа C задается таблицей №1.

Для сопротивления трения на участке длиной dz получаем

Таблица 1 - Константа C`

жидкость	газ	C
турбулентная	турбулентный	20
ламинарная	турбулентный	12
турбулентная	ламинарный	10
ламинарная	ламинарный	5

$$\Delta P_L = \frac{\lambda G_L(y)^2}{2D\rho_L S^2}\Delta z \quad (17)$$

$$\Delta P_G = \frac{\lambda G_G(y)^2}{2D\rho_G S}\Delta z \quad (18)$$

здесь D-диаметр канала, S- площадь сечения канала, p_G плотность пара, λ - коэффициент, задающийся следующими соотношениями [2]:

$$\lambda(\mathrm{Re},\Delta) = \lambda_1(\mathrm{Re})(1-p_1(\mathrm{Re})) + \lambda_2(\mathrm{Re})p_1(\mathrm{Re})(1-p_2(\mathrm{Re},\Delta)) + \\ + \lambda_3(\Delta)p_1(\mathrm{Re})p_2(\mathrm{Re},\Delta)$$

$$\lambda_1(\mathrm{Re}) = \frac{64}{\mathrm{Re}}\ \lambda_2(\mathrm{Re}) = \frac{0.3164}{\mathrm{Re}^{0.25}}\ \lambda_3(\Delta) = \left(1.8\log\left(\frac{8.3}{\Delta}\right)\right)^{-2}$$

$$p_1(\mathrm{Re}) = 0.5\left(1+erf\left(\frac{\mathrm{Re}-2850}{600\sqrt{2}}\right)\right)\ p_2(\mathrm{Re},\Delta) = erf\left(\frac{\mathrm{Re}\,\Delta}{275\sqrt{2}}\right) \quad (19)$$

где $\Delta = \frac{\delta}{D}$, δ - абсолютная величина шероховатостей. Числа Рейнольдса для жидкости и пара задаются следующими выражениями.

$$\mathrm{Re}_L = \frac{C_L D}{\mu_L S} \qquad \mathrm{Re}_G = \frac{G_G D}{\mu_G S} \qquad (20) \qquad (21)$$

, - динамические вязкости жидкости и газа соответственно. Для местного сопротивления сварного шва, как следует из [4]

$$\Delta P_L = \frac{\xi G_L(y)^2}{2D_0\rho_L S_0^2} \qquad \Delta P_G = \frac{\xi G_G(y)^2}{2D_0\rho_G S_0^2} \qquad D_0 = D - 2r_0 S_0 = \pi\frac{D_0^2}{4} \qquad (22) \quad (23) \quad (24))$$

Здесь принимается, что сечение сварного шва есть полукруг с радиусом r_0.

Величина ξ, как следует из работы [4], равна

$$\xi = 0.03\left(1-\frac{s_0}{s}\right)^{0.75} + \left(1-\frac{s_0}{s}\right)^2 + 2\sqrt{0.03}\left(1-\frac{s_0}{s}\right)^{1.375} \qquad (25)$$

Для местного сопротивления поворота на 90 градусов, получаем [3]

$$\Delta P_L = \frac{\zeta(Re)G_L(y)^2}{2D\rho_L S^2} \qquad \Delta P_G = \frac{\zeta(Re)G_G(y)^2}{2D\rho_G S^2} \qquad (26) \quad (27)$$

$$\zeta(Re) = k_\Delta k_{Re}(Re)0.21\left(\frac{R_0}{D}\right)^{-0.5} \qquad (28)$$

$$k_{Re}(Re) = 1.3 - 0.29\ln(10^{-5}Re) \qquad (29)$$

$$k_\Delta = 1 \text{ при } Re \le 4\cdot 10^4 k_\Delta = 2 \text{ при } Re > 4\cdot 10^4 \qquad (30)$$

здесь Ro - радиус закругления трубы. Суммируя все местные сопротивления и сопротивления трения на всех участках испарителя, задающиеся соотношениями (13)-(30), получаем полное сопротивление ,$P_F(U,y_H)$ зависящее от величин U и y_H. Учитывая, что выполняется соотношение

$$G=G_X+G_y=GX(1+f) \qquad (31)$$

Из (1) и (4) получаем

$$y_H(f,H) = \frac{c_{pL}(1+f)}{h_c}\frac{\rho_L gH}{A} \qquad (32)$$

Доля сечения, занимаемая жидкостью равна [3]

$$\phi_L(y,y_H) = \frac{1}{\left(\Phi_L^2(y,y_H)\right)^{\frac{1}{3}}} \qquad (33)$$

Доля сечения, занимаемая газом равна

$$\phi_G(y,y_H) = 1-\phi_L(y,y_H) \qquad (34)$$

Тогда очевидно выполняется соотношение

$$P\left(U,y_H(f,H)\right) = \rho_L gH - \phi_L\left(1,y_H(f,H)\right)\rho_L gH - \phi_G\left(1,y_H(f,H)\right)\rho_G gH \qquad (35)$$

С учетом (34), данное соотношение переписывается в виде [5]

$$P\left(U,y_H(f,H)\right) = \phi_G\left(1,y_H(f,H)\right)(\rho_L-\rho_G)gH \qquad (36)$$

Решая уравнение (36) при известныхU и H, находим f и, следовательно, вычисляем все остальные величины. Расчет ГЕТ-250 при и , приведен в таблице №2. Для проверки правильности расчетов проведем простую оценку порядка величины полного потока. Пусть истинное газосодержание на выходе равно , тогда среднее по испарителю газосодержание равно , средняя величина плотности смеси , сопротивление в этом случае для гомогенной модели равно

$$P = \left(\frac{\lambda L_i}{D}+\frac{\xi NS^2}{S_0^2}\right)\frac{G^2}{2\rho_{CH}S^2} \qquad (37)$$

Здесь N- число сварных швов, а равно

Подставляя (37) в (36), получаем

$$\lambda = \left(1.8\log\left(\frac{8.3}{\Delta}\right)\right)^{-2}$$

$$\left(\frac{\lambda L_i}{D}+\frac{\xi NS^2}{S_0^2}\right)\frac{G^2}{2\left((1-0.5\alpha)\rho_L+0.5\alpha\rho_G\right)S^2} = \alpha(\rho_L-\rho_G)gH \qquad (38)$$

Из соотношения (38) находим оценочное значение полного потока

$$G = \sqrt{\frac{2\alpha(\rho_L-\rho_G)gH\left((1-0.5\alpha)\rho_L+0.5\alpha\rho_G\right)S^2}{\left(\frac{\lambda L_i}{D}+\frac{\xi NS^2}{S_0^2}\right)}} \qquad (39)$$

Значения полного потока и других параметров для ГЕТ-250, полученные с помощью оценочной формулы (39), приведены в таблице №2:

Таблица 2 - Средняя температура хладагента -20°С

Удельный тепловой поток (Вт/м)	Скорость жидкости на входе в испаритель (м/с)	Скорость жидкости на выходе из испарителя (м/с)	Скорость пара на выходе из испарителя (м/с)	Сопротивление контура (Па)	Давление столба жидкости (Па)	Давление столба смеси (Па)	Средняя Температура в контуре (°С)
11	0,312	0,657	4,95	$1,988\cdot10^4$	$3,733\cdot10^4$	$1,745\cdot10^4$	-20
15	0,141	0,398	5,42	$2,476\cdot10^4$	$3,733\cdot10^4$	$1,256\cdot10^4$	-20
20	0,104	0,339	6,62	$2,703\cdot10^4$	$3,733\cdot10^4$	$1,031\cdot10^4$	-20
30	0,0712	0,276	9,01	$2,978\cdot10^4$	$3,733\cdot10^4$	$0,756\cdot10^4$	-20
40	0,0587	0,257	11,25	$3,181\cdot10^4$	$3,733\cdot10^4$	$0,552\cdot10^4$	-20
50	0,0535	0,220	13,70	$3,279\cdot10^4$	$3,733\cdot10^4$	$0,469\cdot10^4$	-20
60	0,0489	0,178	15,96	$3,358\cdot10^4$	$3,733\cdot10^4$	$0,370\cdot10^4$	-20
70	0,0423	0,0856	17,94	$3,490\cdot10^4$	$3,733\cdot10^4$	$0,241\cdot10^4$	-20

Таблица 3 - Средняя температура хладагента -20°С

Удельный тепловой поток (Вт/м)	Полное сопротивление (Па)	Местное сопротивление сварных швов (Па)	Местное сопротивление поворотов (Па)	Сопротивление трения(Па)	Доля участка кипения в общей длине испарителя
11	$1,988\cdot10^4$	$3,451\cdot10^3$	139	$1,629\cdot10^4$	0,13
15	$2,476\cdot10^4$	$4,318\cdot10^3$	143	$2,030\cdot10^4$	0,713
20	$2,703\cdot10^4$	$4,729\cdot10^3$	111	$2.219\cdot10^4$	0,842
30	$2,978\cdot10^4$	$5,256\cdot10^3$	66	$2,446\cdot10^4$	0,928
40	$3,181\cdot10^4$	$5,934\cdot10^3$	43	$2,583\cdot10^4$	0,955
50	$3,279\cdot10^4$	$6,447\cdot10^3$	35	$2,631\cdot10^4$	0,967
60	$3,358\cdot10^4$	$6,645\cdot10^3$	27	$2,691\cdot10^4$	0,975
70	$3,490\cdot10^4$	$6,798\cdot10^3$	16	$2,808\cdot10^4$	0,982

Таблица 4 - Средняя температура хладагента -20°С

Удельный тепловой поток (Вт/м)	Массовое газосодержание на выходе из испарителя	Истинное газосодержание на выходе из испарителя	Поток из ускорителя циркуляции (л/час)	Поток из конденсатора (л/час)	Полный поток (л/час)	Кратность циркуляции
11	0,0186	0,534	588,09	11,15	599,24	53,75
15	0,0561	0,665	255,90	15,2	271,10	17,83
20	0,102	0,726	178,47	20,27	198,74	9,81
30	0,222	0,799	106,25	30,40	136,65	4,49
40	0,356	0,854	72,09	40,54	112,63	2,78
50	0,493	0,877	52,06	50,67	102,73	2,03
60	0,647	0,903	33,14	60,81	93,95	1,545
70	0,873	0,937	10,29	70,94	81,23	1,145

Как видно из таблицы №2, доля участка кипения в общей длине испарителя при нагрузках порядка 10 Вт/м составляет всего 10 процентов. Таким образом, при низких значениях тепловой нагрузки, стационарная работа системы прекращается и возникает либо пульсирующий режим, либо система не работает. Таблица №2, была получена путем подгонки температуры хладагента к экспериментальным значениям. Выводы:

Простая оценочная формула (39) показывает, что полный поток хладагента в системе по порядку величины составляет сотни л/час.

При малых тепловых нагрузках длина нагрева занимает почти всю длину испарителя, и, следовательно, устойчивая работа системы невозможна, поскольку почти полностью отсутствует участок кипения.

Самым большим сопротивлением является сопротивление трения, местное сопротивление сварных швов также существенно, сопротивлением поворотов можно пренебречь.

Список литературы

1. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск, Наука, 1985, 169 с.
2. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений. //«Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения». ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень, 2008, с.34-39.
3. Clayton T. Crowe Multiphase flow handbook. Boca Raton London New York, Taylor&Francis, 2006.
4. И.Е. Идельчик. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва, Машиностроение, 1992, 672 с.
5. Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование тепломассопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов//Криосфера Земли, 2011, т.XV, №1, с. 33-39

ИССЛЕДОВАНИЕ ТК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ КАМЕР И В УСЛОВИЯХ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕНОГО ПОЛИГОНА

Г.М. Долгих, С.Н. Окунев, С.Н. Стрижков, Д.С. Паздерин, Н.Г. Гилев

НПО «Фундаментстройаркос», г.Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

Приведены результаты исследования индивидуальных термостабилизаторов, исследования различных типов конструкций термостабилизаторов, исследования различных типов хладагента, различные массы заправки, а также эффективность их работы в различных проектных положениях.

На сегодняшний день термостабилизация грунтов оснований и фундаментов (ТСГ) является актуальной темой при строительстве в условиях многолетнемёрзлых грунтов. НПО «Фундаментстройаркос» является основным производителем индивидуальных термостабилизаторов, глубинных СОУ и единственным в мире производителем горизонтальных и вертикальных естественнодействующих трубчатых систем (ГЕТ и ВЕТ). Исследование систем ТСГ проводились с целью их совершенствования и достижения высокой эффективности их прямого назначения.

Исследования проходили на специально построенном опытно-промышленном полигоне в п.Матмасы недалеко от г.Тюмень. На полигоне имеются опытно-промышленные экспериментальные установки и системы температурной стабилизации грунтов, выполненные в натуральную величину и служащие для изучения, моделирования и исследования теплофизических и теплогидравлических процессов протекающих, в различных узлах СОУ, различных видов. Многие установки единственные в мире, и не имеющие аналогов.



Рисунок 1 - Коэффициент теплоотдачи конденсаторов термостабилизаторов различных конструкций в зависимости от скорости ветра.

Одним из основных видов систем ТСГ является, индивидуальна термостабилизирующая парожидкостная колонка (ТК). На эффективность работы ТК влияет ряд параметров, таких как: тип хладагента, масса заправляемого хладагента, угол проектного положения ТК к горизонту и конструктивные параметры, скорость ветра который обдувает конденсатор, и т.д. Эффективность работы ТК определяется способностью быстрого, максимально возможного отвода тепла из грунтов. Чем выше эффективность термостабилизатора, тем меньше сроки сдачи фундамента основания для строительства.

Исследование двух термостабилизаторов ТК32/10М5.Ф и СПМГ-10000 проходили в одинаковых условиях в климатической камере. Конструктивные параметры которых приведены в таблице №1. Термостабилизаторы были заправлены одним и тем же хладагентом R22. Основное и принципиальное отличие между двумя термостабилизаторами является конструкция конденсатора, поэтому имеет смысл сравнить эффективность работы ТК по коэффициенту теплоотдачи от воздуха к поверхности конденсатора. Коэффициент теплоотдачи от воздуха к конденсатору ТК32/10М5.А на 17,5% превышает СПМГ-10000, что связанно с эффективностью ребра, которое зависит от высоты ребра, шага между ребрами, материалом ребра, скорости ветра и т.д.

Способность теплоносителя осуществлять тепломассоперенос зависит от теплофизических параметров хладонов табл.№2. Различные конструкции СОУ необходимо заправлять различными типами хладагента, например глубинную СОУ нужно заправлять только R744 (углекислота), что напрямую связано с теплофизическими параметрами хладагента, системы ГЕТ и ВЕТ целесообразно заправлять R717 (аммиак). Для индивидуальных термостабилизаторов подходят различные виды хладонов, таких как R717 (аммиак), R744 (углекислота), R22 (фреон) и т.д.

Таблица 1 - Технические характеристики термостабилизаторов ТК32/10 и СПМГ.`

Наименование характеристики	Значения характеристики	
	ТК32/10	СПМГ-10000
Площадь конденсатора, м^2.	1,87	2,0
Площадь одного погонного метра испарителя, м^2.	0,106	0,119
Длина испарителя, мм	9000	9170
Наружный диаметр испарителя, мм	33,7	38,0
Высота ребра конденсатора, мм	15,2	25,5
Шаг между ребрами конденсатора, мм	2,5	15
Материал ребра.	алюминий	Сталь
Материал испарителя.	Сталь	Сталь
Масса изделия, кг.	30	37

Аммиак(R717) — холодильный агент, химическая

формула (NH3), являющийся наиболее распространенным как в данный момент, так и в будущем, поскольку относится к природным веществам и не оказывает никакого влияния ни на парниковый эффект, ни на разрушение озонового слоя. Аммиак обладает многочисленными преимуществами и представляет значительный технологический и экономический интерес.

Главные преимущества аммиака, состоят в следующем:

- его термодинамические и теплофизические свойства, интенсивность тепломассообмена позволяют достичь очень высоких значений КПД установок;
- он легко обнаруживается в случае утечек, поступление воздуха, смешанного с аммиаком в результате утечек, немедленно будет обнаружено по характерному предупреждающему запаху уже при концентрации 5 мг/м3;
- имеет низкую закупочную стоимость;
- холодильные машины на аммиаке весьма конкурентоспособны с точки зрения как начальных капиталовложений, так и затрат на последующее обслуживание.

Несмотря на то, что в нашей стране долгие годы использование аммиака было крайне осложнено многочисленными нормами и ограничениями, сегодня есть шанс изменить ситуацию. Все нормы для аммиака рассчитывались полвека назад с учетом низкого качества материалов и арматуры того времени, а также полного отсутствия защитной автоматики. Аммиачные системы имеют право на существование, а современное оборудование относительно безопасно.

Углекислота (R744) – холодильный агент, как правило, применяется для заправки глубинных СОУ и индивидуальных термостабилизаторов. Углекислый газ, CO2, это безвкусный, бесцветный, негорючий газ без запаха. Температура кипения углекислоты при давлении 1 атм составляет -56,6 °. Температура замерзания при давлении 1атм составляет -78,5 °. В твердом состоянии углекислота представляет собой сухой лед. Двуокись углерода, кажущаяся безопасной со всех сторон, все же имеет один серьезный недостаток: в системах на CO2 нужно поддерживать очень высокое рабочее давление — не менее 8 МПа.

Химическое название **хладона R22** – дифторхлорметан. Хладон 22 (химическая формула: CF2ClH) - это бесцветный газ со слабым запахом хлороформа, относится к группе гидрохлорфторуглеродов. Хладон R22 широко используется в промышленности, главным образом в качестве хладагента. Экологические свойства хладона R22 значительно хуже, чем у R717 и R744. В прошлом 2010 году импорт в Россию озоноразрушающих хладагентов — гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ) оказался фактически под запретом. R22 резко подорожал до 180–250 рублей за килограмм, хладагент в малой одноразовой таре и вовсе пропал со складов дистрибьюторов.

Эффективность работы ТК при различных типах рабочей жидкости изменяется, за счет термического сопротивления тепломассопереноса, которое в свою очередь связанно с теплофизическими свойствами хладагента. В климатической камере проведены испытания термостабилизатора в одинаковых условиях, имеющие различные рабочие жидкости.

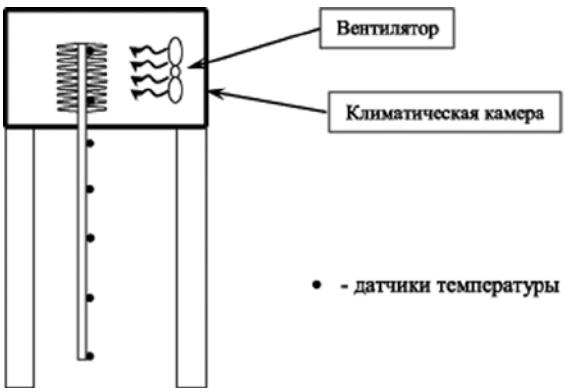


Рисунок 2 - Схема испытательного стенда ТК с использованием климатической камеры.

В эксперименте использовались три типа охлаждающей жидкости R717 (аммиак), R744 (углекислота) и R22 (фреон). Климатическая камера располагалась на эстакаде рисунок 2 таким образом, что термостабилизатор устанавливался вертикально. В камере задавалась температура, и скорость обдува конденсаторной части. После выхода ТК на стационарный режим работы производился автоматизированный сбор теплофизических параметров характеризующих эффективность работы ТК. На рисунке 3 отображены результаты испытания термостабилизаторов, очевидно что, термостабилизатор заправленный хладагентом типа аммиак R717, показывает лучшие результаты, чем термостабилизатор заправленный R744 или R22. Наиболее худшие показатели показал R22 на 34% и R744 на 22% от R717.

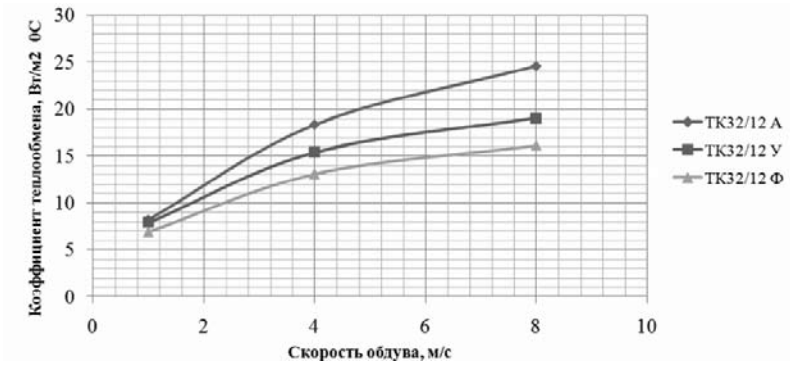


Рисунок 3 - Коэффициент теплообмена термостабилизатора ТК32/12 с различными типами хладагентов, где А – R717, У – R744 и Ф – R22.

Также один из важных параметров термостабилизатора, это способность теплоносителя осуществлять теплообмен атмосферного воздуха

с грунтом. Важным параметром теплоносителя является **масса заправки** термостабилизатора хладагентом.

После установки термостабилизатора в проектное положение в начале его работы он может снимать нагрузку Qu до 25 Вт/м при этом, если в термостабилизаторе заправлено недостаточное количество хладагента, тогда весь жидкий хладагент окажется на стенке испарителя что приведет к неравномерному охлаждению стенки испарителя. Если же заправить хладагента с избытком в термостабилизатор то: во первых мы будем вносить лишние затраты приобретая большее количество хладагента; во вторых жидкий хладагент будет создавать гидростатический столб для нижних слоев хладагента, что приведет к уменьшению интенсивности кипения. Таким образом, возникает вопрос: "сколько хладагента необходимо заправлять в термостабилизатор?".

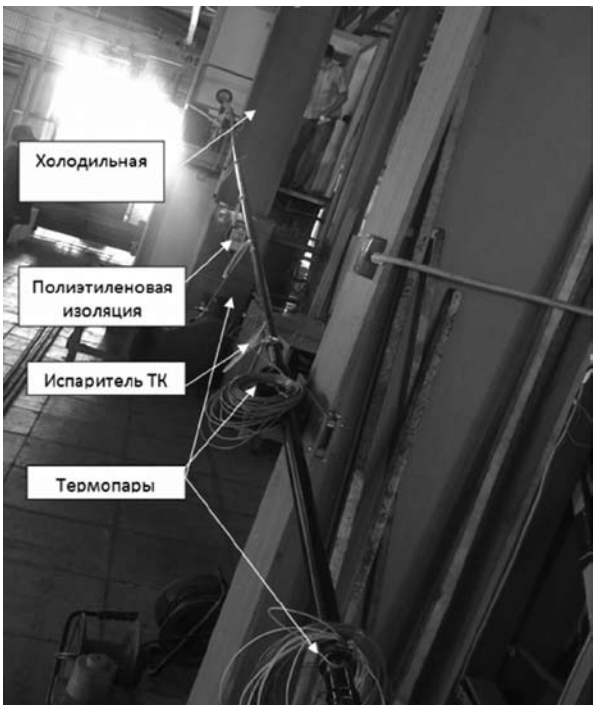


Рисунок 4 - ТК, установленный на роликах, с установленными термопарами ТХА.

Принимая во внимание то, что максимальная тепловая нагрузка составляет 25 Вт/м можно определить максимальное количество хладагента Mmax при условии, если хладагент R717(аммиак) с теплотой парообразования L [3]:

$$M_{\max} = \frac{Q_u}{L} = \frac{175}{1125} = 0{,}155 \quad \text{кг}$$

Для определения оптимального количества заправляемого хладагента, было проведено экспериментальное исследование с использованием климатической камеры. Масса заправленного хладагента варьировалась на четырех уравнях: 140гр, 100гр, 70гр и 40гр. Оптимальное количество хладагента определялось по критерию – минимальное время необходимое для достижения стационарного распределения температуры по длинне испарительной части термостабилизатора, а также по температурному распределению по испарительной части.

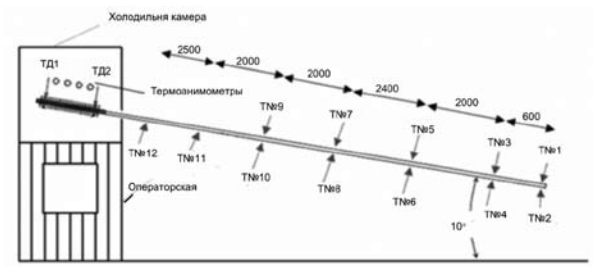


Рисунок 5 - Принципиальная схема лабораторного стенда, ТN№ 1…ТN№12 - термопары типа ТХА, ТД 1 и ТД2– пластинчатая термопара.

После выхода на установившийся режим распределения температур стенки испарителя, эксперимент завершается, из климатической камеры извлекается конденсатор ТК. По истечению времени необходимого для достижения температурного равновесия, между температурой хладагента и температурой окружающего воздуха производилось изменение массы заправки. Величина уровня жидкой фазы хладагента, определялась способом нагрева поверхности испарителя до появления характерной границы раздела двух сред. Далее выполняется новый эксперимент в соответствии выше изложенной последовательности.

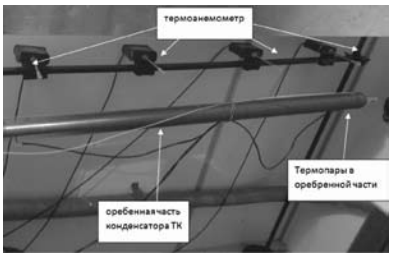


Рисунок 6 - Схема расположения термоанемометров и термопар внутри климатической камеры



Рисунок 7 - Распределение температуры по длине испарителя после выхода на установившийся режим

В климатической камере, изображенной на рисунке 5, температурный режим внутри камеры устанавливается на уровень -10 оС, который не изменяется на протяжения всего эксперимента, скорость обдува конденсатора ТК, также остается не изменой на протяжении всего эксперимента и составляет 5 м/с. После достижения заданной температуры, конденсаторная часть ТК помещается вовнутрь климатической камеры через специальное герметическое по контуру отверстие, одновременно с этим включаются система температурного мониторинга поверхности стенки испари-

теля, с интервалом опроса датчиков 5 мин. В качестве первичных преобразователей температуры использовались термопары типа ТХА (12 шт.), схема обвязки изображена на рисунке 5.

Проведеные экспериментальные исследования показали, что при массе заправки индивидуального термостабилизатора ТК32/12.М4А хладагентом, в количестве 40 гр. температура по длине испарителя распределена не равномерно, а именно конец испарителя длинной 2 м. эффективно не охлаждается, что связано с недостатком теплоносителя, а понижение температуры произошло за счет теплопроводности стенки испарителя.

При массе заправки хладагентом термостабилизатора ТК32/12.М4А в 100гр., мониторинг показывает что, после достижения стационарного распределения температуры, среднее значение температуры стенки испарителя минимальна, что говорит о наиболее эффективной работы хладагента. Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующий вывод: оптимальной массой заправляемого хладагента термостабилизатора ТК32/12.М4.А эксплуатируемого под углом 10о к горизонту можно считать величину равную 100 гр.

Немало важным параметром, влияющим на эффективность работы ТК, является угол наклона термосифона к горизонту.

Холодильная камера оборудована холодильной машиной с компрессором, мощность компрессора 3.5 кВт, хладагент-фреон R404. Внутри холодильной камеры, над оребрением ТК, находятся два вентилятора, мощностью по 0.5 кВт, моделирующие скорость потока ветра на оребрении.

Согласно экспериментальной схеме исследуемый образец устанавливался под углом в 10˚, 5˚ и 2˚ относительно пола. В холодильной камере устанавливалась необходимая температура. Термопары крепились согласно схеме проведения эксперимента. Перед началом размещения оребренной части термостабилизатора в холодильную камеру производят измерения всех начальных теплофизических параметров. Замеры температуры проводились при помощи вторичного прибора ИТПМ (угол наклона 10˚) и ИТ-2 (угол наклона 5˚ и 2˚) . Параллельно проводилась тепловизионная съемка исследуемого образца при помощи тепловизора.

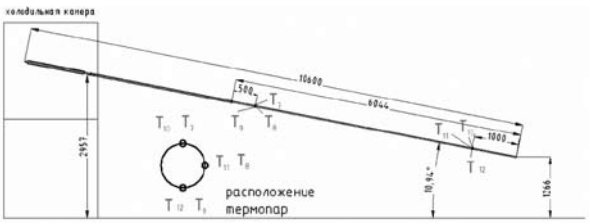


Рисунок 8 - Принципиальная схема экспериментальной установки угол наклона 10˚,Ti – термопара ТХА.

На Рис.8 изображена термостабилизирующая колонка ТК 32/12, установленная оребрением в холодильную камеру. Испарительная часть находится в производственном помещении при температуре окружающего воздуха 23˚С.

Под временем запуска термостабилизатора в работу принимают время τзап., в течение которого от момента размещения конденсатора в холодильной камере температура на стенке испарителя τисп. принимает значение 0оС в сечении трубы на границе жидкой и паровой фаз хладагента. По полученным данным строим графики в виде τзап.=f(τх.к.). Графики строятся для температур в камере -10, -20, -30 и углах наклона 10, 5 и 2 градуса

Графики при угле наклона 10˚ представлены на рисунках 9, 10 , 11

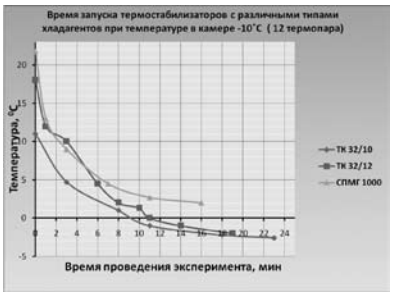


Рисунок 9 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагентов при температуре в камере -10˚С

Рисунок 10 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагентов при температуре в камере -20˚С

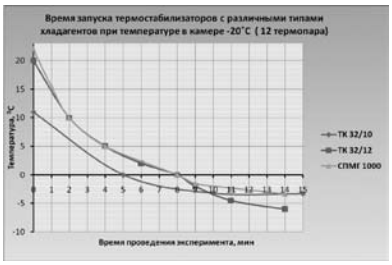




Рисунок 11 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагентов при температуре в камере -30˚С

Таблица 1 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагентов при угле наклона 10˚

Тип термостабилизатора	Температура в камере		
	-10	-20	-30
	Время запуска в работу, мин		
ТК 32/10 (аммиак)	9	5	1
ТК 32/12 (углекислота)	11	8	6
СПМГ 10000		8	8
Температурный градиент	33	43	53

Для более удобного сравнения данные сведены в таблицу 1

Измерения проводились с использованием многоканального измерителя ИТ-2, что позволило добиться большей точности измерений.

На графиках 12, 13, 14 показана зависимость изменения температуры на стенке испарителя от времени проведения эксперимента при угле наклона 5˚

На графиках 15, 16, 17 показана зависимость изменения температуры на стенке испарителя от

времени проведения эксперимента при угле наклона 2°

Испытания индивидуальных термостабилизаторов и глубинных СОУ в натурных условиях опытно-промышленного полигона.

Приводятся опытно-экспериментальные данные по распределению температуры грунта в зоне действия индивидуальных ТК различных конструкций.

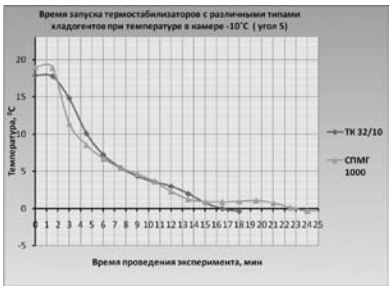


Рисунок 12 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагентов при температуре в камере -10˚С (угол 5)

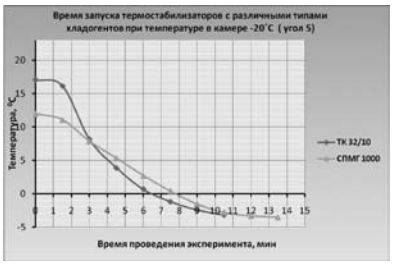


Рисунок 13 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагентов при температуре в камере -20˚С (угол 5)



Рисунок 14 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагентов при температуре в камере -30˚С (угол 5)

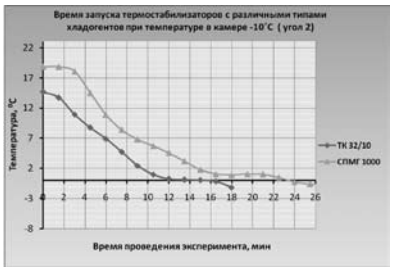


Рисунок 15 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагентов при температуре в камере -10˚С (угол 2)



Рисунок 16 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагентов при температуре в камере -20˚С (угол 2)

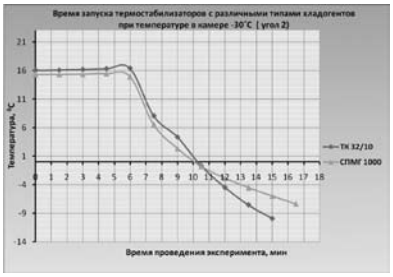


Рисунок 17 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагентов при температуре в камере -30˚С (угол 2)

Таблица 2 - Время запуска в работу термостабилизаторов с различными типами хладагента и различными углами наклона

Тип термостабилизатора	Угол наклона	Температура в камере		
		-10	-20	-30
		Время запуска в работу, мин		
ТК 32/10 (амминак)	10	9	5	1
	5	16	6,5	5
	2	16,5	9,5	9,5
ТК 32/12 (углекислота)	10	11	8	6
	5	-	-	-
	2	-	-	-
СПМГ 10000 (фреон)	10		8	8
	5	22,5	8	8,5
	2	23,5	10,5	9

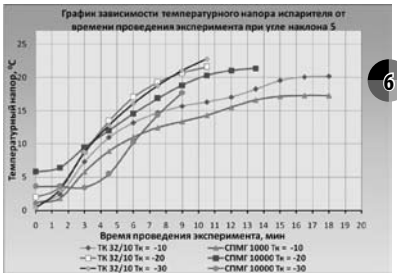


Рисунок 18 – График зависимости температурного напора испарителя от времени проведения эксперимента при угле наклона 5

Существуют различные типы термостабилизаторов отличающиеся, прежде всего типом хладагента, конструкцией испарительной и конденсаторной части. В данной части статьи представлены результаты натурных исследований работы таких ТК. На опытно-испытательном полигоне НПО «Фундаментстройаркос» представлены термосифоны различной конструкции и установленные под разными углами к вертикали. Натурные испытания проводились в зимний период времени с 2010 на 2011 годы в условиях г. Тюмени. Схема расположения этих устройств приведена на рис.19 Целью испытаний являлось выявить распределение температур по глубине испарителя ТК. Испытания проводились беспрерывно в течение 6 месяцев с момента устойчивого установления температуры воздуха tв ниже средней по глубине температуры охлаждаемого грунта tг до момента установления температуры tв выше средней температуры. При достижении соотношения tв>tг ТК прекращает работу, т.к. прекращается свободная конвекция пара из испарителя в объем конденсатора и поэтому отвод тепла от грунтового испарителя прекращается.

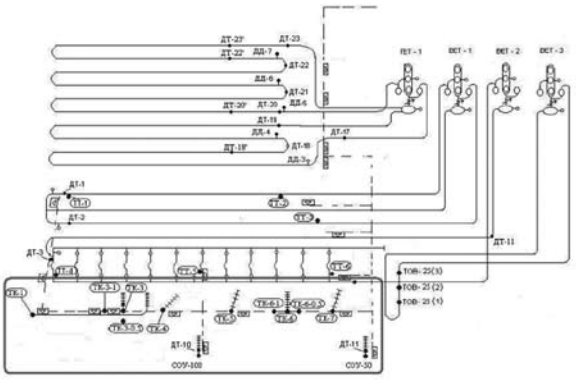


Рисунок 19 - Схема полигона с указанием места расположения ТК и глубинных СОУ

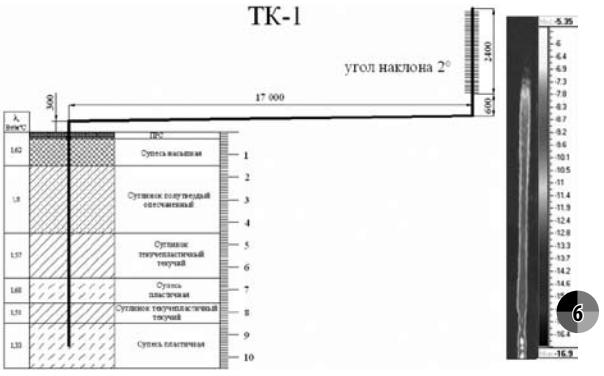


Рисунок 20 - Схема ТК-1 и термограмма конденсатора ТК-1.

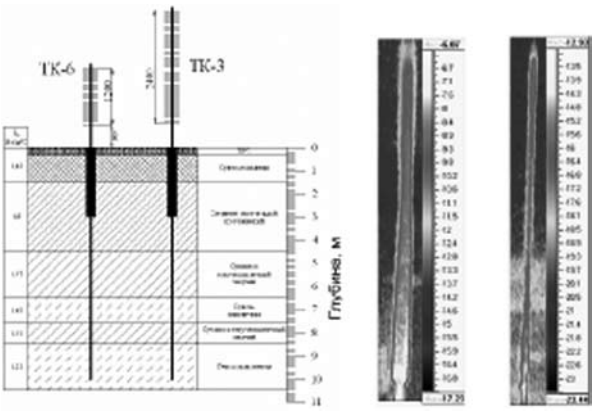


Рисунок 21 - Схема ТК-6, ТК-3, термограмма конденсатора ТК-6, ТК-3.

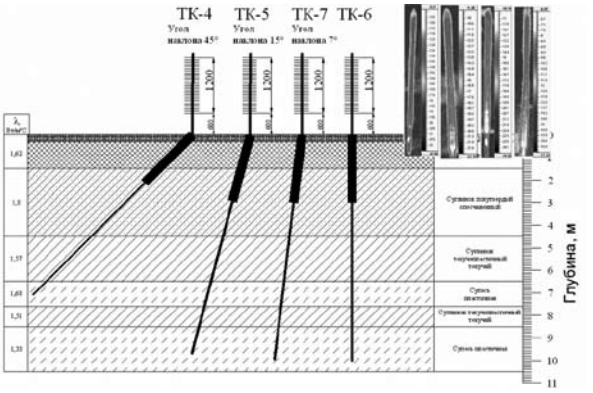


Рисунок 22 - Схема установки ТК-4, ТК-5, ТК-6 и ТК-7. Термограммы конденсаторов ТК-4, ТК-5, ТК-6 и ТК-7

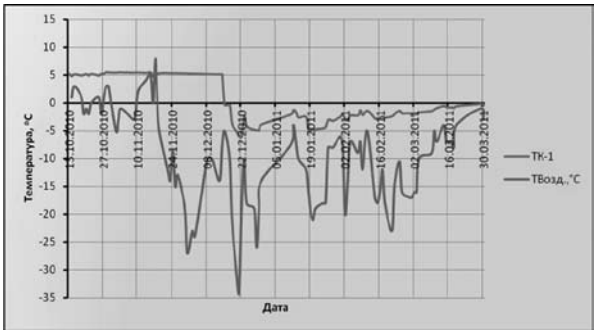


Рисунок 23 - График изменения средней температуры семиметрового слоя испарителя ТК-1 с течением времени

Распространение (распределение) температур по глубине испарителя ТК получены путем проведения систематического мониторинга за температурой стенки испарителя по всей его глубине за весь наблюдаемый период. Данные мониторинга температур приведены на рис. 20, 21 . Все экспериментальные установки были оборудованы термометрическими трубами, в которых были установлены термокосы МЦДТ-0922 производства ОАО НПП «Эталон».

В начальный период времени ТК-1 находилась в спящем состоянии в связи с тем, что у надземной части испарителя не был выставлен соответствующий угол способствующий стека-

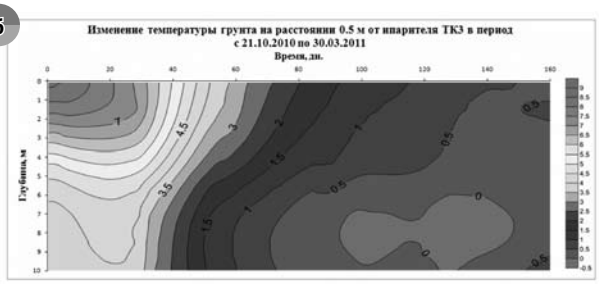


Рисунок 24 - Изоплета для ТТ на расстоянии 0,5 м от ТК-3

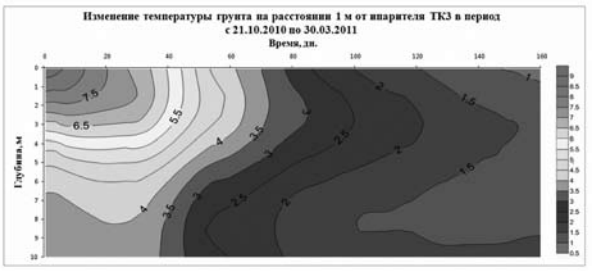


Рисунок 25 - Изоплета для ТТ на расстоянии 1,0 м от ТК-3

нию хладагента в грунт. Угол был выставлен в декабре 2010 г, после чего термостабилизатор начал свою работу. В течении всего зимнего периода наблюдался устойчивый тренд понижения температуры вблизи испарителя ТК-1. В ходе проведения экспериментальных исследований была подтверждена возможность использования Z-образной конструкции термостабилизатора.

Для обработки данных по термометрии в ТТ на расстоянии 0,5 и 1 метр от испарителя ТК3 и ТК6 нами были применены современные методы анализа экспериментальных данных. При построения графической зависимости изменения температуры грунта по глубине с течением вре-

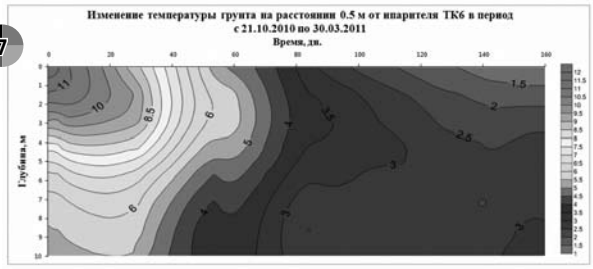


Рисунок 26 - Изоплета для ТТ на расстоянии 0,5 м от ТК-6

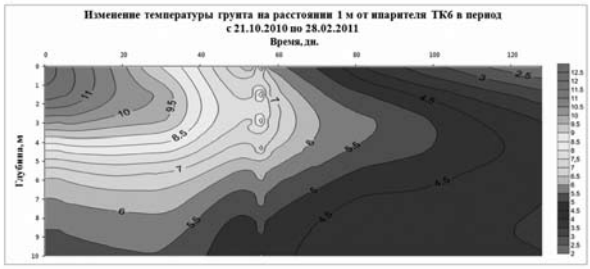


Рисунок 27 - Изоплета для ТТ на расстоянии 1,0 м от ТК-6

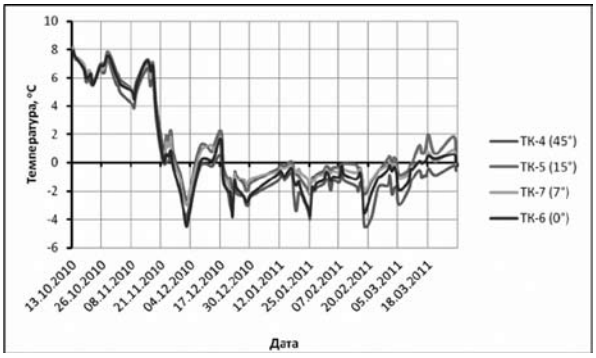


Рисунок 28 - График изменения средней температуры семиметрового слоя испарителя ТК-4, ТК-5, ТК-6 и ТК-7 с течением времени.

мени испарителя использовался программный комплекс Surfer 9.

Проведя анализ графиков на рисунках 5 и 6 можно сделать вывод о том, что понижение температуры на стенке испарителя ТК-3 имеет более крутой тренд по сравнению с ТК-6. Так, например, 30.11.2010 при температуре окружающего воздуха минус 27 оС и скорости ветра 0,4 м/с средняя температура семиметрового слоя испарителя ТК-3 имела значение минус 6,7 оС, а для ТК-6 минус 2,9 оС. 18.02.2011 при температуре окружающего воздуха минус 18 оС и скорости ветра 0,3 м/с средняя температура семиметрового слоя испарителя ТК-3 имела значение минус 9,5 оС, а для ТК-6 минус 3,6 оС.

Сравнение изоплет (см. рис. 7-10) показало, что промораживание грунта в зоне действия ТК-3 протекает более интенсивно, чем в зоне действия ТК-6. Так 11.01.2011 средняя температура семиметрового слоя по данным замеров на расстоянии 0,5 метров от испарителя составляла 3,1 оС для ТК-6 и 0,8 оС для ТК-3. 29.03.2011 средняя температура семиметрового слоя ТК-6 и ТК-3 на расстоянии 0,5 метров равнялась соответственно 2,5 оС и 0,44 оС, на расстоянии 1 метр – 3,4 оС и 1,37 оС.

1. Анализ данных, полученных путем систематического мониторинга за наклонными термостабилизаторами приведенного на рисунке 12, показал, что изменение средней температуры семиметрового слоя на малый (до 10о к вертикали) угол сказывается на работе термостабилизатора не значительно (см. рис. 12 ТК-6 и ТК-7).
2. Установка термостабилизатора под углом 45 о к вертикали привело к увеличению его КПД на 20% (см. рис. 12 ТК-6 и ТК-4).
3. Установка термостабилизатора под углом 15 о к вертикали (см. рис. 12 ТК-5) привело к снижению его производительности. Средняя температура семиметрового слоя на 1-2 оС выше, чем у вертикальных ТК.

ПРЕДПРИЯТИЕ «НЬЮФРОСТ»: ОПЫТ СОЗДАНИЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРОВ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Ю.П. Штефанов, О.Ю. Штефанова

ООО «Ньюфрост», г. Протвино, Московская область, yury.shtefanov@mail.ru

ООО «Ньюфрост» более пяти лет работает на рынке сезонно-охлаждающих устройств. В период экономического кризиса руководству предприятия приходится решать целый ряд проблем для того, чтобы сохранить и укрепить свои позиции на рынке. Описываются основные методы, включающие в себя оптимизацию технологических процессов, создание высококвалифицированной команды специалистов, разработку инновационных способов замораживания грунтов. Приводится список организаций, сотрудничающих с ООО «Ньюфрост», а также перечень построенных объектов.

Введение

Освоение Крайнего Севера является одним из приоритетных направлений развития российской экономики. Однако попытки урбанизировать районы, находящиеся в условиях вечной мерзлоты, как правило, приводят к выводу о невозможности применения стандартных строительных технологий, используемых в других природных зонах страны.

ООО «Ньюфрост» специализируется на разработке и изготовлении **теплообменников (термосвай, термосифонов, термостабилизаторов, сезонноохлаждающих устройств)**, используемых для строительства в условиях вечной мерзлоты. Город Протвино, где базируется ООО **«Ньюфрост»,** расположен на юге Московской области и является наукоградом Российской Федерации. Наличие высококвалифицированных кадров и снижение занятости на государственных предприятиях способствовало развитию малых предприятий в городе. ООО «Ньюфрост» существует на рынке производства теплообменного оборудования более пяти лет. Большая помощь в становлении общества была оказана Герасимовой М.К. и Герасимовым С.В. — специалистами в области термостабилизации многолетнемерзлых грунтов из города Салехарда (ЯНАО).

Термостабилизация грунта

Термосваи являются обязательным элементом, используемым для стабилизации многолетнемерзлых грунтов в условиях вечной мерзлоты. ООО «Ньюфрост» занимается изготовлением термосифонов, а также разработкой новых усовершенствованных моделей теплообменных устройств.

Разрабатываемые компанией термостабилизаторы, основанные на парожидкостном цикле работы, обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами конструкций (жидкостными и воздушно-конвективными термосифонами):

- простота конструкции;
- на порядок более высокий коэффициент внутренней теплопередачи;
- наибольшая скорость охлаждения грунта;
- удобство монтажа на объект;
- наименьшие габариты и металлоемкость;
- наилучшие свойства теплового «диода», позволяющие сохранять замороженное состояние грунта в теплый период года.

Инновационные методы замораживания грунтов

Известно, что только выход на рынок с конкурентоспособным товаром дает возможность предприятию выжить в условиях рынка. Рынок термостабилизаторов не является исключением. Данное обстоятельство заставляет ООО «Ньюфрост» постоянно развивать различные направления инновационной деятельности и совершенствовать изготавливаемую продукцию.

В инновационной деятельности специалисты ООО «Ньюфрост» опираются на теоретические и практические знания, приобретаемые в процессе сотрудничества с научными институтами и университетами. Научные исследования в области интенсификации теплообмена проводятся совместно с Московским энергетическим институтом и Московским государственным университетом им М.В. Ломоносова.

Использование научной базы позволяет проводить точные математические расчеты, характеризующие процесс работы теплообменников в различных природных условиях, выявлять причины возникновения критических режимов работы изделия. Построение математической модели термосифона служит неотъемлемым элементом комплексного изучения процесса стабилизации грунтов, которое позволяет с уверенностью говорить о применимости термостабилизаторов в соответствующих условиях и прогнозировать области замораживания грунтов.

Теоретические результаты успешно применяются и проверяются на практике при создании и испытании опытных образцов. Наиболее перспективным исследованием и ценным опытом яв-

ляется проведение натурных испытаний усовершенствованных моделей термосвай на объектах в районах Крайнего Севера в условиях вечной мерзлоты.

Термостабилизатор круглогодичного действия

Результатом инновационной деятельности ООО «Ньюфрост» является разработка и изготовление термостабилизатора круглогодичного действия. Конструкция термостабилизатора с термоэлектрическим модулем отвечает основным требованиям заказчиков и строительно-монтажных управлений, которые на протяжение многих лет говорят о необходимости создания теплообменника круглогодичного действия.

Уникальность таких термосифонов заключается в том, что при их создании используется новый технологический подход в охлаждении горячей стороны термоэлектрического модуля при функционировании термостабилизатора: охлаждение осуществляется с помощью тепловой трубы.

Острая необходимость круглогодичной температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов, позволяющей проводить строительно-монтажные работы в течение всего года, очевидна. В настоящее время установка используемых термостабилизаторов требует климатических условий, при которых максимальная температура воздуха в начале замораживания составляет -5 °С.

Круглогодичное искусственное з**амораживание грунтов** с помощью термостабилизаторов с термоэлектрическим модулем позволяет расширить область их использования в качестве оснований сооружений, повысить несущую способность и надежность оснований, упростить конструктивные решения и технологию нулевого цикла, а также во многих случаях сократить сроки, материалоемкость и стоимость строительства.

Термостабилизатор с гибкой связью

ООО «Ньюфрост» также разрабатывает термостабилизаторы с гибкой связью, что дает возможность изготавливать теплообменные устройства длиной до 100 м со стандартными методами транспортировки.

Руководство ООО «Ньюфрост» убеждено, что успешная деятельность компании является результатом работы, направленной на повышение эффективности производства, создание квалифицированной команды сотрудников при внедрении инновационных технологий.

Сотрудничество и построенные объекты

ООО «Ньюфрост» на протяжении многих лет выступает в роли надежного партнера в области работ по стабилизации многолетнемерзлых грунтов. Среди партнеров компании стоит отметить АК «Транснефть», ООО «Заполярспецстроймонтаж», ООО «Велесстрой», ООО «Сахатрансмеханизация», ОАО «Бамстроймеханизация», ООО «ТАИС», ООО «Алмаз-Антарекс», ООО «Транс Лайн», ООО «Амерко», АК «Якутскэнерго», ОАО «Проектрансстрой», ОАО «ВНИПИГаздобыча», ЗАО «НПО «КИТ», ООО «Геоиндустрия», АК «АЛРОСА», ООО «ОСРП», ЗАО «Металлургшахтспецстрой». Сотрудничество с компанией позволяет вовремя выполнять строительно-монтажные работы по стабилизации грунтов в условиях вечной мерзлоты в соответствии с установленными строительными нормами.

Примерами объектов, при строительстве которых была использована продукция ООО «Ньюфрост», являются следующие сооружения: гражданские объекты в ЯНАО, ВСТО, железная дорога Томмот – Нижний Бестях, железная дорога Верхний Улак – Эльга, НПС – 14 (г. Олекминск), нефтебаза ГУП «Чукотснаб» (г. Певек) и др.

ПРОГНОЗНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ УСТЬЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

В.Н. Захарова, С.А. Бекирова

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

Для предотвращения оттаивания грунтов вокруг устья скважины в процессе ее эксплуатации необходимо определить оптимальное количество и расположение охлаждающих систем. В данной статье рассмотрены примеры прогнозных расчетов с различными вариантами расстановки труб ТОВ, различной температурой флюида в скважине и способами теплоизоляции устья скважины, различными инженерно-геологическими условиями.

Для сохранения устойчивости и прекращения деформации грунтового основания приустьевой зоны нефтяных и газовых скважин, грунты основания должны использоваться по I-му принципу (согласно СНиП 2.02.04-88). С целью предотвращения оттаивания пород и формирования термокарстовой воронки в устьевой зоне действующих скважин применяются сезоннодействующие парожидкостные колонки малого диаметра. Очень важно определить их максимально эффективное расположение и количество, учитывая при этом температуру флюида в скважине, теплофизические свойства грунтов, степень засоленности, наличие в разрезе торфа и прослоек льда, а также конструкцию скважины и наличие теплоизоляции в устье скважины.

Прогнозные исследования и моделирование температурного режима грунтов являются неотъемлемой частью проектирования систем температурной стабилизации устьев нефтяных и газовых скважин. Моделирование осуществляется в специальной программе “FROST (DK)”.

“FROST (DK)” – программный модуль задачи расчета трехмерного теплового состояния системы «скважина-породы» в криолитозоне, с учетом: а) замерзания поровой влаги в спектре температуры и ее засоленности; б) произвольной построенности геологического разреза; в) установки замораживающих колонок; д) управления граничными условиями и внутренним теплообменом в породах.

Программа “FROST (DK)” разработана д.т.н. Дубиной М.М. и д.ф.-м.н. Кашеваровым А.А. в СО РАН для решения пространственной задачи прогноза температурного режима влагонасыщенных грунтов вблизи сооружений с замораживающими элементами при воздействии сезонных колебаний температуры воздуха. Процесс фазового перехода влаги происходит в спектре отрицательных температур с учетом степени минерализации. Теплофизические параметры зависят от типа грунта, льдистости и влажности, а концентрация солей в поровой влаге определяет значение температуры начала фазового перехода. Влияние снежного покрова учитывается модификацией граничных условий третьего рода в соответствующих точках границ трехмерной области расчета. Рассматриваемая область моделирования является трехмерным фрагментом, ограниченным сверху дневной поверхностью, снизу-плоскостью, расположенной на достаточно большой глубине, чтобы не оказывать влияния на процессы в интересующей части области.

Для нормальной эксплуатации скважин в устьевой зоне необходимо создать мерзлый грунтовый массив, обеспечивающий устойчивость как подкрепленного обсадными колоннами ствола, так и всех дополнительных приустьевых сооружений и конструкций. Для замораживания грунтов и сохранения их в мерзлом состоянии применяется система ВЕТ (вертикальная естественнодействующая трубчатая), представляющая собой герметичную неразъемную конструкцию из труб, заправленную хладагентом, и состоящую из надземной части - конденсатора или конденсаторного блока воздушного охлаждения и подземной, - представленной охлаждающими трубами. Теплообмен между грунтами и атмосферным воздухом, осуществляется за счет перемещения хладагента под действием гравитационных сил «жидкость вниз - пар вверх», от конденсатора к охлаждающим трубам и обратно.



Рисунок 1 – Расчетная область в плане

Эффективный коэффициент теплоотдачи αэф определяется на каждый месяц в зависимости от скорости ветра и отношения площади конденсаторной к площади испарительной части.

Одним из примеров температурной стабилизации грунтов приустьевой зоны эксплуатационных теплоизолированных скважин является Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение.

Для сохранения грунтов в мерзлом состоянии проектом предусмотрена установка систе-

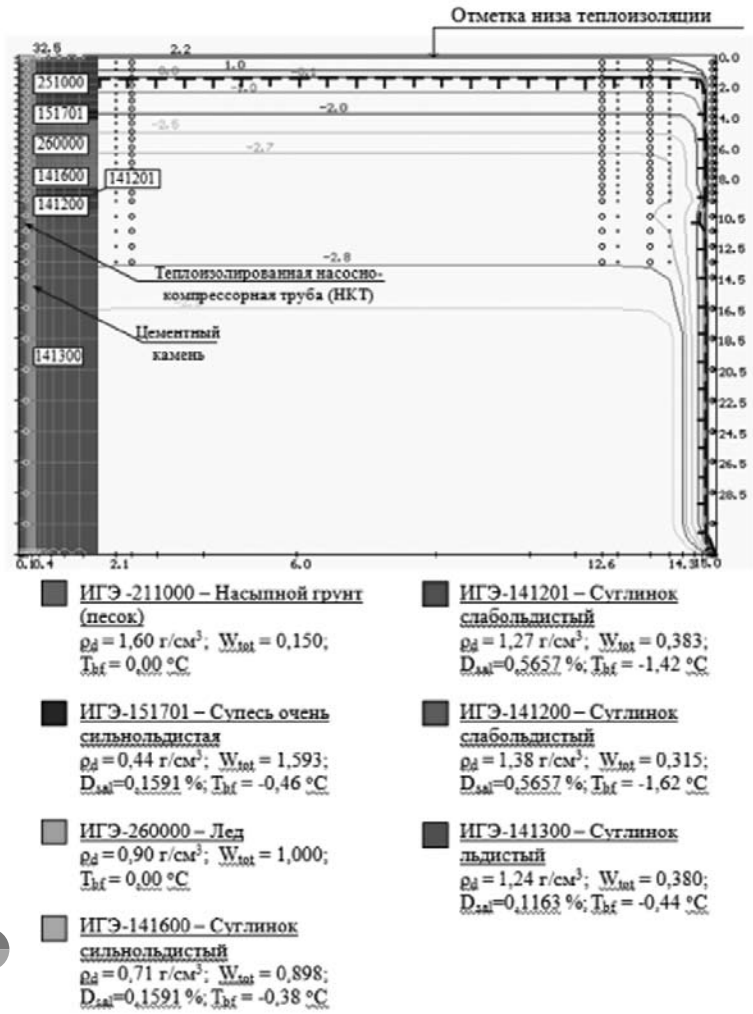


Рисунок 2 – Температура и кодировка грунта на 16 сентября, насыпь и теплоизоляционный ковер уложены на талый грунт

мы ВЕТ. Оптимальное число ТОВ и места их расположения должно удовлетворять ряду критериев:

- в течение всего года температура на стенке кондуктора скважины должна быть положительной;
- ореол оттаивания грунтов вокруг скважины должен иметь минимальные размеры;
- грунты основания площадки должны находиться в твердомерзлом состоянии.

В расчетной области на расстоянии 15 м друг от друга перпендикулярно дневной поверхности проходят оси двух газовых скважин, пересекающие вертикально всю область расчета. Расчетная область в плане показана на рисунке 1.

На верхней границе расчетной области задавались условия третьего рода, позволяющие учитывать теплообмен грунта с атмосферой при наличии в зимнее время на поверхности снежного покрова различной высоты. На боковых границах, соответствующих положению скважин, также определены условия теплообмена третьего рода посредством задания устьевой температуры и коэффициента теплоотдачи скважины.

На нижней границе расчетной области принята постоянная температура грунта (Т0), равная минус 2,97 ºС. Температура и кодировка грунта представлена на рисунке 2. В грунтах присутствует соль.

Прогнозный расчет температурного режима грунтов в устьевой зоне скважин производился при следующих исходных условиях:

температура газа в скважине равна плюс 22 ºС;

для теплоизоляции скважины применяется теплоизолированная насосно-компрессорная труба (НКТ) типоразмером 114×168 мм производства «Электра» (Канада) с коэффициентом теплопроводности λ=0,042 Вт/(м•ºС);

пространство между эксплуатационной колонной и затрубным пространством заполнено цементным камнем плотностью 1950 кг/м3;

годовой ход температуры воздуха задавался помесячно (метеостанция Харасавэй). Среднегодовая температура воздуха составляет минус 9,8 ºС. Среднемесячная температура самого холодного месяца (февраля) составляет минус 23,9 ºС, самого теплого (августа) – плюс 5,7 ºС.

- мощность снежного покрова в зимний период составляет от 0,19 до 0,58 м;

среднегодовая скорость ветра равна 7 м/с;

- на природный грунт сделана насыпь и уложен теплоизоляционный ковер в середине сентября (моделирование наихудших условий).

Для сохранения устойчивости и предотвращения деформации грунтового основания приустьевой зоны скважины предусматривается установка 16 труб охлаждающих вертикальных (ТОВ) системы вертикальной естественнодействующей трубчатой (ВЕТ) длиной 13 м; укладка вокруг устья скважины на глубине 0,7 м от поверхности отсыпки теплоизоляционного экрана из пеноплэкса (λ=0,033 Вт/(м•ºС)) толщиной 200 мм и размером 10×10 м.

Расчет выполнен на 5 лет эксплуатации скважины.

В результате прогнозного расчета температурной стабилизации грунтов основания с применением системы «ВЕТ» можно сделать выводы:

- уменьшение радиуса растепления грунтов в области расположения ТОВ (в верхних слоях основания): после первого года работы системы охлаждения максимальный радиус растепления

равен 1,15 м (рисунок 3); на конец второго года радиус уменьшается до 1,05 м (рисунок 4); на конец третьего года происходит стабилизация грунтов. Радиус растепления составляет 1,0 м и остается неизменным в последующие годы. Температура грунта на конец пятого лета представлена на рисунке 5;

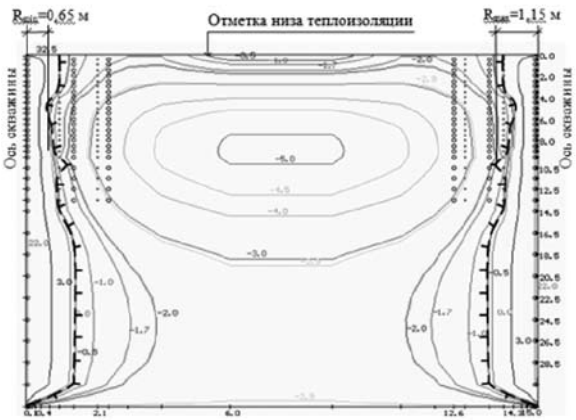


Рисунок 3 – Температура грунта на конец первого лета (1 октября), разрез 1-1

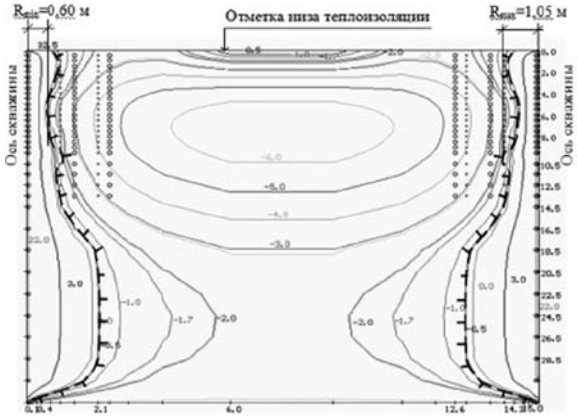


Рисунок 4 – Температура грунта на конец второго лета (1 октября), разрез 1-1

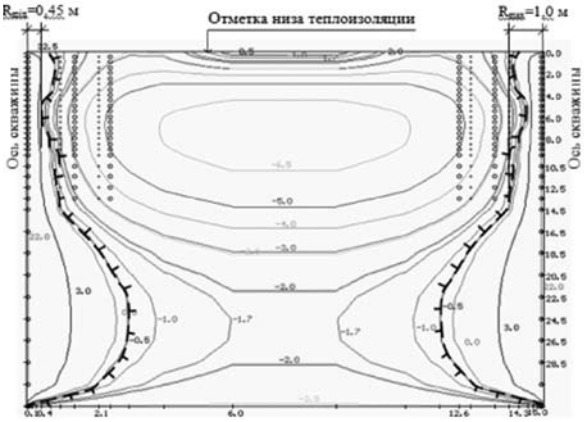


Рисунок 5 – Температура грунта на конец пятого лета (1 октября), разрез 1-1

- увеличение теплового влияния газовой скважины на нижние слои грунта в зоне отсутствия ТОВ. К концу первого летнего периода максимальный радиус растепления составляет 1,45 м, к концу пятого года – 3 м

Числовые показатели радиусов растепления в результате эксплуатации газовой скважины за пятилетний период представлены в таблице 1. Полученные в результате работы охлаждающей системы температуры грунта в термометрических скважинах (ТТ1 и ТТ2) на 1 октября каждого гора работы показаны на рисунках 6 и 7.

Рассмотрим растепление приустьевой зоны этих же скважин без применения систем температурной стабилизации грунтов.

В результате выполненного прогнозного расчета получены следующие результаты: к концу первого года эксплуатации скважины радиус растепления в приустьевой зоне составляет от 1,0 до 2,3 м (рисунок 8). На второй год радиус растепления увеличивается до 1,4-2,1 м (рисунок 9). Даже за пятилетний период эксплуатации добывающих скважин в околоствольном пространстве существенно повышаются температуры многолетнемерзлых пород, интенсивно происходит их оттаивание. К концу пятого года работы скважины радиус растепления достигает значения (рисунок 10).

Рассмотренный выше пример служит доказательством того, что термостабилизация грунтов приустьевой зоны скважин необходима для нормальной работы скважин в период их эксплуатации.

При проектировании систем температурной стабилизации грунтов на обустройстве сеноманаптских залежей Бованенковского НГКМ для кустов газовых скважин в зависимости от состояния грунта применялись схемы как с одним контуром расстановки труб ТОВ, так и с двумя контурами.

Таблица 1 – Радиусы растепления (м) за пятилетний период эксплуатации скважины

Период	Радиус растепления грунтов в зоне расположения ТОВ, м	Радиус растепления грунтов в зоне отсутствия ТОВ, м
Конец 1-ой зимы (25 мая)	0,30-0,50	1,40
Конец 1-го лета (1 октября)	0,65-1,15	1,45
Конец 2-ой зимы (25 мая)	0,30-0,50	2,10
Конец 2-го лета (1 октября)	0,60-1,05	2,15
Конец 3-ой зимы (25 мая)	0,30-0,50	2,40
Конец 3-го лета (1 октября)	0,50-1,00	2,45
Конец 4-ой зимы (25 мая)	0,30-0,50	2,50
Конец 4-го лета (1 октября)	0,45-1,00	2,70
Конец 5-ой зимы (25 мая)	0,30-0,50	2,90
Конец 5-го лета (1 октября)	0,45-1,00	3,00

Схема одноконтурной расстановки применялась при разработке проекта термостабилизации приустьевой зоны куста скважин №33, где трубы охлаждающие, вертикальные (ТОВ) длиной 13 м расположены в одном кольцевом осесимметричном контуре вокруг эксплуатационной скважины.

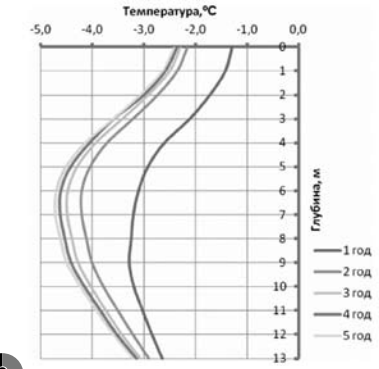
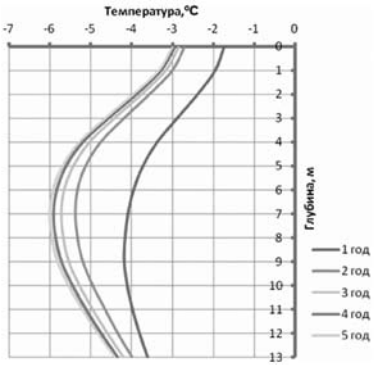


Рисунок 6 – Температура грунта по глубине в термометрической скважине 1 (ТТ1) на конец летнего периода (1 октября)

Рисунок 7 – Температура грунта по глубине в термометрической скважине 2 (ТТ2) на конец летнего периода (1 октября)



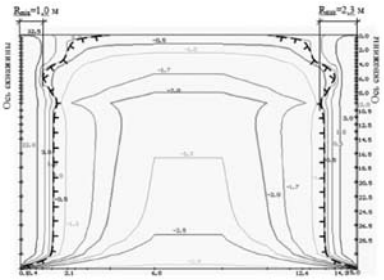
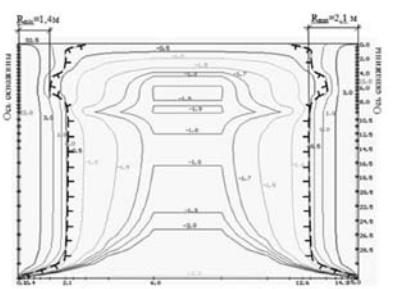


Рисунок 8 - Температура грунта на конец первого лета (1 октября)

Рисунок 9 - Температура грунта на конец второго лета (1 октября)



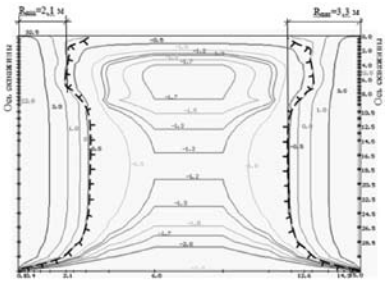
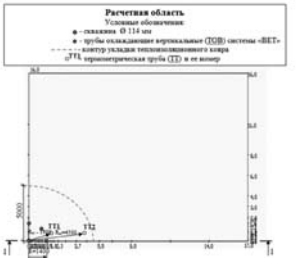


Рисунок 10 - Температура грунта на конец пятого лета (1 октября)

Рисунок 11 - Расчетная область в плане



Радиус контура R=1400 мм. ТОВ вокруг ствола скважины располагаются на окружности с одинаковым шагом вдоль этой окружности.

В области расчета перпендикулярно дневной поверхности проходит ось скважины, пересекающая вертикально всю область расчета. Вокруг скважины расставлены замораживающие колонки с длиной меньшей глубины нижней границы расчетной области. Расчетная область в плане показана на рисунке 11.

На нижней границе расчетной области принята постоянная температура грунта (Т0), равная минус 2,33 0С. Прогнозный расчет производился при следующих исходных условиях:

температура газа в скважине равна плюс 28 0С;

- пространство, образовавшееся в процессе бурения между скважиной диаметром 490 мм и эксплуатационной колонной диаметром 245 мм, полностью заполнено облегченным тампонажным раствором с армирующими добавками плотностью 1500кг/м3, λ=0,6 Вт/(м•0С);
- скважина не теплоизолирована;
- годовой ход температуры воздуха задавался помесячно (метеостанция Харасавэй);

мощность снежного покрова в зимний период составляет от 0,19 до 0,58 м;



Рисунок 12 – Температура и кодировка грунта на 15 сентября

- наличие на поверхности грунта, вокруг устья скважины, теплоизоляционного экрана из пеноплэкса, толщиной 200 мм и радиусом 5000 мм, теплопроводность которого λ=0,033 Вт/(м•0С);
- на природный грунт сделана насыпь и уложен теплоизоляционный ковер в середине сентября (приняты наихудшие условия для моделирования задачи). Температура и кодировка грунта на начало расчета представлены на рисунке 12.

По результатам расчета нестационарного теплового поведения системы «скважина – породы» обосновано применение охлаждающих колонок (ТОВ) в сочетании с поверхностной теплоизоляцией. По результатам прогнозного

расчета, видно, что в устьевой зоне на момент окончания первого летнего периода радиус оттаивания пород составляет 1,3 м (рисунок 13); за пределами зоны оттаивания грунты находятся в твердомерзлом состоянии, что соответствует условиям поставленной задачи. При дальнейшей работе охлаждающей системы радиус оттаивания пород уменьшается. В конце третьего летнего периода радиус оттаивания пород составляет 1,2 м (рисунок 14).

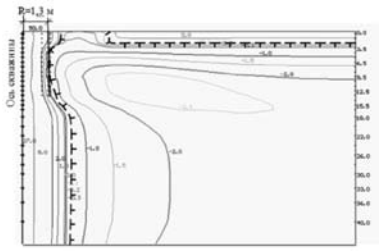


Рисунок 13 - Температура грунта на конец первого лета (1 октября)

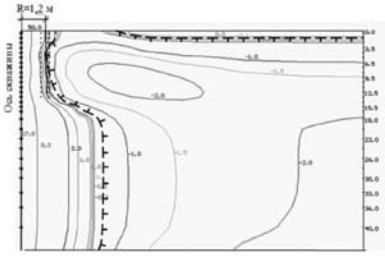


Рисунок 14 - Температура грунта на конец третьего лета (1 октября)

Примером двухконтурной расстановки труб ТОВ охлаждающей системы ВЕТ может служить площадка поглощающих скважин 1-4 на Бованенковском нефтегазоконденсатном месторождении.

В качестве объекта рассматриваем формирование термического поведения массива многолетнемерзлых пород (ММП), содержащего тепловыделяющую вертикальную скважину, окруженную системами ВЕТ, в условиях нестационарного сезонного формирования теплового состояния пород, в том числе и приустьевой зоны. Система температурной стабилизации грунтов каждой скважины состоит уз двух автономных охлаждающих систем ВЕТ. Радиусы контуров расстановки труб ТОВ равны 1, 0 м и 2,8 м. На рисунке 15 показана расчетная область в плане.

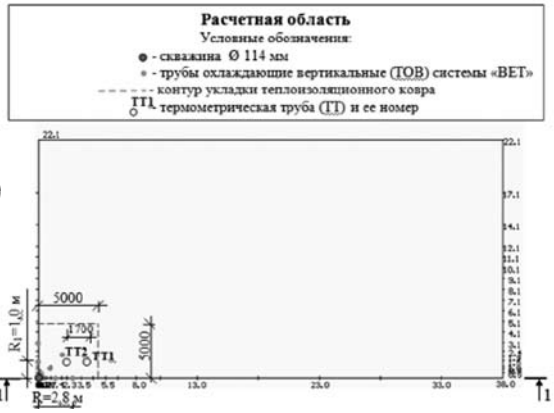


Рисунок 15 – Расчетная область в плане

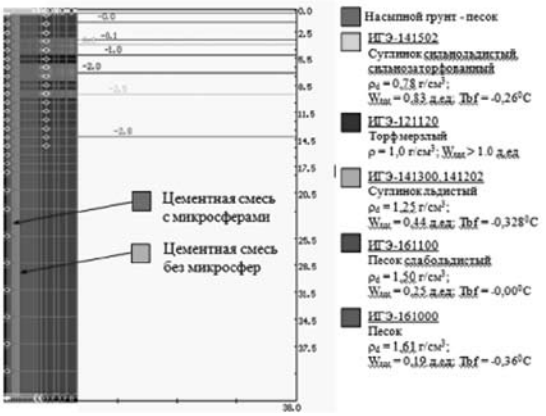


Рисунок 16 – Температура и кодировка грунта на октябрь

На верхней границе расчетной области задавались граничные условия третьего рода с учетом снежного покрова. На нижней границе расчетной области принята постоянная температура грунта (Т0), равная минус 2,870С.

Конструкция скважины принята следующая: межтрубное пространство заполнено облегченным расширяющимся цементным раствором на основе «Аркцемента» плотностью 1400 кг/м3 с микросферами и цементным раствором на основе «Аркцемента» плотностью 1820 кг/м3 (рисунок 16). Отметка нуля на вертикальном разрезе графиков соответствует отметке низа теплоизоляции.

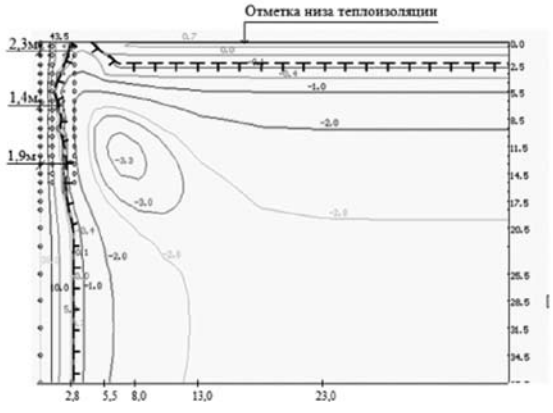


Рисунок 17 – Температура грунта на конец первого лета (1 октября)

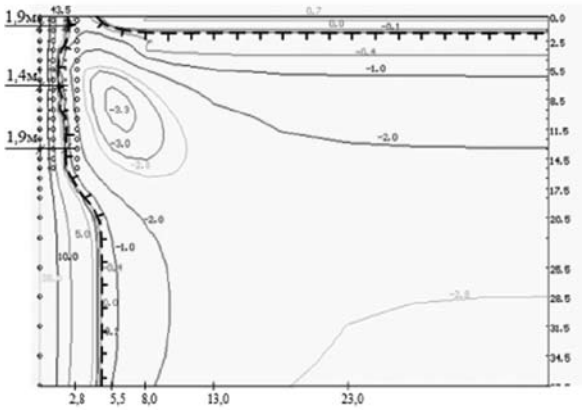


Рисунок 18 – Температура грунта на конец третьего лета

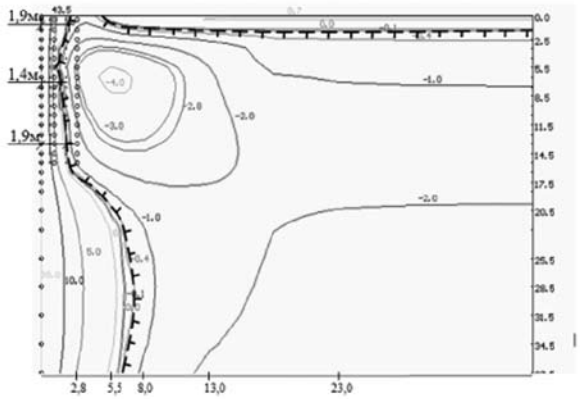


Рисунок 19 – Температура грунта на конец восьмого лета

Температура продукта в скважине равна плюс 400С.

Результаты прогнозного расчета показывают, что после первого летнего периода радиусы растепления составляют 1,4-2,3 м (рисунок 17). Уже к концу третьего года происходит стабилизация грунтов. Ореол оттаивания пород вокруг скважины имеет радиус 1,4-1,9м и остается постоянным в последующие годы работы скважины (рисунки 18, 19).

Выводы:

Для обеспечения устойчивости как подкрепленного обсадными колоннами ствола скважины, так и всех дополнительных приустьевых сооружений и конструкций скважины в процессе ее эксплуатации в районах распространения многолетнемерзлых пород грунты основания должны использоваться по I-му принципу (согласно СНиП 2.02.04-88).

Эксплуатация скважин в районах развития ММП без применения систем охлаждения грунта приводит к существенному оттаиванию пород и формированию техногенных термокарстовых воронок значительных размеров.

Наиболее эффективными средствами предотвращения оттаивания пород в устьевой зоне является использование теплоизоляции устья трубы, установка труб ТОВ охлаждающей системы ВЕТ и укладка термоизоляционного экрана на поверхности.

Из рассмотренных примеров видно, что даже наличие теплоизоляционной насосно-компрессорной трубы без применения системы ВЕТ не в состоянии предотвратить растепление грунтов вокруг устья скважины.

Прогнозные исследования подтверждают, что температурная стабилизация грунтов является важным элементом для непрерывной и безаварийной работы скважины.

Список литературы

1. ГОСТ 25100-95 Грунты. Классификация.-М.
2. Рекомендации по определению прочности мерзлых грунтов с морским типов засоления/ ФГУП ПНИИИС Госстроя России, Москва 2001.
3. Р.И. Медведский. Строительство и эксплуатация скважин на нефть и газ в вечномерзлых породах.- М.: Недра, 1987, – 230 с.
4. РСН 67-87 Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами / Госстрой РСФСР. – М., 1988.
5. СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2005. – 52 с.
6. СНиП 23-01-99* Строительная климатология / Госстрой России. – М., 2006.
7. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий / Госстрой России. – М., 2004.
8. ТУ 3642-004-54098700-2006 Системы и установки криогенные / ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень, 2006.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ В БОРЬБЕ С МОРОЗНЫМ ВЫПУЧИВАНИЕМ СВАЙ И ФУНДАМЕНТОВ

В.В. Меркушина

ЗАО « Морозовский химический завод», г. Санкт-Петербург, e-mail: info@tdzm.spb.ru

Доклад детально излагает все уникальные свойства полисилоксанов, применение которых в лакокрасочных материалах позволит защитить поверхности от коррозии на длительный срок. Рассмотрена связь между строением полимеров и их основными свойствами. А также практический опыт применения материала Армокот® V500 на сваях эксплуатируемых в условиях мерзлых грунтов.

Начало истории ГУП завода им. Морозова ведется с 1884 года, когда «Русским акционерным обществом для выделки и продажи пороха» был основан Шлиссельбургский Пороховой завод. В дореволюционный период завод занимался выпуском дымных порохов различных марок и бездымных пироксилиновых порохов для военных целей и развивающейся в России горнорудной промышленности.

В 1957 году на заводе было организовано производство электроизоляционных материалов для обеспечения, в основном, потребностей Ленинградского завода «Электросила», который, в тот момент, выполнял госзаказ в связи с Кубинским ракетным кризисом. Материалы были предназначены для ракетных войск, эксплуатируемой в тропическом климате.

С начала 60-х годов впервые в стране организуется производство органосиликатных композиций, выпуск которых продолжается и в настоящее время.

На базе Государственного завода имени Морозова было создано опытное производство, на котором первоначально производилась отработка рецептуры и технологического процесса производства специальных композиций, разработанных для целей военно-промышленного комплекса. Из года в год по мере роста популярности ОСК были разработаны новые рецептуры атмосферостойких, термостойких, электроизоляционных, химически стойких, радиационностойких композиций. Государственный завод имени Морозова являлся единственным изготовителем ОСК.

С 2003 года начался новый этап жизни - на базе 3 цеха ГУП завода им. Морозова было создано ЗАО «Морозовский химический завод». В настоящее время Морозовским химическим заводом выпускается большое количество, как уже хорошо известных ОСК, выпускаемых по ТУ 84-725-78, так и новых материалов под торговой маркой «Армокот®».

Огромное внимание в выпуске продукции уделяется качеству. Прежде чем материал попадет в руки потребителя он проходит трехуровневый контроль:

1. входной контроль сырья и вспомогательных материалов
2. технологический контроль производственного процесса
3. контроль готовой продукции

Система менеджмента качества завода сертифицирована на соответствие международному стандарту ISO 9001:2008.

Важно то, что материалы, производимые заводом, являются многофункциональными лакокрасочными материалами.

Полисилоксановые лакокрасочные материалы «Армокот®» («Armocoat®») представляют собой суспензии мелкодисперсных силикатных наполнителей в органических растворах полисилоксанов, модифицированных акриловыми смолами и соединениями на их основе, в присутствии функциональных добавок, противокоррозионных пигментов и высокодисперсных светостойких пигментов неорганических и/или органических, сочетают наиболее ценные функции покрытий. Уникальные свойства полисилоксанов обусловлены наличием в основной цепи силоксановой связи и химическим строением.

Полисилоксаны - один из видов кремнийорганических полимеров, весьма перспективны для защиты от коррозии в промышленных средах. Полисилоксановые покрытия обеспечивают долгосрочную защиту конструкций и объектов в различных климатических условиях. Покрытия на основе полисилоксановых пленкообразующих характеризуются высокими физико-механическими свойствами, минимальным водопоглощением, влагостойкостью, атмосферостойкостью, радиационной стойкостью, длительное время обладают отличной адгезией к металлу, бетону и др. строительным материалам, стойкостью к УФ-лучам, перепаду температур, гидрофобностью, морозостойкостью, образуют паропроницаемое покрытие.

Именно поэтому полисилоксановые покрытия были рекомендованы НИИ Оснований и подземных сооружений Госстроя СССР в борьбе с морозным выпучиванием свай и фундаментов.

Малонагруженные фундаменты и сваи трубопроводов выпучиваются в зимний период года.

Пучинистые явления - коварные и бесцеремонные процессы, возникающие во влажных глинистых, мелкопесчаных и пылеватых грунтах при их сезонном промер¬зании. Пучинистые явления - это не только большие деформации грунта, но и огром¬ные усилия - в десятки тонн, способные

привести к большим разрушениям. [1]

Морозное пучение связано с тем, что в процессе замерзания влажный грунт увеличивается в объеме.

Происходит это из-за того, что вода увеличивается в объеме при замерзании на 12%. Поэтому, чем больше воды в грунте, тем он бо¬лее пучинистый. Различают касательные и нормальные силы морозного выпучивания. Под касательными силами понимается воздействие промерзающего пучинистого грунта вдоль его боковой поверхности, под нормальными силами – воздействие промерзающего пучинистого грунта на сваю и подошву фундамента. [1]

Смерзание грунта с фундаментом происходит вследствие кристаллизации воды на его поверхности, т.е. образование новой фазы – ледяной прослойки на контакте мерзлого грунта и сваи, фундамента.

Касательные силы выпучивания складываются из сил примерзания грунта к свае/фундаменту, из сил трения мерзлого грунта по боковой поверхности сваи/фундамента и из сил трения мерзлого грунта по мерзлому грунту. По экспериментальным данным, при выпучивании обычного железобетонного призмовидного фундамента силы примерзания грунта к поверхности фундамента составляют 70-80 %, силы трения мерзлого грунта о поверхность – 20-30 %. [1]

Снижение сил примерзания можно достичь за счет изменения смачиваемости поверхности материала. Если материал, содержащий полисилоксановые соединения, нанести на поверхность металла, бетона, то атомы или группы полисилоксановых соединений реагируют с гидроокисями и окисями металлов. В образовавшемся органосилоксане связи, обеспечивающие физическое и химическое взаимодействие с материалом обращены к поверхности, а органогенные группы, обрамляющие атом Si, направлены наружу. Благодаря такому распределению полисилоксанов, на поверхности материала при малых его количествах обеспечивается большой водоотталкивающий эффект. [1]

Применение полисилоксанов, модифицированных акриловыми смолами, понижает поверхностное натяжение на границе с воздухом и резко уменьшает смачивание поверхности водой. Проникновение воды в поры, которые защищены гидрофобным внутренним слоем, практически невозможно, несмотря на то, что воздух и водяной пар проникают через такие поры легко. Материал «дышит». [2]

Достаточно часто можно наблюдать, что капли воды в свободном состоянии принимают сферическую форму. Такая способность жидких тел к максимальному уменьшению своей поверхности вызвана взаимным притягиванием молекул жидкости, и, соответственно, желанием жидкости занять минимальный объем. Когда капля жидкости находится на поверхности твердого тела, кроме межмолекулярного притягивания в середине капли, имеет место притягивание молекул жидкости и твердого тела. Если притягивание между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем притягивание между молекулами самой жидкости, то капля теряет свою первоначальную сферическую форму и растекается тонким слоем по твердой поверхности, смачивает ее, проникает в поры. В результате увеличения своего объема при замерзании и возникновения значительного давления внутри материала, вода разрушает его. Если притягивание между молекулами жидкости больше, чем притягивание между молекулами жидкости и твердого тела, то капля жидкости сохраняет свою сферическую форму, только немного приплюснутую, при этом жидкость находится на поверхности твердого материала, не смачивает его, не проникает вовнутрь пор твердого материала, свободно может скатиться с него. [3]

Конечные продукты пленкообразования представляют собой нерастворимые неплавкие пространственносшитые полимеры сетчатой структуры.

Особенностью пленкообразования является способность реакционной массы при определенной степени конденсации превращаться в состояние геля. После достижения точки гелеобразования вязкость массы растет. Пленка из жидкой превращается в каучукоподобную и, наконец, в твердую, жесткую. Причем твердость со временем нарастает. В таких покрытиях отсутствует эффект меления, которому со временем подвержены покрытия на эпоксидной основе. Не происходит истончения слоя материала. [2]

Немаловажным свойством для покрытия является поверхностная гладкость. Полисилоксаны аккумулируются на поверхности покрытия при отверждении и образуют тончайшую смазывающую пленку. [3]

Стоит отметить высокую атомсферостойкость материалов Армокот®.

Стойкость покрытий к УФ – старению обусловлена полисилоксановым пленкообразователем, не имеющим активных функциональных групп. [2]

Все эти качества полисилоксанов, выпускаемых Морозовским химическим заводом, позволили применить материал Армокот® V500 на сваях в условиях пучинистых грунтов взамен материала КО-174, КО-198.

Специалисты ОАО «Гипровостокнефть» в качестве защиты стальных свай от морозного пучения в грунтах на Севере России на объекте строительства надземных эстакад нефтепроводов и обустройства месторождений в Республике Коми применили продукцию ЗАО «Морозовского химического завода».

Традиционно, для таких целей применялась эмали КО-174, КО-198. Но отмечая гидрофобные

свойства данных материалов, необходимо отметить существенный недостаток, не позволяющий обеспечить долговечную защиту поверхности – это малая толщина покрытия 30-40 мкм. При шероховатости металла в 30-60 мкм (достигаемой при абразивной очистке) данной толщины недостаточно для надежного укрытия всех пиков, а это приводит к быстрому появлению очагов коррозии на покрытии.

Материал Армокот® V500 по сравнению с КО-174, 198, обладает высоким содержанием сухого остатка, что позволяет наносить покрытие толщиной 200 мкм, это повышает коррозионную стойкость покрытия, делает его долговечным.

По результатам практического применения материал Армокот® V500 получил положительный отзыв от ОАО «Гипровостокнефть»: на данный момент после 3-х сезонов оттаивания и замерзания грунтов никаких нареканий со стороны Заказчиков не поступало.

В настоящее время наш завод совместно с ведущими отраслевыми НИИ (среди них Гипротюменнефтегаз, Гипровостокнефть, Фундаментпроект и др.) проводит лабораторные испытания материала Армокот для защиты свай и фундаментов. Разрабатывается программа натурных испытаний. Результаты лабораторных испытаний мы планируем получить уже к концу января 2012 года.

Материалы Армокот соответствуют «Техническим требованиям к наружным атмосферостойким покрытиям металлоконструкций ОАО «ГАЗПРОМ», внесены в Нулевой реестр защитных покрытий ОАО «Газпром», применяются на многих объектах нефтегазовой, металлургической, атомной и других отраслях.

Список литературы

1. «Рекомендации по применению кремнийорганических соединений в борьбе с морозным выпучиванием фундаментов», М.: Стройиздат, 1974 г.

2. А.Д. Яковлев «Химия и технология лакокрасочных покрытий: Учебник для ВУЗов», СПб.: Химиздат, 2008 г.

3. В.В. Зуев, М.В. Успенская, А.О. Олехнович «Физика и химия полимеров: Учебное пособие», СПб.: Издательство ИТМО, 2010г.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАБИВНЫХ И БУРОЗАБИВНЫХ СВАЙ В ТАЛИКОВЫХ ЗОНАХ, ЗАЛЕГАЮЩИХ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОЙ ТОЛЩЕ

С.Г. Безволев[1], А.Н. Цеева[2]

[1]НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, г.Москва, e-mail: compgeo@yandex.ru
[2]ОАО «ЯкутПНИИС», г.Якутск, e-mail: antseeva@yapniis.ru

В статье рассмотрена применимость забивных и бурозабивных свай в таликовых зонах, подстилаемых многолетнемерзлыми грунтами. Выполнен анализ особенностей работы и обоснование схемы расчета свай, погружаемых с применением забивки через немерзлые грунты в многолетнемерзлую толщу. Представлена методика расчета несущей способности забивных и бурозабивных свай-трения, погружаемых через немерзлые грунты в пластичномерзлую толщу. Приведена методика расчета несущей способности опирающихся на слабосжимаемую толщу свай-стоек. Сформулированы основные выводы и рекомендации по разработке и введению в проектную практику методики расчета забивных и бурозабивных свай в таликовых зонах, подстилаемых многолетнемерзлыми грунтами.

Введение

Во многих регионах распространения многолетнемерзлых грунтов, например в районе г. Якутска [1, 2], характерным является залегание под слоем сезонного промерзания так называемых таликовых зон из немерлых грунтов, подстилаемых многолетнемерзлой толщей. При этом под немерзлыми таликовыми грунтами в кровле многолетнемерзлой толщи залегают высокотемпературные пластичномерзлые грунты средней прочности и сжимаемости. С ростом глубины температура грунтов постепенно уменьшается, а прочность и жесткость увеличивается вплоть до величин характерных для практически несжимаемых твердомерзлых грунтов.

В этих условиях одним из самых рациональных видов фундирования может являться устройство свайных фундаментов из забивных и бурозабивных свай. При устройстве последних используются, облегчающие забивку свай в прочную многолетнемерзлую толщу, лидерные скважины, диаметр которых должен быть меньше диагонали поперечного сечения сваи.

Погружение свай с использованием забивки в многолетнемерзлые грунты находит все большее применение и по причине появления в последние годы современных тяжелых гидромолотов. В частности, большое распространение получил зарубежный гидромолот фирмы Юнтан. В настоящее время налажено производство тяжелых гидромолотов и в России. Например, в Новосибирске на базе гусеничного экскаватора ДЭК-251 выпускаются тяжелые сваебойные гидромолоты «Ропат» (МГ5ш и др.). Данная техника позволяет погружать в практически любые пластичномерзлые грунты без крупнообломочных включений железобетонные призматические сваи с квадратными сечениями 300х300, 350х350 и 400х400 мм цельные длиной до 16 м и составные — длиной до 28 м. Возможно также применение свай из металлического проката. При этом следует отдавать предпочтение более жестким профилям, в частности профилям двутаврового поперечного сечения. В случае применения металлических труб следует обращать внимание на то, что в связи относительно небольшой жесткостью на изгиб возможны их значительные отклонения от вертикального проектного положения. В тоже время стальная труба с «окном» вырезенным в стенке у верхнего конца, может успешно применяться в качестве лидера. При погружении последнего пластичномерзлый грунт непрерывно поднимается по трубе и выдавливается через окно наружу.

В высокотемпературные пластичномерзлые глинистые грунты, в частности при их температуре выше -0,5°С для супесей, -0,8°С для суглинков и -1,2°С для глин, указанные сваи могут погружаться обычными молотами. Выбор молота для забивки свай производят исходя из предусмотренной проектом несущей способности сваи, ее массы и прочности грунта. Ориентировочно масса ударной части молота должна быть при длине сваи более 12 м не меньше массы сваи, а при длине до 12 м — не менее 1,25-1,5 ее массы. Можно также пользоваться указаниями свайных норм [3, 4], в которых соотношение массы молота и железобетонной сваи к расчетной энергии удара рекомендуется принимать: не менее 3 — для подвесных молотов, не менее 5 — для штанговых дизель-молотов и не менее 6 — для трубчатых дизель-молотов.

Производство работ целесообразно осуществлять в период сезонного оттаивания, обычно в летнее и осеннее время, поскольку зимой грунты поверхностного деятельного слоя становятся твердомерзлыми. (Возможность погружения свай надежно устанавливается путем пробной забивки). Без дополнительных операций, но с некоторым снижением производительности установок удается обходиться при погружении свай мощными гидромолотами, если глубина промерзания не превышает 0,7 м. Обычными молотами забивка свай без дополнительных мер возможна при глубине промерзания — до 0,3 м; при промерзании до 0,5 м с успехом используется пробойник, который погружают на всю глубину мерзлого грунта и затем извлекают, сваю устанавливают в образовавшуюся лунку и добивают до проектной отметки. В других случаях предотвращают замер-

зание грунта путем заблаговременного утепления мест забивки свай подручными материалами. Чтобы уменьшить глубину промерзания, дно котлована засыпают слоем снега высотой 70-80 см; по мере производства работ снег убирают бульдозером. В случае необходимости мерзлый грунт на месте забивки свай разрушают способами, принятыми при разработке мерзлых грунтов: устраивают лидирующие скважины или нарезают прорези по рядам будущих свай; оттаивают слой мерзлого грунта с помощью ручных или станковых термобуров с реактивными горелками; устраивают котлован взрывным способом и др.

1. Анализ особенностей работы и обоснование схемы расчета свай, погружаемых забивкой через немерзлые грунты в многолетнемерзлую толщу.

Одним из преимуществ погружения свай забивкой заключается в том, что приложение расчетной нагрузки на эти сваи можно начинать практически через 1-2 дня после окончания забивки. В то время как для буроопускных свай (этот тип широко применяется в Якутске), погружаемых в предварительно пробуренные и оттаявшие скважины большего, чем у сваи диаметра, время ввода в эксплуатацию может достигать 100 и более суток [5, 6].

Однако главным преимуществом забивных свай по сравнению с буроопускными является значительно большая приведенная (на единицу объема сваи) несущая способность забивной сваи. Особенно большой вклад в эту способность оказывает повышенное трение боковой поверхности забивной сваи. Причина этого преимущества кроется в особенностях работы окружающего забивную сваю грунтового массива под нагрузкой. Если для буроопускной сваи сопротивление сдвигу реализуется по ослабленной поверхности смерзания грунтового раствора со сваей или с окружающим природным мерзлым грунтом, то у забивной сваи сопротивление сдвигу реализуется в контактной зоне по грунту благоприятно уплотненному и преднапряженному при забивке. Такая схема сдвига грунта по грунту характерна для работы погружаемых в талые грунты забивных, задавливаемых и завинчиваемых свай и металлических профилей. Отметим, что благодаря реализации в условиях талых грунтов схемы сдвига грунта по грунту для металлических свай в СНиП 2.02.03 «Свайные фундаменты» [3] и СП 2.02.03 «Проектирование и устройство свайных фундаментов» [4] не предусмотрено никаких понижающих коэффициентов. В то время как для сдвига по поверхности смерзания грунта с металлом в СНиП 2.02.04 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [7] предусмотрен понижающий коэффициент 0,7.

Величина сопротивления сдвига грунта по грунту в сильной степени зависит от величины угла внутреннего трения грунта φ. Установлено, что с переходом талого грунта в пластичномерзлое состояние и с дальнейшим понижением температуры величина φ у грунта значительно возрастает [5]. Поэтому приемлемая для расчета буроопускных свай обычная практика пренебрежения учетом влияния величины φ и горизонтальных нормальных напряжений в грунте на его сопротивление сдвигу (трение по боковой поверхности) становится весьма нерациональной для расчета несущей способности забивных свай.

С другой стороны, основанная на пренебрегающих деформациями грунта решениях теории предельного равновесия идеально связной среды, методика СНиП 2.02.04 [7] обуславливает завышение величин расчетных сопротивлений мерзлого грунта под нижним концом сваи R, подсчитанных по величине так называемого эквивалентного сцепления грунта ceq. Для разработки более адекватной методики необходимо привлечение более совершенной упругопластической модели, учитывающей зависимость степени мобилизации прочностных характеристик грунта от реализующейся схемы его разрушения (хрупкое, хрупко- пластическое, пластическое).

Заложенный в СНиП 2.02.04 [7] упрощенный способ расчета несущей способности свай по величине сцепления грунта ceq в случае забивных свай препятствует повышению надежности и рационализации фундаментных конструкций.

Неадекватность пренебрежения величиной φ (фактически принятия φ = 0) подтверждается экспериментальными данными, согласно которым величина начального (упруго-мгновенного), а также предельно длительного (вязко-пластического) сопротивления мерзлых грунтов одноосному сжатию Rc и растяжению Rt различаются 2-6 раз [5], в то время как согласно концепции φ = 0 они должны совпадать. Фактически при одноосном сжатии случай φ = 0 соответствует лишь схеме упругомгновенного хрупкого раскалывании образца под углом α = +-45°. Однако для пластичномерзлых грунтов такая схема абсолютно не характерна, а типичным является вязкопластическое разрушение образца по схеме «бочки» при значительных допредельных деформациях (E_R = 0,1-0,15).

Неявный (и неопределенный!) учет влияния φ величиной «эквивалентного» сцепления ceq принятой по данным испытаний мерзлого грунта на одноосное сжатие или на вдавливание шарикового штампа не обеспечивает адекватной точности такого учета. В частности это подтверждается тем, что величины определенные этими двумя методами, ceq существенно отличаются друг от друга. В случае определения величины ceq по данным на одноосное сжатие и растяжения вместо совпадения ceq, различия составят указанные выше 2-6 раз, на которые отличаются R_c и R_t. Очевидная неэквивалентность эквивалентного сцепления ceq прямо следует из того, что постоянная величина ceq не в состоянии отразить влияние величины действующей на площадке сдвига нормального давления Qn.

Таким образом, особенности работы забивных свай погруженных в пластичномерзлые грунты, свидетельствуют о целесообразности разработки методики расчета несущей способности таких свай, учитывающей влияние величины угла внутреннего трения грунта φ и горизонтальных

нормальных напряжений в грунте на его сопротивление сдвигу по схеме грунт по грунту.

При разработке расчета несущей способности забивных свай на площадках, сложенных немерзлыми грунтами, подстилаемыми многолетнемерзлой толщей, необходимо рассмотреть два характерных случая (расчетной схемы работы свай).

а) Забивные и бурозабивные сваи-трения, погружаемые через таликовую толщу в пластичномерзлые грунты. В этом случае несущая способность сваи может складываться из предельных сопротивлений пластичномерзлого грунта под пятой сваи и по боковой поверхности сваи, а также некоторой доли предельного сопротивления немерзлого грунта по боковой поверхности сваи.

б) Забивные сваи-стойки, прорезающие немерзлые и пластичномерзлые грунты и опирающиеся нижним торцом на твердомерзлый или скальный слой. В этом случае несущая способность сваи состоит в основном из предельного сопротивления твердомерзлого или скального грунта под пятой сваи. Из-за небольшой осадки сваи-стойки предельные сопротивления пластичномерзлого и немерзлого грунта по боковой поверхности сваи не могут реализоваться.

Предварительно выбор схемы осуществляется по инженерно-криологическому разрезу. Далее схема уточняется при опытной забивке путем динамических испытаний, сущность которого основана на корреляции зависимости сопротивления сваи и отказа (глубина погружения сваи в грунт от одного удара молота, определяемая как среднее арифметическое значение величины глубины погружения сваи от определенного числа ударов - залога). Число ударов в залоге для молотов подвесных и одиночного действия принимают равным 10. Этот фактический отказ сравнивается с расчетным (проектным), который устанавливают проектировщики исходя из инженерно-геологических условий, с целью контроля несущей способности сваи. Отказ замеряется в конце погружения сваи с точностью до 0,5 мм не менее чем от трех последовательных залогов. Свая, не давшая расчетного (проектного) отказа, должна быть подвергнута контрольной добивке после ее «отдыха» в мерзлом грунте в течении 20 суток.

В случае, если отказ при контрольной добивке превышает расчетный, проектная организация должна провести контрольные испытания свай статической нагрузкой и откорректировать проект свайного фундамента или его часть. Сваи, не забитые на 10 - 15 % длины, следует подвергнуть обследованию с целью устранения причин, затрудняющих забивку (например, наличие в прорезаемой толще валунов и пр.) и проверке на ложный отказ. Случай, когда замеренный первоначально и контрольный отказы составляют менее 1 мм, может указывать на опирание острия забивной сваи на твердомерзлый или скальный грунт. В этом случае рекомендуется проведение контрольного изыскательского бурения для уточнения инженерно-криологического разреза.

Для окончательного выбора расчетной схемы работы свай (а или б) следует выполнить статические испытания свай на вертикальное вдавливание по ГОСТ 5686 [8] и определить по этим данным предельное сопротивление грунта вдавливанию сваи, а также, обратным расчетом модуль деформации E грунта в который погружена свая.

Обратный расчет рекомендуется выполнять по выведенной из решения Пулоса [9] для загруженной вертикальной силой и расположенной в однородном грунте жесткой свае формуле

$$E \approx \frac{0{,}6P_r}{\left(b + l/3{,}3\right)S_r} \qquad (1.1)$$

где b и l – соответственно ширина сечения и длина погруженной в грунтовое основание части сваи;

Pr – величина допускаемой расчетной вертикальной нагрузки на сваю, принимаемая согласно нормам [3, 4] в 1,2 раза меньшей нормативного значения предельного сопротивления испытываемой сваи Fu,n, определяемого согласно норм [3, 4];

Sr – соответствующая Pr величина осадки сваи S, определяемая по полученному при испытаниях согласно ГОСТ 5686 [8] графику зависимости S от вертикальной нагрузки P.

Если свая прорезает сильносжимаемые грунты и опирается пятой на слабосжимаемую толщу, для обратного расчета может использоваться формула Шлейхера выведенная из решения Буссинеска для загруженного вертикальной силой жесткого штампа на упругом полупространстве [5]

$$E \approx \frac{0{,}6P_r}{bS_r} \qquad (1.2)$$

где величины b, Pr и Sr – те же, что в (1.1).

Сопоставление зависимостей (1.1) и (1.2) показывает, что обратный расчет по формуле (1.2) прогнозирует меньшие величины E, что идет в запас надежности.

Случаи, когда полученная по формуле (1.1) величина модуля деформации E < 50 МПа, либо когда Pr /A < 20 МПа (где A – площадь пяты сваи) относятся к расчетной схеме работы висячей сваи а. Соответственно при E ≥ 50 МПа и Pr /A ≥ 20 МПа имеет место схема сваи-стойки б.

Далее в разделах 2 и 3 изложены рекомендуемые методики расчета несущей способности забивных свай соответственно для схем а и б.

2. Методика расчета несущей способности забивных и бурозабивных свай-трения, погружаемых через немерзлые грунты в пластичномерзлую толщу.

Для этого случая расчет должен производиться при использовании многолетнемерзлых грунтов по принципу I.

2.1. Расчет оснований фундаментов по первой группе предельных состояний (по несущей способности) производится исходя из условия:

$F \leq Fu/\gamma n$, (2.1)

где F - расчетная нагрузка на основание;

Fu – несущая способность основания свайного фундамента, определяемая расчетом согласно п. 2.2 и в случае необходимости дополнительно уточняемая по данным полевых испытаний свай согласно СНиП 2.02.04 [7];

γn – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый в соответствии с требованиями СНиП 2.02.01 «Основания зданий и сооружений» [10] в зависимости от вида и уровня ответственности сооружения определяемого по ГОСТ 27751 [11].

2.2. Несущая способность основания Fu, кН, вертикально нагруженной висячей сваи определяется по формуле

$$F_u = \gamma_t \gamma_c \left(RA + \sum R_{s,i} A_{s,i}\right) \quad (2.2)$$

где γt – температурный коэффициент, учитывающий изменение температуры грунтов основания в период строительства и эксплуатации сооружения, определяемый с учетом указаний п.2.5;

γc – коэффициент условий работы основания, принимаемый по указаниям п.2.4;

R – расчетное сопротивление мерзлого грунта под нижним концом сваи, кПа, определяется согласно указаниям п. 2.3;

A – площадь опирания сваи на грунт, м2, принимаемая для сплошных свай равной площади их поперечного сечения, для полых свай, погруженных с открытым нижним концом, – площади поперечного сечения сваи брутто при заполнении ее полости (бетоном, цементно-песчаным раствором или грунтом) на высоту не менее трех диаметров сваи;

Rs,i – расчетное сопротивление мерзлого грунта сдвигу у боковой поверхности сваи в пределах i-го слоя грунта, кПа, определяемое согласно указаниям п. 2.3;

As,i – площадь поверхности контакта i-го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, м2;

n – число выделенных при расчете слоев многолетнемерзлого грунта

Примечание. В случаях, когда слой сезонного промерзания - оттаивания не сливается с многолетнемерзлым грунтом, несущую способность свай в пределах таликовой зоны (немерзлого промежуточного слоя) грунта допускается учитывать по нормам [3, 4]. При этом должны быть предусмотрены меры по гарантированию расчетного уровня верхней поверхности многолетнемерзлого грунта, а расчетные сопротивления немерзлых грунтов (кроме крупнообломочных грунтов и песков со степенью влажности не превышающей 0,8) вдоль боковой поверхности свай, принимаемые по нормативным таблицам [3, 4], следует брать с понижающими коэффициентами: 1,2 – для глинистых грунтов, 1,1 – для песчаных водонасыщенных грунтов; для других грунтов понижающие коэффициенты определяют по опытным данным, либо принимают в запас надежности равными 2.

2.3. Расчетное сопротивление сдвигу у боковой поверхности забивной сваи Rs рекомендуется принимать в предположении сдвига по границе уплотненного контактного слоя грунта, то есть принимать Rs равным предельно длительному сопротивлению мерзлого грунта сдвигу по контактному слою грунта.

Для определения исходных данных к расчету предельно длительных значений R и Rs рекомендуется в лабораторных условиях производить испытания на сдвиг при различных уплотняющих нормальных давлениях σn (не менее 3 значений из условия, что максимальное давление должно быть равным напряжению от собственного веса грунта под подошвой сваи) с построением графика Rs - σn и определением расчетных значений удельного сцепления cI, кПа и угла внутреннего трения φI, °. Определение предельно длительных значений cI и φI в лабораторных условиях возможно также по данным испытаний мерзлых грунтов на трехосное сжатие с использованием в камере стабилометра незамерзающей жидкости для передачи гидростатической нагрузки.

Расчетные значения R, кПа, рекомендуется вычислять по формуле

$$R = \frac{2c_I \cos(\varphi_I)}{1 - \sin(\varphi_I)} + (1 + \sin(\varphi_I))\sigma_{gdI} \quad (2.3)$$

где cI – расчетное значение предельно длительного сцепления, кПа;

φI – расчетное значение предельно длительного угла внутреннего трения,°;

σgdI – расчетное значение бытового давления (от собственного веса грунта) в уровне пяты сваи, кПа, определяемое по формуле

$$\sigma_{gdI} = \sum_0^{z_d} \gamma_I dz \quad (2.4)$$

γI – расчетное значение удельного веса грунта, кН/м3;

zd – глубина заложения пяты сваи, м.

Расчетные значения Rs,i кПа, рекомендуется вычислять по формуле

$$Rs,i = cI + (1-\sin(\varphi I))\sigma giI \tan(\varphi I), \quad (2.5)$$

где σgiI – расчетное значение бытового давления на рассматриваемом уровне боковой поверхности сваи (середины i-го слоя грунта), кПа, определяемое аналогично (по формуле (2.4) с заменой

σgdI на σgiI и zd на zi – глубина середины i-го слоя грунта, м).

При отсутствии данных по cI и φI для определения минимальных расчетных значений R и Rs допускается использовать данные лабораторных испытаний по ГОСТ 12248 [12] мерзлых грунтов на одноосное сжатие и на вдавливание шарикового штампа.

При этом в запас надежности расчетные значения R, кПа, вычисляются по результатам испытаний мерзлых грунтов на одноосное сжатие по формуле

$$R = RcI + \sigma gdI, \quad (2.6)$$

где RcI – расчетное значение предельно длительного сопротивления грунта одноосному сжатию или по результатам испытаний грунтов на вдавливание шарикового штампа по формуле

$$R = 2ceqI + \sigma gdI, \quad (2.7)$$

где cIeg – расчетное значение предельно длительного эквивалентного сцепления, кПа.

При отсутствии данных по cI и φI допускается в запас надежности вычислять расчетные значения Rs, кПа, по результатам испытаний мерзлых грунтов на одноосное сжатие по формуле

$$Rs,i = 0,5RcI , \quad (2.8)$$

или по результатам испытаний грунтов на вдавливание шарикового штампа по формуле

$$Rs,i = ceqI . \quad (2.9)$$

Расчетное давление на мерзлый грунт под пятой сваи R, а также расчетные сопротивления мерзлого грунта сдвигу по контактному слою грунта Rs должны уточнятся с учетом расчетных температур грунта основания Tm, Tz и Te, определяемых теплотехническим расчетом выполняемого по указаниям СНиП 2.02.04 [7].

Примечание. Согласно СНиП 2.02.04 [7] расчетные температуры грунтов Tm, Tz и Te определяются расчетом теплового взаимодействия сооружения с многолетнемерзлыми грунтами основания в периодически установившемся тепловом режиме с учетом переменных в годовом периоде условий теплообмена на поверхности, формы и размеров сооружения, глубины заложения и расположения фундаментов в плане, а также теплового режима сооружения и принятых способов и средств сохранения мерзлого состояния грунтов основания.

Tm - максимальная в годовом периоде температура грунта в установившемся эксплуатационном режиме на глубине заложения фундамента zd, отсчитываемой от верхней поверхности многолетнемерзлого грунта;

Te – максимальная в годовом периоде средняя по глубине заложения фундамента zd температура многолетнемерзлого грунта в установившемся эксплуатационном режиме (эквивалентная температура грунта);

Tz – температура многолетнемерзлого грунта на данной глубине z от его верхней поверхности, принимаемая на момент установления температуры Te.

При расчетах несущей способности оснований значения R следует принимать при расчетной температуре грунта Tz на глубине zd, равной глубине погружения сваи.

Расчетные сопротивления сдвигу Rs,i следует принимать при температуре грунта Tz на глубине zi середины i-го слоя грунта.

Для расчета оснований сооружений III и IV уровней ответственности согласно ГОСТ 27751 [11], возводимых с сохранением мерзлого состояния грунтов, а также для выполнения предварительных расчетов оснований и привязки типовых проектов к местным условиям, расчетные значения прочностных характеристик мерзлых грунтов R и Rs, а также расчетные значения теплофизических характеристик грунтов допускается принимать по их физическим характеристикам, составу и температуре в соответствии с табличными данными, приведенными в СНиП 2.02.04 [7]. При этом расчетную величину Rs принимают равной табличному значению сопротивления мерзлых грунтов сдвигу по грунту Rsh. В запас надежности допускается также принимать расчетную величину Rs равной табличному значению сопротивления мерзлых грунтов сдвигу по поверхности смерзания с фундаментом Raf.

Различие в условиях работы грунта при температуре лабораторных испытаний и в проектируемом основании допускается учитывать с помощью коэффициента k, определяемого по формуле

$$k = Xp/ Xl, \quad (2.10)$$

где Xp и Xt – значение R или Rs соответственно для проектных и лабораторных условий, рассчитанные по формулам (2.3-2.9) по значениям R, Rsh или Raf, принимаемым по таблицам СНиП 2.02.04 [7]: для проектных условий - при расчетных температурах грунта, устанавливаемых согласно указаний СНиП 2.02.04 [7] (см. Примечание п. 7.2.3), а при определении прочностных характеристик грунта - при температурах T, принятых при лабораторных испытаниях (T ≤ Tbf - 1°C, где Tbf - температура начала замерзания грунта согласно данным СНиП 2.02.04 [7]).

При погружении свай в льдистые грунты с льдистостью i ≥ 0,2 расчетные значения R и Rs,i следует принимать с понижающим коэффициентом $ni = 1 - i_i$.

Для кратковременных нагрузок со временем действия t, равным или меньшим продолжитель-

ности перерывов между ними, расчетные значения R и Rs,i допускается принимать с повышающим коэффициентом nt в соответствии с данными табл. 2.1 [7].

Таблица 2.1 - Повышающий коэффициент nt

Время действия нагрузки t, ч	0,1	0,25	0,5	1	2	8	24
Коэффициент nt	1,7	1,5	1,35	1,25	1,2	1,1	1,05

2.4. Коэффициент условий работы основания γc принимается по составленной по данным [7] табл.2.2 в зависимости от вида и способов погружения свай.

Таблица 2.2 - Коэффициент условий работы основания γ

Виды фундаментов и способы их устройства	Коэффициент γc
Забивные или бурозабивные сваи при диаметре лидерных скважин менее 0,8 диаметра свай	1,0
Бурозабивные при большем диаметре лидерных скважин	0,9

2.5. Температурный коэффициент γt, учитывающий температурные условия работы основания, устанавливается расчетом в зависимости от состояния и температуры грунтов основания до загружения фундаментов и их изменения в процессе эксплуатации сооружения. Значения γt допускается принимать равными:

а) $\gamma t = 1,1$, если расчетная среднегодовая температура многолетнемерзлых грунтов To соответствует согласно критериев СНиП 2.02.04 [7] твердомерзлому состоянию грунта и не выше расчетной среднегодовой температуры на верхней поверхности многолетнемерзлого грунта To, устанавливающейся в основании сооружения в процессе его эксплуатации;

б) $\gamma t = 1,0$, если расчетная среднегодовая температура многолетнемерзлых грунтов To соответствует пластичномерзлому состоянию грунта и выше значения температуры To, устанавливающейся в процессе эксплуатации сооружения.

При расчетах свайных фундаментов трубопроводов, линий электропередач и других линейных сооружений коэффициент γt следует принимать равным 0,8.

2.6. Передача на фундаменты проектных нагрузок допускается, как правило, при температуре грунтов в основании сооружения не выше установленных на эксплуатационный период расчетных значений. В необходимых случаях следует предусматривать мероприятия по предварительному (до загружения фундаментов) охлаждению пластичномерзлых грунтов до расчетных значений температуры.

Вентилируемые подполья или другие виды охлаждающих устройств при возведении фундаментов на пластичномерзлых грунтах следует проектировать исходя из условия обеспечения ими требуемого понижения температуры грунтов при эксплуатации сооружения. Для сокращения сроков строительства и повышения расчетных нагрузок на фундаменты следует предусматривать предварительное (до возведения сооружения, но после погружения забивных свай) охлаждение пластичномерзлых грунтов (путем очистки поверхности от снега, с помощью СОУ и т. д.) при последующем поддержании расчетного температурного режима грунтов за счет постоянно действующих охлаждающих устройств.

При соответствующем обосновании расчетом основания по деформациям допускается загружать фундаменты при температурах грунта выше расчетных, но не выше значений: $T = T_{bf}$ - 0,5°C - для песчаных грунтов и $T = T_{bf}$ - 1°C - для глинистых, где T_{bf} – температура начала замерзания грунта согласно данным СНиП 2.02.04 [7]. Несущая способность основания Fu в этом случае должна определяться при расчетных температурах грунта, устанавливаемых без учета теплового влияния сооружения, принимая коэффициент γt по расчету, но не более 1,2.

2.7. Расчет забивных свай-трения на действие горизонтальных нагрузок (сил и/или моментов) и воздействий (температурного расширения ростверка и пр.), а также расчет по прочности ствола свай допускается производить по рекомендованной в СНиП 2.02.04 [7] методике.

3. Методика расчета несущей способности забивных и бурозабивных свай-стоек, опирающихся на слабосжимаемую толщу.

Этот расчетный случай возможен при использовании многолетнемерзлых по принципу II при опирании свай на практически непросадочные при оттаивании слабосжимаемые и скальные грунты. Иногда такие грунты расположены под залегающей с поверхности небольшой толщей многолетнемерзлых грунтов. При опирании острия забивных свай на твердомерзлые нескальные грунты расчет должен производиться при использовании многолетнемерзлых грунтов у нижнего конца сваи по принципу I.

3.1. Расчет свай-стоек по несущей способности при опирании их на скальные, слабосжимаемые или не оттаивающие твердомерзлые грунты следует производить исходя из условия

$$F \le \frac{F_u}{\gamma_k} - \gamma_p F_{neg} \qquad (3.1)$$

где F – расчетная нагрузка на сваю, кН;

Fu – несущая способность основания одиночной сваи-стойки, кН, определяемая по указаниям п. 3.2;

γk – коэффициент надежности, принимаемый в соответствии с указаниями норм [3, 4] в зависимости от вида сооружения, конструкции фундаментов и принятого способа определения несущей способности свай;

γp – коэффициент условий работы грунта по боковой поверхности свай в пределах оттаивающих грунтов, определяемый по опытным данным; в запас надежности допускается принимать γp = 1,1;

Fneg – отрицательная (негативная) сила трения оттаивающего грунта по боковой поверхности сваи, кН, определяемая по формуле

$$F_{neg} = u_p \sum_{i=1}^{n} f_{n,i} h_i \qquad (3.2)$$

где up – периметр поперечного сечения сваи, м;

fn,i – отрицательное трение i-го слоя оттаивающего грунта по боковой поверхности сваи, кПа, определяемое по опытным данным; допускается в запас надежности принимать расчетные значения fn,i по нормативным таблицам [3, 4];

hi – толщина i-го слоя оттаивающего грунта, м.

3.2. Несущую способность основания забивной сваи-стойки Fu, кН, опирающейся на скальный, слабосжимаемый или не оттаивающий твердомерзлый грунт рекомендуется определять по формуле

$$F_u = \left(R_{cI} + \sigma_{gdI}\right) A \qquad (3.3)$$

где RcI – расчетное значение временного сопротивления одноосному сжатию, кПа, скального грунта под нижним концом сваи в оттаявшем водонасыщенном состоянии или предельно длительного сопротивления одноосному сжатию неоттаивающего твердомерзлого грунта; для других слабосжимаемых грунтов (крупнообломочные грунты с песчаным заполнителем и твердые глинистые грунты с модулем деформации E ≥ 50 МПа) согласно [3, 4] принимается RcI = 20000 кПа;

A – площадь опирания сваи на грунт, м2, принимаемая для свай-стоек сплошного сечения или полых, нижний конец которых заполнен в пределах высоты трех диаметров бетоном, равной площади поперечного сечения брутто;

σ_{gdI} – расчетное значение бытового давления (от собственного веса грунта) в уровне пяты сваи, кПа, определяемое по формуле (2.4).

Для окончательных расчетов оснований сооружений повышенных уровней ответственности, а также оснований, сложенных выветрелыми, размягчаемыми, со слабыми прослойками скальными грунтами, несущую способность сваи-стойки Fu следует уточнять согласно СНиП 2.02.04 [7] по результатам испытаний свай статической нагрузкой.

3.4. Расчет забивных свай-стоек на действие горизонтальных нагрузок (сил и/или моментов) и воздействий (температурного расширения ростверка и пр.), а также расчет по прочности ствола свай допускается производить по рекомендованной в СНиП 2.02.04 [7] методике.

Выводы и рекомендации

1. Во многих регионах распространения многолетнемерзлых грунтов, например в районе г. Якутска, характерным является залегание под слоем сезонного промерзания таликовых зон подстилаемых многолетнемерзлой толщей.
2. В указанных в п.1 условиях одним из самых рациональных видов фундирования может являться устройство свайных фундаментов из забивных и бурозабивных свай.
3. Погружение свай с использованием забивки в пластичномерзлые грунты целесообразно осуществлять с применением тяжелых гидромолотов.
4. При погружении свай забивкой приложение расчетной нагрузки на сваи можно начинать практически через 1-2 дня после окончания забивки, в то время как для буроопускных свай время ввода в эксплуатацию может достигать 100 и более суток.
5. Преимуществом забивных и бурозабивных свай по сравнению с буроопускными является значительно большая, чем у буроопускных свай приведенная (на единицу объема сваи) несущая способность забивной сваи, за счет повышенного трения по ее боковой поверхности.
6. Приемлемая для расчета буроопускных свай нормативная практика пренебрежения учетом влияния величины угла внутреннего трения грунта и горизонтальных нормальных напряжений в грунте на его сопротивление сдвигу (трение по боковой поверхности свай) нерациональна для расчета несущей способности свай погруженных забивкой.
7. Особенности работы забивных свай погруженных в пластичномерзлые грунты свидетельствуют о целесообразности разработки методики расчета несущей способности таких свай, учитывающей влияние величины угла внутреннего трения грунта φ и горизонтальных нормальных напряжений в грунте на его сопротивление сдвигу по схеме грунт по грунту.
8. Несущая способность сваи-трения, погружаемых забивкой через таликовую толщу в пластичномерзлые грунты, складывается из предельных сопротивлений пластичномерзлого грунта

под пятой сваи и пластичномерзлого и немерзлого грунта по боковой поверхности сваи.

9. Несущая способность свай-стоек, прорезающих немерзлые и пластичномерзлые грунты и опирающихся нижним торцом на твердомерзлый или скальный, либо другой слабосжимаемый при оттаивании слой состоит в основном из предельного сопротивления твердомерзлого или слабосжимаемый грунта под пятой сваи. Из-за небольшой осадки сваи-стойки предельные сопротивления пластичномерзлого и немерзлого грунта по боковой поверхности сваи не могут реализоваться.

10. В разделах 2 и 3 представлены разработанные методики, предназначенные для расчетов несущей способности, соответственно, свай-трения и свай-стоек, погружаемых забивкой через таликовую толщу в многолетнемерзлые грунты.

11. Предварительно выбор типа сваи (расчетной схемы сваи-трения и сваи-стойки) осуществляется по инженерно-криологическому разрезу. Далее схема уточняется при опытной забивке посредством динамических испытаний. Окончательный выбор расчетной схемы работы свай путем статических испытаний свай на вертикальное вдавливание по ГОСТ 5686 [8] и определения по этим данным предельного сопротивления сваи и обратным расчетом по формуле (1.1) модуля деформации Е несущего сваю грунта.

12. Для внедрения представленных в разделах 2 и 3 методик расчета несущей способности свай, в том числе учета влияния горизонтальных нормальных напряжений и величины угла внутреннего трения грунта на его сопротивление сдвигу по схеме грунт по грунту при расчетах несущей способности свай погружаемых с применением забивки в пластичномерзлые грунты рекомендуется:

- проведение исследований и разработка стандартов на лабораторные испытания многолетнемерзлых грунтов на сдвиг и трехосное сжатие (адаптация методик ГОСТ 12248 [12.1 и 12.3] на мерзлые грунты), а также усовершенствование стандарта на одноосное сжатие (актуализации методики ГОСТ 12248 [12.4] с использованием комплексных методик ГОСТ 26447 [13] и ГОСТ 12248 [12.2]);
- проведение исследований и разработка стандарта на полевые динамические испытания многолетнемерзлых грунтов сваями при их опытной забивке (адаптация методики ГОСТ 19912 [14] на мерзлые грунты);
- проведение натурных исследований с испытаниями свай, погружаемых забивкой через таликовую толщу в пластичномерзлые грунты, на вдавливание и выдергивание по ГОСТ 5686 [8]).

Список литературы

1. Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутске/ Мельников И.И. и др.; Под ред. К.Ф. Войтковского.- М.: «Наука», 1968.
2. Геокриологическая карта СССР.- М.: МГУ, 1991.
3. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты.
4. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов.
5. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов (общая и прикладная).- М.: Высшая школа, 1973.
6. Руководство по определению сроков загружения свайных фундаментов при строительстве на вечномерзлых грунтах по принципу I/ Красноярский ПромСтройНИИпроект.- Красноярск, 1977.
7. СНиП 2.02.04-88*. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. (См. также Проект СНиП 2.02.04-2011. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.)
8. ГОСТ 5686-94. Грунты. Методы полевого испытания сваями.
9. Poulos H.G., Davis E.H. Pile Foundation Analysis and Design/University of Sydney.- Rainbom-Bridge, 1980.
10. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений; Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83)/ НИИОСП.- М.: Стройиздат, 1986.- 415 с.
11. ГОСТ 27751-88*. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. (См. также Градостроительный кодекс РФ от 29.12.2004 №190-ФЗ с доп. и изм.)
12. ГОСТ 12248-96. Грунты. Метод лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости: Гл.5 Методы определения характеристик прочности и деформируемости немерзлых грунтов: 12.1 Гл.5.1 Метод одноплоскостного среза; 12.2 Гл.5.2 Метод одноосного сжатия; 12.3 Гл.5.3 Метод трехосного сжатия; Гл.6 Методы определения характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов: 12.4 Гл.6.3 Метод одноосного сжатия.
13. ГОСТ 26447-85 Породы Горные. Метод определения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии.
14. ГОСТ 19912-2001. Грунты. Метод полевого испытания статическим и динамическим зондированием.
15. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах/ НИИОСП.- М.: Стройиздат, 1980.
16. Рекомендации по устройству свайных фундаментов на вечномерзлых грунтах/ НИИОСП.- М., 1980.
17. Рекомендации по наблюдению за состоянием грунтов оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на вечномерзлых грунтах/ НИИОСП.- М.: Стройиздат, 1982.
18. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах.- Л.: Стройиздат, 1977.
19. Цытович Н.А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах.- М.: Изд-во АН СССР, 1958.
20. Вялов С.С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов.- М.: Изд-во АН СССР, 1959.
21. Березанцев В.Г. Сопротивление грунтов местной нагрузке при постоянной отрицательной температуре// Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов/ Изд-во АН СССР.- 1953.- №1.

ВЛИЯНИЕ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В ЗАБАЙКАЛЬЕ

А.Г. Верхотуров

Забайкальский государственный университет, г. Чита, e-mail: weral0606@yandex.ru

В центральном и южном Забайкалье повышение средних годовых температур воздуха приводит к деградации многолетнемерзлых пород (ММП), опусканию их кровли, формированию несливающихся мерзлых пород. Это негативно сказывается на устойчивости бортов карьеров стенок горных выработок при открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых, нарушает сложившийся гидрогеологический режим и осложняет экологическое состояние территорий.

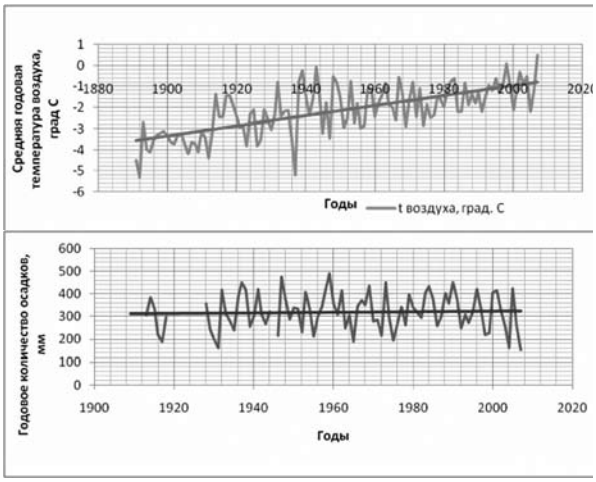


Рисунок 1 - Изменение средних годовых значений температуры воздуха (а) и годового количества осадков (б) по данным метеостанции г. Чита за период 1908-2007 гг. и линии трендов

В центральном и южном Забайкалье среднее годовое количество атмосферных осадков, как и средняя годовая температура воздуха в многолетнем цикле, характеризуется значительными колебаниями. Средние годовые температуры воздуха уже почти на протяжении 50 лет имеют тенденцию к росту (рис. 1), на это указывает линия тренда. В то же время годовое количество осадков за многолетний период не имеет тенденций к росту или уменьшению, хотя отмечаются периоды повышенного увлажнения и, наоборот, засушливые годы.

Повышение средних годовых температур воздуха, которые приближаются к положительным значениям, приводит к деградации многолетнемерзлых пород (ММП), опусканию их кровли, формированию несливающихся мерзлых пород [3,4]. Это негативно сказывается на устойчивости бортов карьеров стенок горных выработок при открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых, нарушает сложившийся гидрогеологический режим и осложняет экологическое состояние территорий, расположенных ниже хвостохранилищ.

На угольных месторождениях центрального и южного Забайкалья, расположенных, в основном, в пределах впадин забайкальского типа (Забайкальский геокриологический регион [1]), многолетнемерзлые породы характеризуются прерывистым, островным и редкоостровным распространением, размеры и мощности островов мерзлых пород закономерно уменьшаются к югу. Ранее установленные мощности мерзлых толщ в центральном Забайкалье составляли первые десятки метров, например, на Татауровском месторождении она достигала 60-80 м, на Черновском – 90 м на Красночикойском – 150 м. Многолетнемерзлые породы имели сравнительно высокую температуру, которая колебалась от минус 0.1-0.2° С до минус 1,0-1,5° С. В районах распространения прерывистой криолитозоны температуры составляла минус 3-4,5° С. В угленосных впадинах южной окраины региона многолетнемерзлые породы изредка встречались на заболоченных участках, как это было отмечено на одном из участков Уртуйского угольного разреза. Современная характеристика мерзлых толщ на угольных месторождениях представлена в таблице 1.

Интенсивный процесс деградации многолетней мерзлоты происходит на участках эксплуатируемых месторождений. На Черновском буроугольном месторождении за время его эксплуатации многолетнемерзлые породы, ранее залегавшие близ поверхности, протаяли да глубины 50 м, а на отдельных участках полностью деградировали. Аналогичная ситуация имела место и на Харанорском буроугольном месторождении.

Таблица 1 - Характеристика многолетнемерзлых пород на угольных месторождениях центрального и южного Забайкалья

Наименование месторождения	Балансовые запасы каменных* и бурых углей, млн.т	Мощность ММП, м	Температура ММП, °С	Распространение ММП на площади месторождения
Нерчуганское	9	50-300	-1 ÷ -5	Преимущественно сплошное (80-95 %)
Букачачинское	12			
Красночикойское	585	0-200	+1 ÷ -3	Прерывистое 15-80 %
Зашуланское	173			
Шимбилыкское	24			
Татауровское	496	0-80	2 ÷ 1,5	Островное 10-15 %
Харанорское	848	0-25	4 ÷ 0,5	Редкоостровное (до 10 %)
Уртуйское	127			

Деградация мерзлых осадочных пород в бортах угольных карьеров и отвалов, очень часто провоцирует развитие таких неблагоприятных процессов как оползни, суффозия и наледеобразование. Наледи, значительно осложняют проведение горных работ. Они мо-

гут образовываться на бортах карьеров и в случае отсутствия мерзлых пород, как это наблюдается в настоящее время на Уртуйском угольном разрезе.

Широкое распространение многолетнемерзлых пород, характеризующихся неустойчивым термодинамическим равновесием, в центральном и юго-восточном Забайкалье приводит к тому, что любое нарушение существующего природного равновесия, обусловленное хозяйственным освоением территории, вызывает изменение инженерно-геологических условий. Развитие инженерно-геологических процессов, которые сопровождают эти изменения, является следствием изменения температурного режима горных пород и сопровождается деградацией многолетнемерзлых пород. На начальном этапе освоения месторождений это проявляется на локальных участках, а со временем приобретают региональный характер распространения.

В Шилкинско-Аргунской геокриологической области в 80-е годы XX в. фиксировались температуры до -2° -3° С, а в последние годы температуры существенно повысились. Это подтверждается измерениями температур ММП различными организациями (ООО «Востокгеология», ОАО ЗабайкалТИСИЗ, ИПРЭК СО РАН, ЗабГУ и др.). Некоторые данные о современных температурах пород и изменении строения многолетнемерзлой толщи представлены в таблице 2

Таблица 2 - Характеристика многолетнемерзлых пород на некоторых рудных месторождениях центрального и южного Забайкалья

Месторождение	Геокриологическая Область	Кровля ММП	Подошва ММП, м	Температура, °С
Березовское Железорудное	Шилкинско-Аргунская	3.9-7,9	>12	-0,2 – -0,4
Балейское золоторудное		2,8-20,3	8,0 - 50 м	нет сведений
Тасеевское золоторудное		1,5-13	15-40	-0,1 – -0,5
Золотореченское полиметаллическое		1,4-15	23-43	нет сведений
Быстринское полиметаллическое		2-9	23-50	-0,5 – -1,0
Култуминское полиметаллическое		3.2-8	17-65	нет сведений
Бугдинское полиметаллическое		1,8-15	80	нет сведений
Амазар, россыпное	Нерча-Олекминская	1,5-8,5	30-100	-0,5 – - 2,5
Итака, золоторудное				-0,5 – -2,5

Быстрая деградация мерзлых толщ происходит в районах размещения действующих карьеров и на рудных месторождениях. Например, в бортах карьера рудника Ключевский интенсивное развитие обвально-осыпных процессов связано с оттаиванием мерзлых пород с глубины 3-5 м, мощность которых превышает 110 м. Размеры карьера составляют: по верху 700 х 400, глубина 240 м. Породы, представленные, преимущественно, гранодиоритами трещиноваты. Мощность льда в трещинах достигает 5 см. Система обработки поуступная сверху вниз с ленточной выемкой и внешним отвалообразованием, высота уступов 10 м, угол откоса 65-70□. При оттаивании ММП в бортах карьера происходит интенсивное выветривание пород до щебнисто-дресвянистых фракций. Отступание бровки берм верхних уступов в результате выветривания и последующего осыпания породы в течение 10 лет составило в среднем на 5-7 м.

Происходящее в последние два десятилетия глобальное потепление климата наиболее значительно изменяет гидрогеологические условия в горноскладчатых районах Шилкинско-Аргунской геокриологической области, к которым приурочено большинство рудных месторождений. Здесь массивы мерзлых пород на склонах северной экспозиции и в долинах рек ранее занимали значительные площади, и определяли условия формирования и разгрузки подземных вод. В последние годы произошли существенные изменения в результате деградации мерзлых пород. Опускание кровли мерзлых пород [3] составило 2-6 м (в зависимости от состава грунтов и их влажности), что привело к понижению уровней надмерзлотных вод.

Изменение мерзлотно-гидрогеологических условий, связанное с глобальным потеплением, приводит к постепенному уменьшению или к полному исчезновению наледного регулирования поверхностного стока в Шилкинско-Аргунской геокриологической области. С исчезновением криогенных водоупоров и переходом надмерзлотных вод в грунтовые происходит значительное снижение уровней подземных вод на участках, сложенных грунтами с хорошей проницаемостью. Особенно заметно это понижение на участках с интенсивной экзогенной трещиноватостью, мощность которой в глубину составляет от 60 до 80 м. На большинстве участков месторождений юго-западной части Забайкальского края этот процесс идет в настоящее время (Березовское железорудное, Быстринское полиметаллическое и др.). Там, где мерзлые породы полностью деградировали, грунтовые воды получают связь с водами глубокого стока.

Другой причиной резкого падения уровней грунтовых вод на участках падей и речных долин является низкая влагообеспеченность (рис1). Совокупное влияние этих причин приводит к существенным изменениям в ландшафтах, проблемам с водоснабжением этих районов, как это имеет место в южном Забайкалье, где ММП отсутствуют.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Мерзлое состояние пород вскрыши и угольных пластов существенно повышает стоимость извлекаемого полезного ископаемого, так как разработка проводится при обязательном применении буровзрывных работ, поэтому деградация ММП является положительным моментом, позволяющим снизить производственные издержки.

2. Остается достаточно большой вероятность понижения средних годовых температур воздуха. Это будет способствовать, при определенных условиях, быстрому восстановлению криогенных

водоупоров, которые существенно и достаточно быстро могут изменить гидродинамический режим подземных вод. Так, по данным мерзлотной станции в г. Сковородино, положение нулевой термоизоплеты изменилось по глубине от 2,8 м (1933 г.) до 1,6 м (1974 г.), что привело к росту шлиров льда на подошве сезонноталого слоя, пучению грунтов, развитию морозобойного растрескивания грунтов.

Новообразование мерзлых толщ было отмечено на руднике Давенда в пределах осушенной чаши хвостохранилища. Здесь при бурении хвостов до глубины 10 м оказалось, что они промерзлы почти на всю глубину, за исключением первых 1,5 м слоя сезонного оттаивания. Формирование мерзлых толщ наблюдалось повсеместно и на участках размещения отвалов.

3. В имеющейся литературе и нормативных документах по проектированию и строительству в Забайкалье используются сведения, полученные в XX в., когда средние годовые температуры воздуха характеризовались более низкими значениями [2 и др.], поэтому предлагаемые мероприятия по предупреждению деградации криолитозоны (каменные наброски, проветриваемы подполья и др.) оказываются, как правило, неэффективными. Поэтому при оценке возможности использования самоохлаждающих устройств необходимо учитывать современные изменения в строении многолетнемерзлых толщ и возможность аградации ММП.

Список литературы

1. Геокриология СССР: Горные страны юга СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 359 с.
2. Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья: История, современное состояние, проблемы перспективы развития. К 300-летию основания Приказа рудокопных дел / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 574 с.
3. Шестернев Д.М. Особенности геокриологических условий трассы строящейся новой линии железной дороги Нарын-Лугокан в Забайкальском геокриологическом регионе / Д.М. Шестернев. – Материалы международной конференции: Криогенные ресурсы полярных и горных районов. – Тюмень. – с.46-49.
4. Шполянская Н.А. Глобальные изменения климата и эволюция криолитозоны / Н.А. Шполянская. – М.: Географический факультет МГУ, 2008. – 132 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ УСТРОЙСТВ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ

С. Н. Стрижков, О.Ю. Рубель

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень, e-mail: nauka-fsa@mail.ru

В статье представлены результаты исследования двух геотехнических систем с различными видами устройств термостабилизации грунтов оснований в условиях Крайнего Севера. 1-ая система разработана в ОАО «Фундаментпроект», г. Москва, 2-ая – в ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень.

В настоящее время одним из перспективных решений в устройстве оснований на вечной мерзлоте является замораживание талых и охлаждение мерзлых грунтов оснований с использованием естественного ресурса холода в зимнее время года и сохранение накопленного «холода» в летний период времени.

На сегодняшний день в практике фундаментостроения в районах распространения вечномерзлых грунтов широко применяются различные способы регулирования и управления температурным режимом грунтов оснований. Так широко известны различные конструктивные решения термостабилизации на вечной мерзлоте - продуваемые или вентилируемые подполья [1], трубчатые рассольные системы [2], жидкостные и парожидкостные термостабилизаторы и системы [3]. Экспериментальные исследования различных авторов и практический опыт строительства показали, что в условиях Крайнего Севера для сохранения оснований сооружений в вечномерзлом состоянии и увеличения несущей способности грунтов оснований наиболее экономически целесообразно в качестве систем температурной стабилизации использовать парожидкостные устройства [4,5].

Особенно целесообразно использовать данный тип термостабилизации грунтов оснований применительно к крупномасштабным сооружениям и ширококорпусным зданиям с габаритами в плане более 100 м. Таковыми являются, в частности, нефтяные резервуары емкостью от 5000 до 50000 и даже 100000 м3. Естественно, возникает вопрос поиска наиболее надежного и экономически целесообразного способа термостабилизации грунтов оснований.

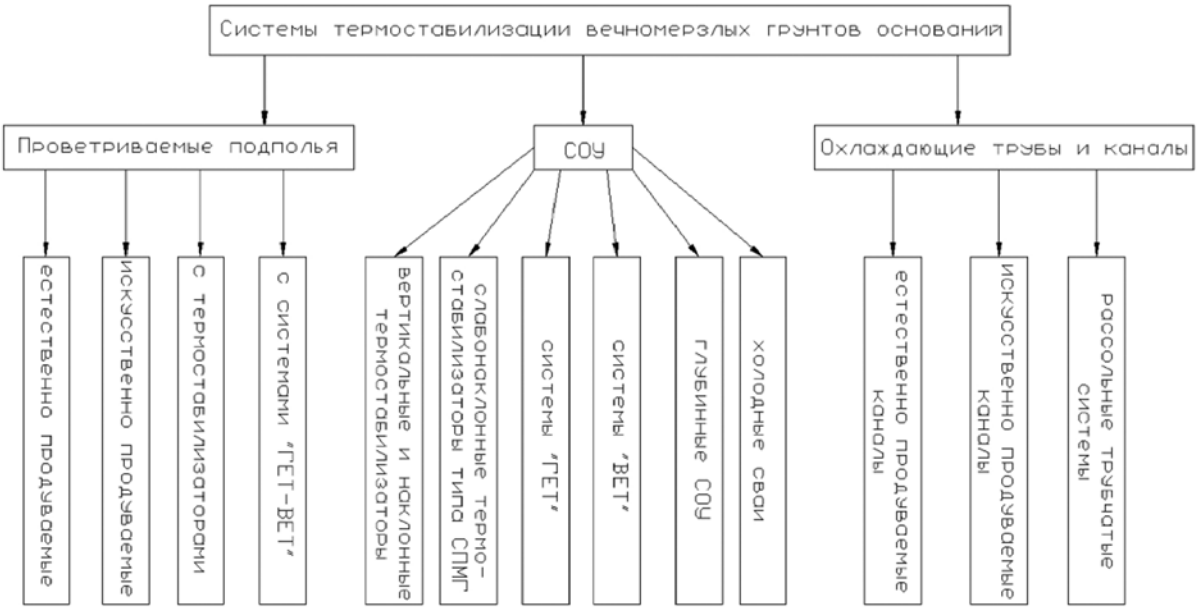
Нами предложена классификационная блок-схема существующих систем термостабилизации грунтов оснований [6], приведенная на рис.1. Из выше приведенной классификации практических способов термостабилизации в настоящее время во многих практических случаях предпочтение стали отдавать естественно действующим сезонноохлаждающим устройствам с применением в них конвективного холодильного цикла. Данные способы просты, наиболее надежны и наименее затратны в процессе эксплуатации, поскольку абсолютно энергонезависимы.

Цель работы – провести исследования различных систем термостабилизации грунтов оснований в условиях Крайнего Севера: 1-ая система разработана в ОАО «Фундаментпроект», г. Москва, 2-ая - в НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень.

Данная цель достигается решением следующих задач:

1. Исследовать технические решения систем;

Рисунок 1 - Классификация систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений



2. Исследовать тепловое взаимодействие систем с грунтами оснований;
3. Провести исследования двух термометрических систем;
4. Исследовать технико-экономические показатели и сделать выводы.

1-ая система, состоящая из комплекса отдельных слабонаклонных термостабилизаторов типа СПМГ-38/76 впервые применена для термостабилизации грунтового основания под крупногабаритными многотоннажными нефтяными резервуарами емкостью 50000 м3 на Варандейском нефтеогрузочном терминале [7], 2-ая система, состоящая из горизонтальных и вертикальных естественно действующих трубчатых устройств (тип ГЕТ и тип ВЕТ) [6], применяется довольно широко на многих объектах, в том числе на Варандейском нефтеотгрузочном терминале под промышленным зданием и на Южно-Хыльчуенском месторождении под 4-мя резервуарами емкостью 20000 м3. Кроме того, НПО «Фундаментстройаркос» разработал ряд проектов охлаждаемых оснований резервуарных парков большой емкости, с резервуарами от 50000 до 100000 м3, в которых используется значительный опыт по возведению и эксплуатации сравниваемых систем термостабилизации и получены обширные данные по теплотехническим и экономическим показателям.

Кратко охарактеризуем сравниваемые системы.

1-ая система в расчете на один резервуар РВС-50 000 м3 состоит из комплекта слабонаклонных термостабилизаторов СПМГ-38/76 парожидкостного типа с использованием фреона-22 в качестве хладагента. Испарительные части стабилизаторов в виде нержавеющих труб d=78 мм под углом в 10 к горизонту располагаются под днищем резервуаров в подсыпке под теплоизолирующим экраном из экструдированного пенополистирола типа URSA толщиной 440 мм (рис. 2).

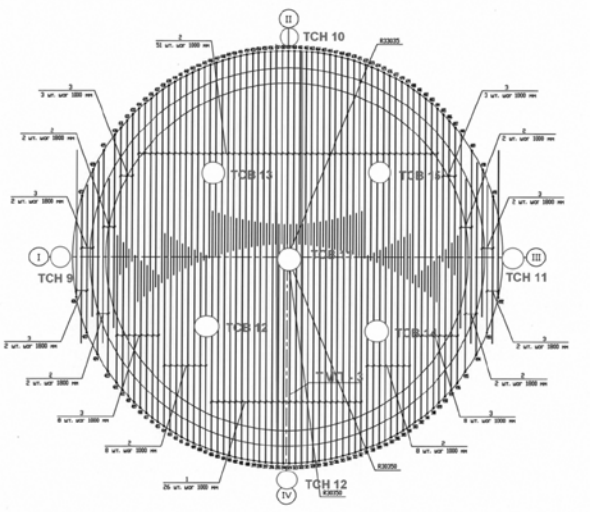


Рисунок 2 - Схема расположения СПМГ и термометрической сети на резервуаре емкостью 50 000 м3

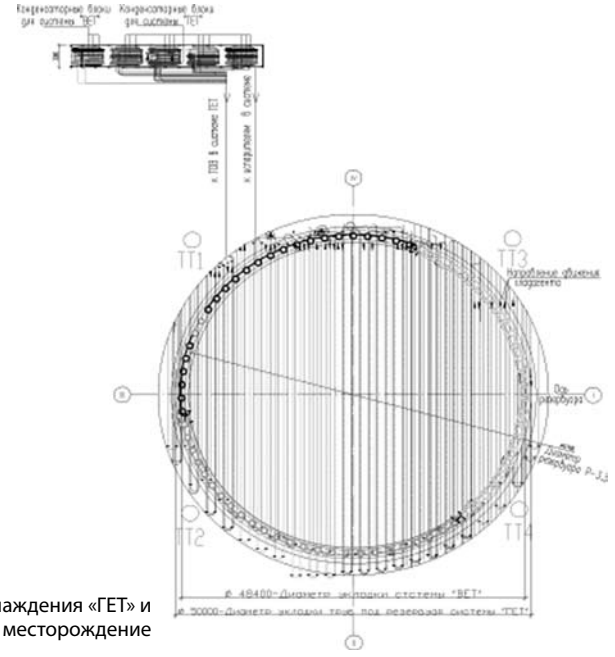


Рисунок 3 - Схема расположения системы охлаждения «ГЕТ» и «ВЕТ» РВС-20 000м3 Южно-Хыльчуюское месторождение

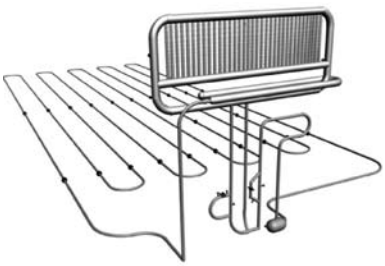
Конденсаторные части СПМГ-38/76 расположены вертикально с двух сторон резервуара по дугам окружностей, отстоящих на 3 м от стенки резервуара, в общей сложности на каждый резервуар установлено по 132 термостабилизатора типа СПМГ. Испарительные трубы от противоположных термостабилизаторов СПМГ направлены навстречу друг другу строго параллельно, расстояние между испарителями 1 м и они образуют систему направленных навстречу друг другу плоских гребней, образуя стоковую плоскость для отвода тепла от вмещающего их фунта. В период зимних холодов термостабилизаторы работают на принципе термосифонов, обеспечивая отвод тепла от вмещающего грунта через конденсаторную часть в окружающую атмосферу. В летнее время при смене знака теплового напора термостабилизаторы прекращают работать, поэтому каждый из СПМГ г. оборудован индивидуальной электрической холодильной машиной мощностью 0,7 кВт во взрывобезопасном исполнении типа ВН 630(2)-МВ, с помощью которых в автоматическом режиме осуществляется охлаждение грунта основания под резервуаром в летний теплый период времени при необходимости.

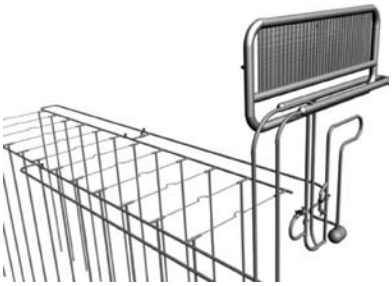
2-ая система, в отличие от вышеприведенной системы термостабилизации состоит из единого конденсаторного блока, соединенного входным и выходным концами с единым испарителем в форме плоского стального трубчатого змеевика (в случае ГЕТ) или с соединительной трубой с отходящими от нее вниз вертикальными охлаждающими трубками ТОВ (в случае ВЕТ) , расположенными в отсыпке под теплоизоляционным слоем из экструдированного пенополистирола (рис.3). На рис.4 схематично представлены схемы выполнения систем ГЕТ и ВЕТ. Механизмы работы систем ГЕТ и ВЕТ идентичны. В испарителях происходит кипение хладагента по всей длине трубы (в случае ГЕТ) и во всех вертикальных охлаждающих трубках ТОВ (в случае ВЕТ). За счет гидростатического и температурного напоров происходит однонаправленное движение парожидкостной смеси от кон-

денсаторного блока по подающей трубе и в него же - по отводящей трубе.

Следует подчеркнуть, что с помощью той или иной системы термостабилизации под сооружением создается мерзлая грунтовая плита, которая работает как конструктивный несущий элемент основания. Вполне очевидно, что для того, чтобы обеспечить несущую способность этой льдогрун-

Рисунок 4 - Схемы выполнения систем ГЕТ и ВЕТ





товой плиты, последняя должна иметь круглогодично отрицательную рабочую температуру не выше расчетной для данного типа подстилающего грунта, с учетом его литологии, засоленности, и соответствующей механической прочности.

При проектировании и строительстве той или иной системы термостабилизации грунтов оснований исходят прежде всего из возможности круглогодично обеспечить в них необходимую рабочую температуру эксплуатации из соображений минимальных затрат: строительного и эксплуатационного периодов. Вполне понятно, что предпочтение в этом случае должно отдаваться естественнодействующим системам охлаждения, т.е. системам позволяющим аккумулировать в грунте за холодный зимний период достаточное количество холода, чтобы в летний период рабочие температуры грунтов основания не превысили расчетных значений.

Это можно обеспечить за счет более эффективного охлаждения грунтовых горизонтов (до более низких температур) и за счет увеличения глубины промораживания грунтового массива в зимнее время, т.е. увеличения объема замороженного грунта. В том случае, когда не удается за счет зимнего естественного промораживания добиться необходимого результата - в летнее время применяют дополнительное искусственное охлаждение с помощью электрических холодильных машин. Именно по такому пути пошли специалисты ОАО «Фундаментпроект», применив 1-ую систему. С помощью же 2-ой системы термостабилизации за счет совместного использования устройств типа ГЕТ и ВЕТ, разработанных впервые в НПО «Фундаментстройаркос», удается за счет только естественного зимнего охлаждения обеспечить поддержание фунтов оснований в твердомерзлом состоянии без применения дополнительного искусственного охлаждения электрическими холодильными машинами летом.

Рассмотрим результаты сравнительного прогнозного расчета температурного режима грунтов основания резервуара нефти при работе:

- охлаждающих установок СПМГ производства ОАО «Фундаментпроект»;
- охлаждающих установок СПМГ с подключением в летнее время холодильных машин (ХМ), обеспечивающих температуру в испарительной части СПМГ минус 7 ºС;
- охлаждающей системы ГЕТ производства ООО НПО «Фундаментстройаркос».

В качестве сооружения принят резервуар нефти объемом 50000 м3 с температурой нефти +60 ºС. Под резервуаром предусмотрена укладка теплоизоляционного экрана из Пеноплэкса (коэффициент теплопроводности λ = 0,033 Вт/м·°С) толщиной 400 мм.

Грунты основания резервуара используются по I принципу (СНиП 2.02.04-88). Для передачи полной нагрузки на основание резервуара необходимо обеспечить твердомерзлое состояние грунтовой толщи без оттаивания грунтов под теплоизоляцией.

Температура наружного воздуха, скорость ветра и высота снежного покрова были приняты на основании материалов наблюдений по метеостанции Варандей. Среднегодовая температура воздуха составляет минус 5,6 ºС. Среднемесячная температура самого холодного месяца (февраля) равна минус 19,2 ºС, самого теплого (июля) – плюс 8,9 ºС.

Для прогнозных расчетов приняты следующие инженерно-геологические условия. Температура грунтов на глубине нулевых амплитуд (T_0) составляет минус 0,2 ºС. Грунты засолены. В разрезе выделены следующие грунты:

- песок желтовато-серый, с глубины 0,6 м светло-серый, серый, мелкий, в интервале 4,8-5,2 м – прослой песка пылеватого, с тонкими прослойками черного суглинка, до глубины 1,4 м с редкими линзами торфа (0-5,7 м);
- суглинок темно-зеленовато-серый с примесью органических веществ, с прослойками песка мощностью 2-3 см, талый, текучепластичный, D_{sal} = 0,34 %, T_{bf} = - 1,02 ºС (5,7-6,8 м);
- супесь темно-серая, с тонкими прослойками черного суглинка, талая, пластичная Tbf = - 0,1 ºС (6,8-7,6 м);
- песок серый, мелкий, насыщенный водой (7,6-12,4 м);
- супесь серая, охлажденная, текучая, D_{sal} = 0,40 %, T_{bf} = -1,65 ºС (12,4-13,1 м);
- суглинок темно-серый, с включениями гравия и гальки до 1-3 %, с редкими прослойками пы-

леватого песка мощностью до 1-3 см, D_{sal} = 1,03 %, T_{bf} = - 3,2 ºС (ниже 13,1 м).

Мощность насыпного грунта, учтенного в прогнозном расчете, составляет 2 м.

Прогноз температурного режима грунтов основания выполнен по специальной программе "FROST (DK)" (сертификат соответствия № 06.0001.0314 от 22 февраля 2010 г.), разработанной д. т. н. Дубиной М.М. и д. ф.-м. н. Кашеваровым А. А. в Сибирском отделении РАН, в соответствие с РСН 67-87 «Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами».

По первому варианту для замораживания грунтов и сохранения их в твердомерзлом состоянии применены стабилизаторы пластично-мерзлых грунтов (СПМГ), представляющие собой слабонаклонные испарители с уклоном i=0,016. СПМГ являются сезоннодействующими охлаждающими устройствами. Они работают при температуре наружного воздуха минус 7 ºС и ниже (с 1 ноября по 20 апреля). Глубина заложения труб 1,0-1,5 м от низа теплоизоляции. Длина подземной части СПМГ составляет 24, 32 и 40 м, площадь конденсатора – 6,5 м2, диаметр испарителя – 76 мм. Трубы СПМГ расположены с шагом 1 м, в области пересечения (центральная часть резервуара) – 0,5 м. Схема расположения СПМГ представлена на рисунке 1.

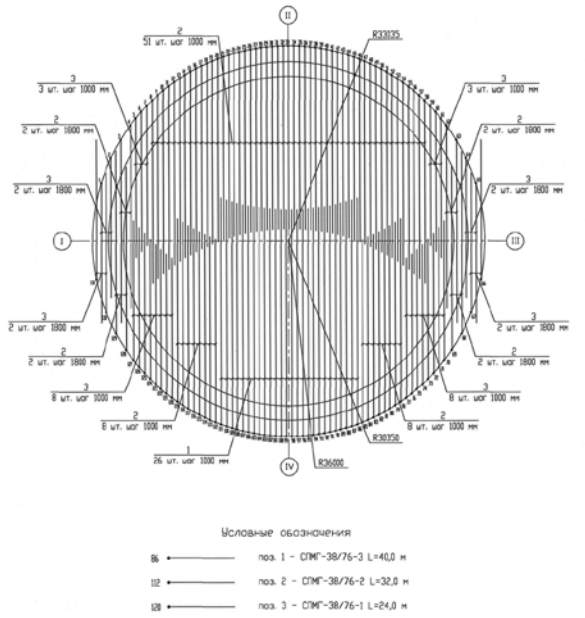


Рисунок 5 – Схема расположения СПМГ

Согласно прогнозному расчету, на конец первого летнего периода работы СПМГ грунты в твердомерзлом состоянии образуются только под центром резервуара (на участке пересечения СПМГ, где шаг труб равен 0,5 м). Мощность твердомерзлых грунтов составляет 2,3 м (рисунок 3). Глубина оттаивания под теплоизоляцией – 0,7 м. На конец второго летнего периода мощность твердомерзлого основания равна 2,3 м – под краем резервуара и 3,6 м – под центром резервуара, глубина оттаивания под теплоизоляцией уменьшается до 0,3 м. На конец третьего летнего периода мощность твердомерзлого основания достигает 3,6 м – под краем и 5,0 м – под центром резервуара. Глубина оттаивания под теплоизоляцией составляет 0,2 м. Температура грунта к концу первого летнего периода на отметке укладки труб равна минус 0,4 ºС под центром резервуара (рисунок 4), минус 0,2ºС – под краем (рисунок 5). При дальнейшей работе охлаждающих устройств температура понижается.

Таким образом, при использовании в качестве охлаждающих установок СПМГ, передавать полную проектную нагрузку на основание можно только на третий год работы установок, так как при более раннем нагружении могут развиться осадки, и, как следствие, деформации резервуара.

Для передачи полной проектной нагрузки на основание в первый год «Фундаментпроектом» предусмотрено подключение к каждому СПМГ в летний период холодильной машины (ХМ), обеспечивающей температуру в испарительной части СПМГ минус 7 ºС (всего 131 ХМ). Холодильные машины работают с 20 апреля по 1 ноября.

Согласно прогнозному расчету, на конец первого летнего периода работы СПМГ совместно с холодильными машинами толщина твердомерзлого массива в основании резервуара равна 2,9 м – под краем резервуара и 3,9 м – под центром резервуара, оттаивания под теплоизоляцией не происходит. На конец второго летнего периода мощность твердомерзлого основания равна 4,7 м – под краем резервуара и 5,7 м – под центром, на конец третьего летнего периода 5,7 м – под краем резервуара и 6,7 м – под центром.

Таким образом, при работе СПМГ с подключением холодильных машин в летний период возможна передача полной нагрузки уже в первый расчетный год.

В последующем возможно отключение холодильных машин, при условии отсутствия оттаивания под теплоизоляцией и достаточной для передачи полной нагрузки толщине твердомерзлого основания.

Для сравнения был выполнен прогноз температурного режима грунтов основания резервуара при работе системы ГЕТ (горизонтальной естественнодействующей трубчатой). Она начинает работать при температуре наружного воздуха минус 3 ºС. Система ГЕТ представляет собой герметичную неразъемную конструкцию из труб, заправленных хладагентом, и состоящую из надземной части (конденсаторного блока воздушного охлаждения) и подземной, представленной горизонтальными охлаждающими трубами. Система работает с 1 октября по 17 мая.

Трубы системы ГЕТ установлены с шагом 0,5 м, глубина заложения труб 1,5 м от низа теплоизоляции. Схема расположения ГЕТ представлена на рисунке 2.

Результаты расчета работы системы ГЕТ показывают, что к концу первого зимнего периода

грунты основания находятся в твердомерзлом состоянии, которое сохраняется к концу первого лета. Мощность твердомерзлых грунтов к концу первого летнего периода одинакова в пределах всего основания резервуара и составляет 2,5 м (рисунок 3). Глубина оттаивания под теплоизоляцией незначительна. Температура грунта на отметке укладки труб (как под центром, так и под краем резервуара) равна минус 0,4 ºС (рисунки 4 и 5). При дальнейшей работе охлаждающей системы ГЕТ температура грунтов понижается, что свидетельствует о стабильном твердомерзлом состоянии грунтов основания резервуара. К концу второго летнего периода мощность твердомерзлого основания составляет 4,0 м, к концу третьего – 5,3 м (значения одинаковы в пределах всего основания резервуара). Таким образом, уже на второй год работы системы ГЕТ возможна передача полной проектной нагрузки на основание.

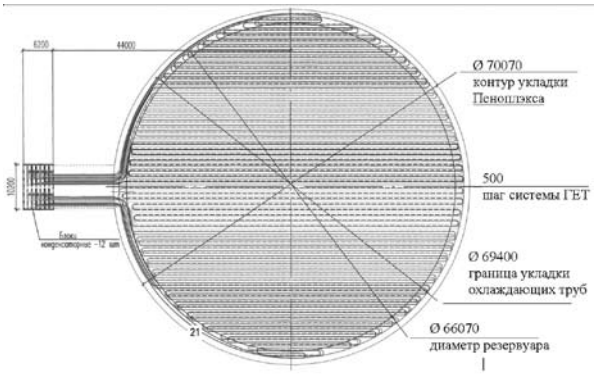


Рисунок 6 – Схема расположения системы

Сопоставляя графики на конец летних периодов работы ГЕТ и СПМГ (без подключения холодильных машин), можно сделать вывод, что при одинаковом шаге 0,5 м ГЕТ и СПМГ (в центральной части резервуара, где шаг равен 0,5 м) работают практически сопоставимо.

Сравнительные графики мощности твердомерзлого основания под центром резервуара (где шаг СПМГ равен 0,5 м) на различные периоды времени представлены на рисунке 7.

Графики зависимости температуры грунта на уровне заложения труб от времени при работе

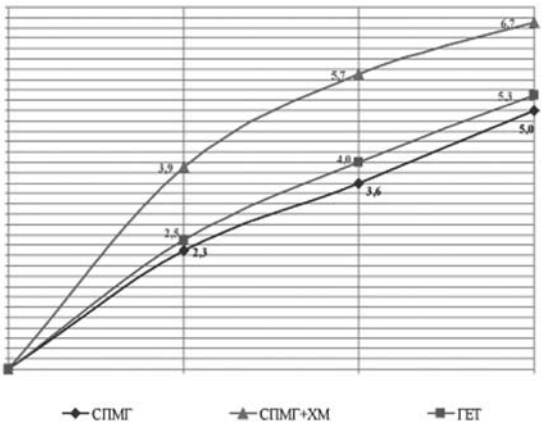


Рисунок 7 – Мощность твердомерзлых грунтов под центром резервуара

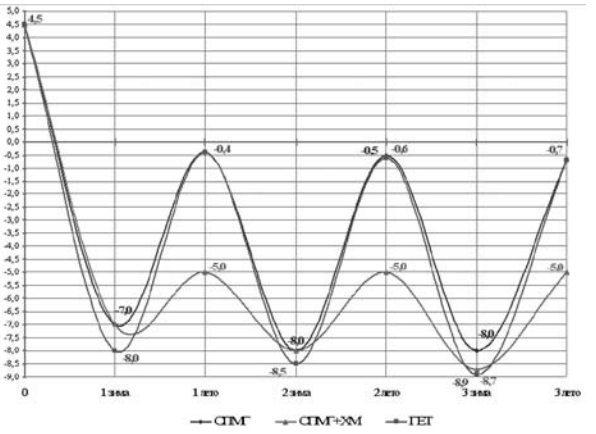


Рисунок 8 – Температура грунта на уровне заложения труб под центром резервуара

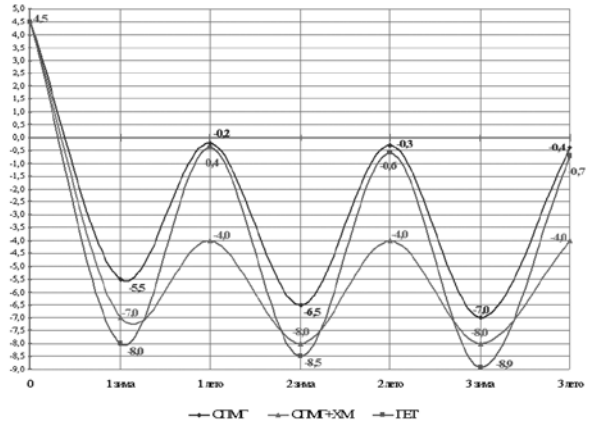


Рисунок 9 – Температура грунта на уровне заложения труб под краем резервуара

рассмотренных охлаждающих систем представлены на рисунках 8 и 9.

Чтобы сопоставить описанные нами системы термостабилизации рассмотрим результаты геокриологического мониторинга фунтов оснований в течение длительного периода времени.

Геотехнический мониторинг (ГТМ) разрабатывается и осуществляется в целях обеспечения эксплуатационной надежности оснований и фундаментов газопромысловых объектов посредством управления природно-геотехническими системами на основе данных системного инструментального контроля над динамикой геокриологических условий грунтовых оснований, устойчивостью фундаментов и конструкций сооружений.

Результаты прогнозных расчетов, выполненных при проектировании оснований и фундаментов, сопоставляются с последующими инструментальными наблюдениями в рамках геотехнического мониторинга. По результатам выполнения ГТМ на этапе строительства и эксплуатации, на основании фактически собранных материалов ГТМ производиться корректировка прогнозных расчетов оснований и фундаментов.

Геокриологический мониторинг за состоянием грунтов оснований с применением систем термостабилизации ведется с самого начала возведения сооружений и продолжается на весь срок

его эксплуатации. Наиболее полный и систематический температурный мониторинг проводится на Варандейском нефтеотгрузочном терминале на резервуарах емкостью 50000 м3, под которыми смонтирована 1-ая система термостабилизации. Термометрический мониторинг начат с 15 мая 2007 года и продолжается по настоящее время. Согласно разработанному технологическому регламенту температуры грунтов оснований измерялись как по глубине (до 10м от отметки дна резервуара), так и по площади основания. Схема размещения сети термометрических элементов для мониторинга температурного состояния грунтов оснований под резервуарами показана на рис.2 и состоит из:

- четырех периферийных скважин с термометрическими косами,
- четырех азимутальных скважин под днищем (на половине радиуса резервуара) с термометрическими косами,
- одной центральной скважины под днищем с термокосой,
- термометрического поперечника по всему диаметру резервуара на глубине 1,7 м под днищем (между теплоизоляционным экраном и плоскостью расположения труб испарителей СПМГ).

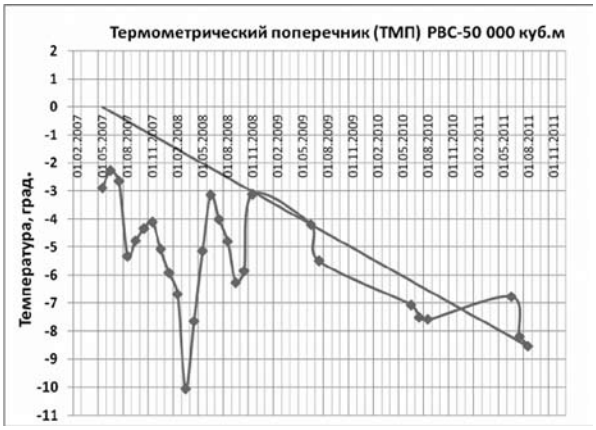


Рисунок 10 - Температура на поперечнике ТМП-3

На рис.10 приведены результаты многолетнего мониторинга за температурным состоянием резервуара №13, принятого в эксплуатацию в июне 2007 года. На графических вставках по ряду скважин приведены результаты распределения температур по глубине фунтового основания и в поперечнике в период лета 2007 и 2011 годов. Видно, что с момента начала систематического мониторинга температуры в отдельных элементах сети мониторинга на определенных глубинных горизонтах в летний период времени снизились и находятся в пределах проектных.

Однако, анализ данных мониторинга показал, что на глубинных горизонтах ниже отметки 6,5 м температуры грунтового основания не достигают проектных значений, т.е можно констатировать, что к настоящему времени под резервуарами сформирована несущая твердомерзлая фунтовая плита толщиной в 5,5 м под слоем теплоизоляции.

В весенне-летний период эксплуатации, когда термостабилизаторы типа СПМГ выключаются из работы, за счет теплопритоков с нижних горизонтов, сверху от теплого резервуара и бокового теплопритока происходит монотонное повышение температур во всех элементах термометрической сети, что вызывает автоматическое включение в работу холодильных машин на ряде термостабилизаторов СПМГ и в дальнейшем требуемый температурный режим обеспечивается исключительно благодаря работе электрических холодильных машин. Как правило, время работы холодильных машин начиналось с начала-середины июня и продолжалось по конец октября. В среднем за летний сезон наработка холодильных машин составляет не менее 72 суток непрерывной работы на один резервуар.

Геокриологический мониторинг позволил четко отслеживать температурный режим грунтов оснований в течение всего периода года, общую наработку холодильных машин (в машино-часах и кВт-час.) и даты запуска в работу термостабилизаторов СПМГ зимой и их отключение весной.

Мониторинг температурного состояния грунтов оснований с применением 2-ой системы термостабилизации проводился под упомянутыми выше производственным зданием на Варандейском нефтеотгрузочном терминале и под резервуарами емкостью 20000 м3 на Южно-Хыльчуюском месторождении.

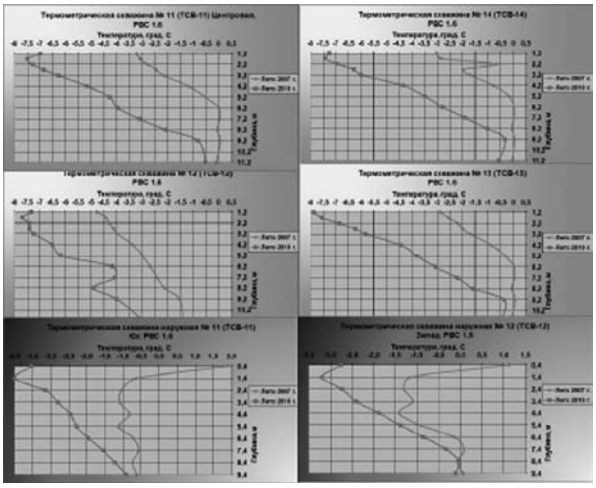


Рисунок 11 - Распределение температур по глубине грунтового основания

Из приведенных данных следует, что смонтированная система термостабилизации с высокой степенью надежности обеспечила круглогодичное мерзлое состояние грунтового основания здания под теплоизоляционным слоем за счет только зимнего импульса холода и естественного охлаждения на всю глубину заложения вертикальных охлаждающих трубок ТОВ (более 10 м). Анализ распределения средних температур грунтового основания (рис.7) за весь период наблюдений по всем скважинам на всю глубину замера температур показал монотонное снижение температуры фунтового основания за весь период эксплуатации здания.

Особенно показательны температуры фунтового массива под зданием в летний период наблюдений. Если после 1-го года эксплуатации эта температура в конце лета составляла -0.22°С, то в 2009 году она уже составила -1,9°С, а в 2010 году-5,55°С.

Помимо постоянного геотехнического мониторинга за системами термостабитлизации грунта, специалистами ООО НПО «Фундаментстройаркос» в рамках авторского надзора на Ванкорском месторождении была проведена тепловизионная диагностика систем температурной стабилизации (СТС).

Главное преимущество тепловизионной диагностики перед обследованием традиционными методами геокриологического мониторинга проявляется при обследовании индивидуальных СОУ. Связано это с тем, что для корректного анализа необходимо устанавливать термометрическую трубу для каждого термостабилизатора в отдельности, что технически и экономически нецелесообразно. Таким образом, единственным способом определить работоспособность индивидуального СОУ является проведение замеров температуры на конденсаторной части. Однако проведение замеров температуры контактными методами или при помощи пирометра сотен, а иногда и тысяч термостабилизаторов осуществить практически невозможно, особенно на линейно-протяженных объектах (нефте- и газопроводы, дороги и т.д.). Проведение тепловизионной съемки существено упрощает эту задачу, так как возможна съемка одновременно 10-20 термостабилизаторов. ИК-съемка помимо значительного уменьшения времени проведения работ позволяет получить полную картину распределения температуры по длине термостабилизатора.

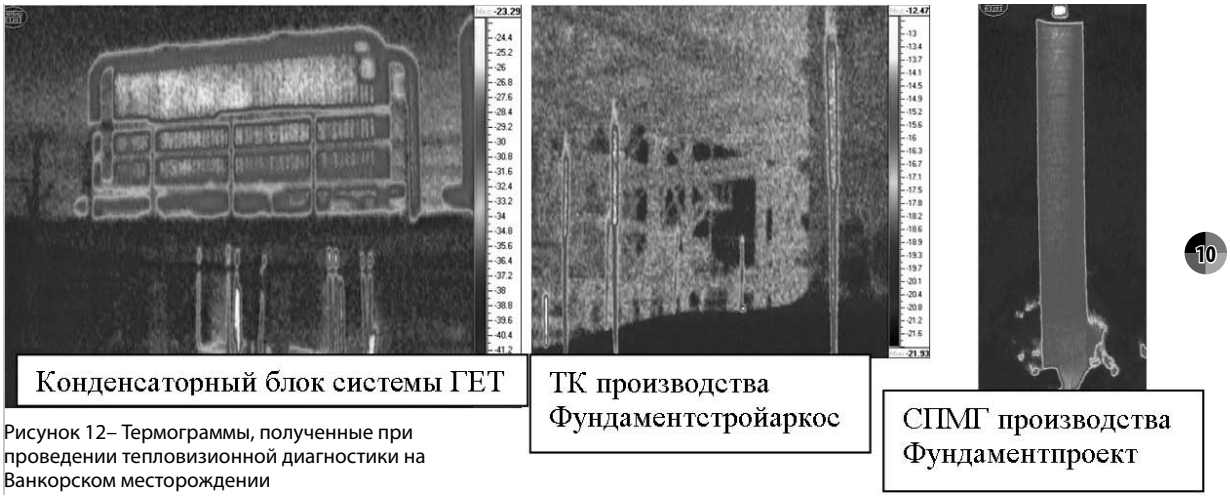


Рисунок 12– Термограммы, полученные при проведении тепловизионной диагностики на Ванкорском месторождении

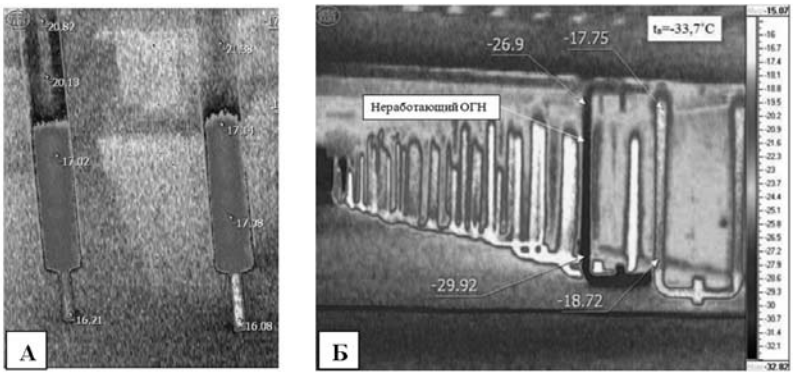


Рисунок 13 - Термограммы частично работающих термостабилизаторов А – СПМГ Фундаментпроект; Б – ОГН Фундаментпроект.

Основные технико-экономические показатели СПМГ и системы ГЕТ сведены в таблицу 1. Из данной таблицы видно, что для СПМГ в качестве хладагента применяется фреон-22 стоимостью 500 тыс. руб. за 1 т, что в 83 раза больше, чем стоимость аммиака, используемого в системе ГЕТ. Расход хладагента для системы ГЕТ в 1,8 раза меньше, чем для СПМГ.

Общая площадь оребрения конденсаторов СПМГ составила 1291,7 м2, что в 1,9 раза меньше, чем общая площадь оребрения конденсаторных блоков системы ГЕТ.

Длина испарительных труб для СПМГ примерно в 2 раза меньше, чем для системы ГЕТ.К каждому СПМГ в летние периоды требуется подключение холодильной машины, общее количество которых составляет 131, суммарная мощность холодильных машин – 91,7 кВт/ч. Для работы системы ГЕТ не требуется электрическая энергия, т.к. по своей физической природе она является естественнодействующей.

Таблица 1 – Технико-экономические показатели

Наименование месторождения	Балансовые запасы каменных и бурых углей, млн.т	Мощность ММП, м	Температура ММП, °С	Распространение ММП на площади месторождения
Нерчуганское	9	50-300	-1 ÷ -5	Преимущественно сплошное (80-95 %)
Букачачинское	12			
Красночикойское	585	0-200	+1 ÷ -3	Прерывистое 15-80 %
Зашуланское	173			
Шимбилыкское	24			
Татауровское	496	0-80	2 ÷ 1,5	Островное 10-15 %
Харанорское	848	0-25	4 ÷ 0,5	Редкоостровное (до 10 %)
Уртуйское	127			

Затраты строительного периода и эксплуатационные затраты за 30 лет сведены в таблицу 2. Анализ данных, представленных в таблице, показывает, что суммарные затраты на монтаж и эксплуатацию СПМГ намного выше, чем для

Таблица 2 – Затраты строительного периода и эксплуатационные затраты за 30 лет

Месторождение	Геокриологическая Область	Кровля ММП	Подошва ММП, м	Температура, °С
Березовское Железорудное	Шилкинско-Аргунская	3.9-7,9	>12	-0,2 – -0,4
Балейское золоторудное		2,8-20,3	8,0 - 50 м	нет сведений
Тасеевское золоторудное		1,5-13	15-40	-0,1 – -0,5
Золотореченское полиметаллическое		1,4-15	23-43	нет сведений
Быстринское полиметаллическое		2-9	23-50	-0,5 – -1,0
Култуминское полиметаллическое		3.2-8	17-65	нет сведений
Бугдинское полиметаллическое		1,8-15	80	нет сведений
Амазар, россыпное	Нерча-Олекминская	1,5-8,5	30-100	-0,5 – - 2,5
Итака, золоторудное				-0,5 – -2,5

системы ГЕТ.

Значительные экономические затраты в эксплуатационный период СПМГ связаны прежде всего с большим расходом электроэнергии, потребляемой холодильными машинами в летний период времени, а также с необходимостью сервисного обслуживания большого количества холодильных машин.

Экономический эффект за 30-летний период эксплуатации резервуара нефти при использовании системы ГЕТ в сравнении с СПМГ составляет 200,2 млн. руб.

Анализ данных таблиц 1 и 2 показывает превышение экономических затрат на изготовление 1-ой системы по сравнению со 2-ой в период строительства и особенно в период эксплуатации. Значительные экономические затраты в эксплуатационный период 1-ой системы связаны прежде всего с расходом электроэнергии, потребляемой холодильными машинами в летний период времени, так и с сервисным обслуживанием большого количества холодильных машин, которые требуют значительных трудозатрат.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что система типа СПМГ экономически неэффективна в основном по следующим причинам:

1. Большое число электрических холодильных машин в количестве 131 единиц потребителей составляют суммарную мощность 91,7 кВт.
2. Стоимость только потреблённой электроэнергии за весь период эксплуатации сооружения составит не менее 80.9 млн.руб. В сравнении с системой ГЕТ-ВЕТ - лишь 0,3 млн.руб., что в 270 раз ниже.
3. Дополнительные ежегодные затраты на сервисное обслуживание 131 электрических холодильных машин составят 126 млн.руб.; это в 8,4 раза выше, чем у ГЕТ-ВЕТ.
4. Суммарные эксплуатационные затраты систем СПМГ составят 295 млн.руб., что в 3,1 раза выше, чем у систем ГЕТ-ВЕТ.

С учетом выше изложенного вытекают закономерные выводы по сопоставлению этих двух систем термостабилизации грунтов оснований:

1. 1-ая система позволяет сохранить грунты оснований под резервуарами в твердомерзлом состоянии при использовании только естественного зимой и непременного искусственного летом охлаждения.
2. В 1-й системе не предусмотрена резервная система охлаждения на случай нештатной ситуации (выхода из строя СПМГ)
3. 1-ая система требует значительных ежегодных эксплуатационных затрат доходящих до 4 млн.руб. в год.
4. Можно уверенно утверждать, что надежность 1-ой системы существенно ниже из-за двух основных факторов: многочисленности единичных холодильных машин и СПМГ и возможных их отказах и огромных затрат на ремонт и обслуживание.
5. Применение многочисленных СПМГ в непосредственной близости к резервуару усложняет как монтаж резервуара, так и его дальнейшую эксплуатацию, особенно в аварийных и пожароопасных ситуациях.
6. Оребренная часть не менее 50% всех конденсаторов термостабилизаторов типа СПМГ находится постоянно в зоне ветровой тени по причине того, что геометрические параметры резервуара препятствуют обдуванию конденсаторных частей СПМГ, а сам резервуар является ветроотражающим экраном (парусом). Этот факт существенно снижает холодопроизводительность термостабилизаторов в зимнее время.
7. Поскольку нефть, находящаяся в резервуаре имеет высокую температуру, передающуюся на его стенку, тепловое излучение от поверхности стен резервуара нагревает окружающий воздух и существенно повышает температуру в зоне оребренных частей конденсаторов термостабилизаторов СПМГ, что существенно снижает его эффективность.
8. В 1-ой системе конструктивно в транзитной части испарителя СПМГ располагается змеевиковый испаритель холодильной машины, который создает дополнительное местное сопротивление при работе СПМГ зимой, во 2-ой системе испарительные трубы свободны на всей длине.
9. Сравнение технико-экономических показателей двух систем СПМГ и ГЕТ-ВЕТ показывает, что затраты строительного периода и эксплуатационные затраты системы СПМГ составили 295 млн.руб., а систем ГЕТ-ВЕТ - лишь 94,8 млн.руб., что в 3,1 раза ниже.

Выводы:

1. Рассмотренные 2 системы термостабилизации грунтов оснований позволяют использовать круглогодично по 1-му принципу грунты в качестве фундаментов под крупномасштабные инженерные строенння в районах вечной мерзлоты.

2. С позиций надежности, удобства эксплуатации и снижения затрат на изготовление и обслуживание системы выгодно использовать 2-ую систему термостабилизации.

Список литературы

1. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах. Под ред. Ю.Я. Велли, В.И. Докучаева, Н.Ф. Федорова. Л., Стройиздат, Ленингр. Отд-ние, 1977, 552 с.

2. Трупак Н.Г. Замораживание грунтов при строительстве подземных сооружений. - М,, Недра, 1979, 344 с.

3. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. - Новосибирск: Наука, 1985, 169 с.

4. Кутвицкая Н.Б., Рязанов А.В., Дашков А.Г. Обеспечение устойчивости опор трубопроводов обвязки газовых и нефтяных добывающих скважин в условиях распространения вечномерзлых грунтов./ Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов», 21-24 апреля 2008, Тюмень, с. 123-126.

5. Марамыгина М.С., Долгих Г.М., Окунев С.Н. Опыт применения глубинных сезонндействующих охлаждающих устройств./ Там же, с.126-129.

6. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С, Феклистов В.Н. Надежность, эффективность, и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений./ Там же, с.34-39.

7. Андреев М.А., Миронов И.А., Терентьев А.В. Устройство оснований и фундаментов нефтяных резервуаров в сложных условиях Заполярья./ Промышленное и гражданское строительство, № 9, 2006, с. 35-36

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Д.А. Крылов[1], Н.И. Сидняев[1], А.А. Федотов[1]

[1]МГТУ имени Н.Э. Баумана, г.Москва, e-mail: dmitrykrylov@rambler.ru

Статья посвящена вопросам математического моделирования в задачах составления прогноза изменения температурного режима вечномерзлых грунтов, оснований зданий и сооружений в криолитозоне, которые позволят осуществлять качественный подход к проведению тепловых расчетов грунтов оснований для принятия проектных решений по обеспечению устойчивости и эксплуатационной надежности оснований и фундаментов сооружений.

Составление прогноза изменений температурного режима грунтов является необходимым элементом инженерно-геологического обоснования строительства геотехнических объектов в районах распространения вечномерзлых грунтов.

При изысканиях, как правило, используются аналитические и численные методы. Выбор того или иного метода определения составляющих температурного режима или режима в целом зависит от конкретной задачи прогноза и этапа изысканий.

Методика моделирования комплексной системы из горнотехнических сооружений и примыкающих массивов пород учитывает важнейшую особенность задачи – ее многофакторность. На начальных этапах выполняется предварительный отбор определяющих параметров, характеризующих среду и объект по признакам их наибольшего влияния на процессы. На основе особенностей внешних воздействий процессов производства на среду разработаны направления усовершенствования математических моделей переноса тепла и влаги. Под температурным полем грунтовой области исследований в какой-либо момент времени понимается совокупность значений температур грунта (распределение температур) в различных точках области исследований в этот момент времени. К характеристикам температурного режима грунтов также относят среднегодовую температуру грунтов, глубины оттаивания - промерзания и т.п.

Процессы тепломассопереноса описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, дополненными рядом слагаемых и соответствующими краевыми условиями. В уравнения включены дополнительные элементы: слагаемое, учитывающее плотность распределенных источников тепла; гравитационная составляющая; слагаемые, учитывающие диффузионный перенос влаги. В связи с повышенными требованиями к точности вычислений в разрешающих уравнениях учитываются теплопередача за счет диффузионного переноса и перенос влаги, обусловленный градиентом температуры. В уточненные уравнения теплового и водного балансов включены параметры, характеризующие крутизну и ориентацию склонов, а также интенсивность испарения, осадков, стока, фильтрации в породы на конкретных площадках. При решении частных задач отдельные слагаемые в разрешающих уравнениях могут опускаться. При наличии зоны насыщения, перенос влаги описывается известным уравнением фильтрации.

Необходимо отметить, что профессиональное и взаимодополняющее физическое и математическое моделирование («сопряженное моделирование») – это единственный путь содержательного изучения явлений и процессов. А какое-либо противопоставление экспериментальных и математических, аналитических и численных методов моделирования является, в лучшем случае, некорректным. Действительно, для профессионалов в области криолитозоны очевидно, что при усложнении исследуемых задач до уровня, недоступного прямому физическому эксперименту, должны использоваться косвенные данные и математические методы. Если задачи оказываются недоступными точным или приближенным аналитическим методам, то естественным основным аппаратом исследования таких задач становятся численные методы.

Под тепловой задачей Стефана [1] в широком смысле слова понимают в настоящее время класс математических моделей, описывающих тепловые, диффузионные или даже термодиффузионные процессы, сопровождающиеся фазовыми превращениями среды и поглощением или выделением скрытой теплоты. Такие процессы протекают, например, при образовании и эволюции внутреннего строения Земли и полярных льдов в криолитозоне, а также в ряде других областей науки и практики. Наиболее характерной особенностью этих процессов, из-за которых их математические модели нелинейны и трудны для ее анализа, являются неизвестные заранее («свободные») границы между различными фазами (в случае однородного вещества) или «многофазная зона» (в многокомпонентной среде), определяемые с помощью поверхностей уровня функций, описывающих термодиффузионное состояние системы [1, 2].

Во многих работах, как правило, рассматривается однофазная постановка в полупространстве, когда происходит кристаллизация жидкой или плавление твердой фазы, находящихся при температуре фазового перехода, под воздействием соответствующей постоянной температуры на границе. В таких работах рассмотрена двухфазная постановка задачи о «тепловом ударе», когда в начальный момент приходят в соприкосновение два полупространства, заполненные различными фазами, находящимися при постоянных температурах отличных от температуры фазового пере-

хода. В этих постановках на поверхности раздела фаз кроме условия изотермичности выписано также соотношение (теперь оно называется «условием Стефана»), выражающее закон сохранения энергии с учетом скрытой теплоты. Все эти постановки автомодельны и были решены с помощью интеграла вероятностей. Уделено место однофазной постановке задачи о промерзании воды в полупространстве, находящейся при температуре фазового перехода, под воздействием переменной температуры на границе. Для этой задачи приведено формальное решение в виде степенного ряда по пространственной переменной, даны приближенные решения для описания эволюции полярных льдов, выписано решение типа «бегущей волны» и в простейшем виде рассмотрена постановка, которую в наше время можно было бы назвать «обратной задачей Стефана».

Принципиально новую точку зрения на сущность задачи Стефана высказали в начале пятидесятых годов А. Н. Тихонов и А. А. Самарский [1, 2]. Основная идея этого подхода состоит во введении понятия «эффективной» теплоемкости, включающей в себя также скрытую теплоту фазового перехода, сосредоточенно выделяющуюся на поверхности раздела фаз. Это дает возможность с использованием дельта-функции Дирака записать единое квазилинейное уравнение энергии сразу во всей области, занятой теплоносящей средой, причем условие Стефана является следствием этого уравнения. На этом пути с помощью процесса сглаживания коэффициентов полученной математической модели был разработан эффективный метод численного анализа нестационарной многомерной задачи Стефана. Основанная на указанной идее энтальпийная форма записи уравнения энергии послужила также отправным пунктом для качественного анализа многомерной задачи Стефана.

Для многомерных задач с фазовым переходом использование численных методов с явным выделением границы раздела фаз во многих случаях связано с алгоритмическими сложностями и большими вычислительными затратами. Для приближенного решения таких задач широкое распространение получили методы сквозного счета. Для этого используется обобщенная формулировка классической задачи Стефана. На основе методов решения квазилинейных задач теплопроводности строятся соответствующие численные методы решения задачи Стефана. В таких задачах используется и энтальпийная формулировка задачи Стефана, и в качестве неизвестной выступает не температура, а энтальпия. Для решения многомерных задач используются экономичные разностные схемы.

В качестве основной постановки рассматривается следующая задача. Требуется найти распределение температуры в среде с фазовыми переходами твердое тело жидкость. Тепловое состояние такой среды с учетом теплоты фазового перехода описывается уравнением теплопроводности вида

$$[c(x,y,z,u)\rho(x,y,z,u)+Q\delta(u-u^*)]\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(x,y,z,u)\frac{\partial u}{\partial x}\right)+ \quad (1)$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(x,y,z,u)\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\,(x,y,z,u)\frac{\partial u}{\partial z}\right)+s(x,y,z,t),$$

где c – удельная теплоемкость; p – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; u (x,y,z,t) – температура среды; u* – температура фазового перехода; Q – теплота фазового перехода; s – мощность внутренних источников тепла; δ – дельта-функция.

Решение требуется найти в ограниченной области – прямоугольном параллелепипеде $D=\{0\le x\le L_x,\ 0\le y\le L_y,\ 0\le z\le L_z\}$, удовлетворяющее начальному условию

$$u(x,y,z,0)=\varphi(x,y,z) \quad (2)$$

На границе z=0 с температурой происходит конвективный теплообмен со средой, имеющей температуру . Плотность теплового потока на этой границе задается через коэффициент теплоотдачи в виде

$$\lambda\frac{\partial u}{\partial z}=h\big(\theta(t)-u(x,y,0,t)\big)$$

Коэффициент теплоотдачи записывается в виде , где коэффициент конвективного теплообмена и R коэффициент термического сопротивления.

На границе поддерживается постоянный тепловой поток (поток из недр Земли [8])

$$\lambda\frac{\partial u}{\partial z}=q_E=const \quad (3)$$

Боковые границы области теплоизолированы

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0,y,z,t)=0 \quad \frac{\partial u}{\partial x}(L_x,y,z,t)=0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x,0,z,t)=0 \quad \frac{\partial u}{\partial y}(x,L_y,z,t)=0$$

Для численного решения задач с фазовыми переходами используются два основных подхода. Прежде всего укажем методы с выделением границы раздела фаз. Эти методы иногда называют variable domain methods. Второй класс образуют методы без выделения этой границы или методы сквозного счета (fixed domain methods) [4, 5]. К первой группе методов относятся методы, в которых положение свободной границы отслеживается на каждом временном слое. С этой целью использу-

ются численные методы, в которых свободная граница определяется положением соответствующих узлов. Это достигается за счет использования новых динамических независимых переменных или же согласованных динамических сеток в исходных переменных.

В одномерных задачах адаптация к границе раздела фаз может осуществляться за счет использования переменного шага по времени. Такой подход к использованию переменных шагов по времени (ловля фронта в узел пространственной сетки) хорошо известен и давно используется. В некоторых случаях можно использовать аналогичный подход с переменным шагом по пространству. Такие методы плохо приспособлены к решению многомерных задач.

К методам с выделением границы фазового перехода относятся методы с выпрямлением фронта, когда используется динамическая сетка постоянной структуры с закреплением узлов на границе раздела фаз. При изложении этих подходов обычно ориентируются на формулировку задачи в новых независимых переменных, в которых расчетная область регулярна.

Прогресс в теоретическом исследовании проблем со свободной (неизвестной) границей в настоящее время достигнут за счет рассмотрения этих задач как вариационных. Для однофазной задачи Стефана вводится новая независимая переменная [3], которая позволяет получить более простую задачу. На основе метода штрафа [6], примененного к соответствующему вариационному неравенству, строится метод сквозного счета для задачи Стефана.

Квазистационарная задача Стефана описывается стационарным уравнением теплопроводности. Отмечаются особенности численных методов решения таких задач. В частности, методы сквозного счета могут быть построены на основе выделения особенности решения на границе фазового перехода.

Нелинейность задач с фазовыми переходами обусловлена, прежде всего, наличием неизвестной (свободной) границы фазового перехода. Кроме того, как и в обычных задачах теплопроводности, нелинейность может быть связана с зависимостью теплофизических параметров от температуры.

Рассмотрим модельную двухфазную задачу Стефана в прямоугольнике . Свободная граница S = S(t) разбивает на две подобласти и . В обеих подобластях выполняется уравнение теплопроводности. Будем считать, что теплофизические параметры твердой и жидкой фаз постоянны, для обозначения принадлежности к той или иной области будем использовать индекс «+» или «-».

Запишем в каждой подобласти уравнение теплопроводности

$$c^{\pm}\frac{\partial u^{\pm}}{\partial t}=\lambda^{\pm}\frac{\partial^2 u^{\pm}}{\partial x_1^2}+\lambda^{\pm}\frac{\partial^2 u^{\pm}}{\partial x_2^2}\quad (x_1,x_2)\in\Omega^{\pm}(t)\quad 0<t\le T \tag{5}$$

В начальный момент задается некоторое распределение температуры:

$$u^{\pm}(x,0)=u_0(x)\quad x\in\Omega^{\pm}(0) \tag{6}$$

Пусть $\gamma^{\pm}=\gamma^{\pm}(t)=\partial\Omega\cap\partial\Omega^{\pm}(t)$ и $u^{\pm}(x,t)=g(x,t)\quad x\in\gamma^{\pm}\quad 0<t\le T$ (7)

Температуру фазового перехода принимаем равной нулю, и поэтому свободная граница S = S(t) определяется следующим образом:

$$S(t)=\{x\mid x\in\Omega,\ u(x,t)=0\} \tag{8}$$

На ней выполненыдва условия сопряжения, отражающие непрерывность температуры и закон сохранения тепла:

$$\Delta[u]=0\quad (x,y,z)\in S \tag{9}$$

$$\Delta\left[\lambda\frac{\partial u}{\partial x}\right]=-QV_n\quad (x,y,z)\in S \tag{10}$$

где Q - энтальпия фазового перехода, а V_n - скорость движения границы фазового перехода по нормали к S(t).

Так как скорость движение фронта заранее не известна и должна быть найдена в процессе решения задачи теплопроводности, то граничное условие (4.6), называемое условием Стефана, делает задачу нелинейной.

Рассматриваемая двухфазная задача Стефана (5)-(10) может быть записана без явного выделения фронта фазового перехода в постановке задачи [9, 10]. Этот переход связан с переходом в класс обобщенных функций. Действительно, теплоту фазового перехода, выделяющуюся на фронте, можно учесть, считая внутреннюю энергию среды разрывной функцией температуры и вводя сосредоточенную теплоемкость среды. При этом внутренняя энергия единицы объема среды , как функция температуры, при скачком меняется на величину теплоты фазового перехода, т.е.

$$\varepsilon=\int_0^u c(u)\rho(u)\,du+Q\eta(u) \tag{11}$$

где $\eta(u)=\begin{cases}1, u>0,\\ 0, u<0\end{cases}$ - импульсная функция Хэвисайда, производная которой $d\eta/du$ есть дельта-функция .

Дифференцируя теперь внутреннюю энергию (11) по температуре, получим выражение для эффективной объемной теплоемкости среды с учетом теплоты фазового перехода

$$c_{eff}=c(u)\rho(u)+Q\delta(u) \tag{12}$$

Второе слагаемое, записанное через -функцию, представляет собой сосредоточенную теплоемкость, которую следует понимать как обобщенную функцию температуры.

При таком описании фазового перехода вместо уравнений (5) и условий сопряжения (8)-(10) можно рассматривать одно уравнение теплопроводности

$$\left(c(u)\rho(u)+Q\delta(u)\right)\frac{\partial u}{\partial t}=div\left(\lambda(u)\ grad\ u\right)+s(x,y,z,t,u) \qquad (x,y,z,t)\in\Omega \quad 0<t\le T \tag{13}$$

Здесь коэффициенты теплоемкости и теплопроводности разрывны и имеют вид

$$c=\begin{cases}c^{+}, & x>0,\\ c^{-}, & x<0,\end{cases}\quad \rho=\begin{cases}\rho^{+}, & x>0,\\ \rho^{-}, & x<0,\end{cases}\quad \lambda=\begin{cases}\lambda^{+}, & x>0,\\ \lambda^{-}, & x<0,\end{cases}\quad s=\begin{cases}s^{+}, & x>0,\\ s^{-}, & x<0.\end{cases} \tag{14}$$

В соответствии с (6) и (7) уравнение (13) дополняется условиями

$$u(x,0)=u_0(x) \qquad x\in\Omega \tag{15}$$

$$u(x,t)=g(x,t) \quad x\in\partial\Omega \qquad 0<t\le T \tag{16}$$

Особенность задачи Стефана проявляется в наличии слагаемого с -функцией в левой части уравнения (13). Выделение или поглощение тепла при фазовом переходе соответствует наличию сосредоточенной теплоемкости на границе фазового перехода. Сама краевая задача (13)-(16) не очень сильно отличается от других квазилинейных задач теплопроводности.

Рассмотрим простейший подход к приближенному решению задачи Стефана в формулировке (13)-(16). Он состоит в том, что коэффициенты уравнения (13) сглаживаются, т. е. совершается переход к обычной задаче теплопроводности.

В уравнении (13) теплоемкость с(и), плотность и слагаемое входят одинаковым образом. Заменим -функцию некоторой функцией , которая отлична от нуля только внутри интервала сглаживания , и введем эффективную сглаженную теплоемкость .

$$\tilde{c}=c+\rho^{-1}Q\delta(u,\Delta) \tag{17}$$

При необходимости проводится сглаживание плотности и коэффициента теплопроводности (заменяется на , заменяется на) и вместо уравнения (13) ищется решение уравнения со сглаженными коэффициентами

$$\tilde{c}(u)\tilde{\rho}(u)\frac{\partial u}{\partial t}=div\left(\tilde{\lambda}(u)\ grad\ u\right)+s(x,y,z,t,u) \qquad (x,y,z,t)\in\Omega \quad 0<t\le T \tag{18}$$

В вычислительной практике получили распространение различные аппроксимационные формулы для , которые строятся из условия сохранения баланса тепла на интервале . Простейшая их них связана с заданием

$$\delta(u,\Delta)=\begin{cases}\dfrac{1}{2\Delta}, & |u|\le\Delta,\\ 0, & |u|>\Delta.\end{cases} \tag{19}$$

В качестве второго примера можно привести параболическую аппроксимацию, когда

$$\delta(u,\Delta)=\begin{cases}\dfrac{3}{4\Delta}\left(1-\dfrac{u^2}{\Delta^2}\right), & |u|\le\Delta,\\ 0, & |u|>\Delta,\end{cases} \tag{20}$$

для которой условие нормировки также, очевидно, выполнено.

$$\int_{-\Delta}^{\Delta}\delta(u,\Delta)\,du=1 \tag{21}$$

Другие варианты приближения -функции представлены в [13]. Как показывают численные эксперименты [3, 5], точность разностного решения слабо зависит от выбора той или иной аппроксимационной формулы для -функции, в частности, от выбора (19) либо (20). Более существенное влияние оказывает величина параметра сглаживания , который естественно зависит от используемой сетки и определяется, чаще всего, эмпирически в результате методических расчетов.

Для построения консервативных разностных схем естественно исходить из законов сохранения (балансов) для отдельных ячеек разностной сетки. Такой метод построения консервативных разностных схем получил название интегро-интерполяционный метод (метод баланса) [12]. К этому подходу тесно примыкает метод контрольного объема, который фактически не использует дифференциальную формулировку задачи и отражает законы сохранения непосредственно для отдельных ячеек среды [5, 12, 13].

В работе метод контрольного объема использован для получения дискретных аналогов. Основная идея метода заключается в том, что дискретные аналоги, полученные этим методом, являются не только формальной математической аппроксимацией, но и имеют ясный физический смысл. Дифференциальные уравнения математической физики представляют собой законы сохранения. В свою очередь, рассматриваемое в работе уравнение теплопроводности основано на законе сохранения энергии. Когда дискретные уравнения получены методом контрольного объема, они представляют собой законы сохранения энергии, количества движения, массы для каждого контрольного объема. Из этого следует, что полученное численное решение удовлетворяет законам

сохранения этих величин во всей расчетной области.

Численная реализация выполнена на языке Fortran. Программа способна рассчитать температурное поле в заданной области исследования при наличии определенного набора входных данных: физические характеристики области исследования, геометрическое разбиение области исследования, начальное распределение температуры.

В качестве примера рассматривается задача о распределении температурных полей в грунте в районах с сезонными промерзаниями и оттаиваниями почвы [14]. Необходимо найти распределение температурных полей под зданием, чтобы узнать глубину оттаивания грунтов под ним. В силу симметрии рассматривается четверть исходной области. Необходимо найти распределение температурных полей под зданием, чтобы узнать глубину оттаивания грунтов под ним. В силу симметрии рассматривается четверть исходной области. Пусть область исследования имеет вид, представленный на рис. 1. Плоскость соответствует поверхности земли. Ось направлена вглубь грунта. Закрашенный прямоугольник на верхней границе области соответствует четверти здания, расположенному над этой областью. Размер этого прямоугольника (горизонтального сечения здания) составляет (рис. 1).

Характеристики области D: Lx=21м, Ly=15м, Lz=17м. Область D состоит из 3 литологических слоев: D1, D2 и D3 (соответственно, области 1, 2 и 3 на рисунке 1). Эти множества задаются следующим образом:

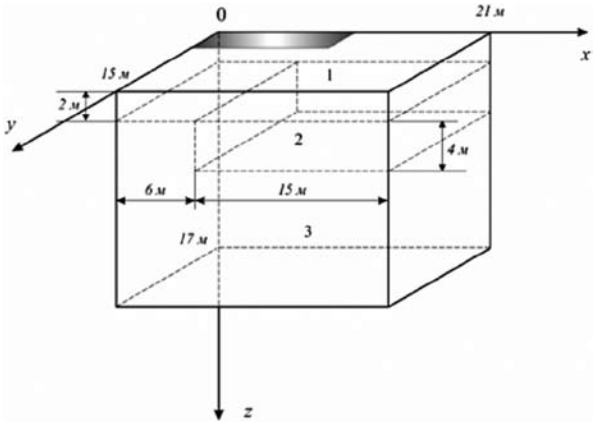


Рисунок 1 – Расчетная область

$$D_1 = \{\forall M(x,y,z) \in D : 0 < z < 2\}$$
$$D_2 = \{\forall M(x,y,z) \in D : 6 < x < 21, 2 < z < 6\} \quad (22)$$
$$D_3 = D \setminus (D_1 \cup D_2)$$

Для удобства задания литологических слоев область разбита на блоки.

Для слагаемого в левой части уравнения (13) можно записать следующее выражение [14]

$$c\rho = \begin{cases} \rho_d \left(c_d + c_{ice}(W_{tot} - W_w) + c_w W_w + k \dfrac{\partial W_w}{\partial u} \right), & u < u^*; \\ \rho_d \left(c_d + c_w W_{tot} \right), & u > u^*. \end{cases} \quad (23)$$

Здесь — удельная теплоемкость сухого грунта, удельная теплоемкость льда, – удельная теплоемкость воды, – плотность сухого грунта, – суммарная влажность грунта в долях к массе сухого грунта, – доля незамерзшей воды по отношению к массе сухого грунта, удельная теплота фазового перехода льда, температура фазового перехода.

Формула для объемной теплоемкости (23) учитывает фазовые переходы в области отрицательных температур. Функцией описывается массовая доля (по отношению к массе сухого грунта) незамершей воды при температуре [9, 14]. Подробнее нахождение этой функции описано ниже.

Коэффициент теплопроводности в уравнении (13) определяется так

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_M, u < u^*, \\ \lambda_T, \ u > u^*, \end{cases} \quad (24)$$

где – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, – коэффициент теплопроводности талого грунта.

Коэффициент теплоотдачи записывается в виде , где коэффициент конвективного теплообмена и R коэффициент термического сопротивления. Теплота фазового перехода принимается равной количеству теплоты, необходимой для таяния льда (замерзания воды) в единице объема грунта [15] и вычисляется по формуле . Внутренние источники тепла в рассматриваемой задаче отсутствуют, поэтому .

Анализ изменения температурного поля в расчетной области проводится следующим образом. На прямых линиях, параллельных оси и проходящих через характерные точки на верхней границе области, выбираются точки наблюдения. Результатами расчетов являются графики зависимости температуры от времени в этих точках.

На вертикальных линиях, проходящих параллельно оси через точки наблюдения M1(1.5,1) и M2(9,5) – в непосредственной близости от этой зоны, представлены зависимости температуры в этих точках от времени на различных глубинах (рисунки 2, 3).

Также был проведен анализ влияния зон, в которых не происходит фазовое превращение вовсе, и зон с внутренними источниками (стоками) тепла на распределение температурного поля во всей области. Такие задачи возникают при строительстве зданий со свайным фундаментом и при использовании термостабилизаторов.

Термостабилизатор — это парожидкостное устройство для охлаждения грунтов, представляющее собой металлическую герметично запаянную, заправленную хладагентом трубку диаметром

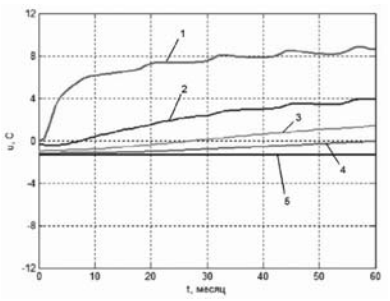


Рисунок 2 Зависимость температуры от времени в точке M1 1 – на глубине 1м., 2 – на глубине 3м., 3 на глубине 5м., 4 на глубине 7м., 5 на глубине 15,5м.

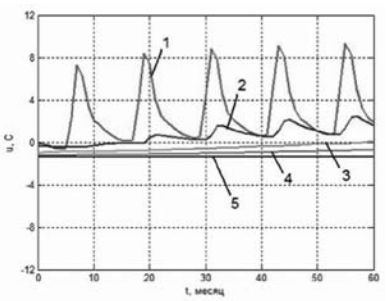


Рисунок 3 Зависимость температуры от времени в точке M2 1 – на глубине 1м., 2 – на глубине 3м., 3 на глубине 5м., 4 на глубине 7м., 5 на глубине 15,5м.

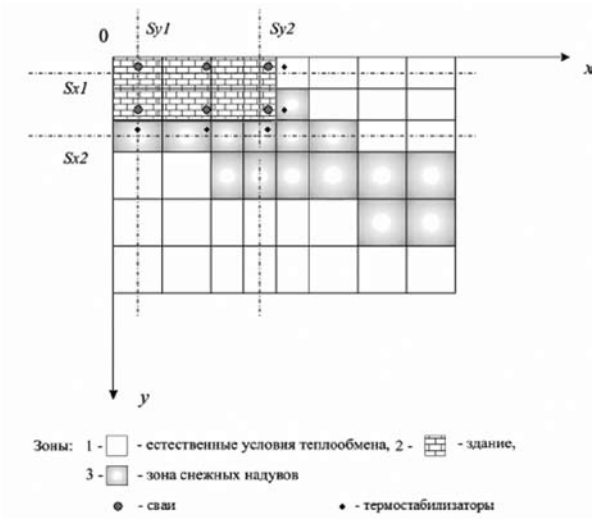


Рисунок 4 – Верхняя граница расчетной области для здания со свайным фундаментом и термостабилизаторами

от 36 до 57 мм, длиной от 6 до 10 м и более, состоящее из конденсатора с оребрением (надземной части длиной в пределах 1—2,5 м) и испарителя (подземной части длиной от 5 до 9 м и более) 15. Работа осуществляется без внешних источников питания, только за счет законов физики — переноса тепла вследствие испарения в испарителе хладагента и его поднятия в конденсаторную часть, где пар конденсируется, отдавая тепло, и стекает по внутренним стенкам трубы вниз.

Рассмотрим подобную задачу на примере здания со свайным фундаментом и термостабилизаторами, расположенными по периметру [12]. Размер здания остались неизменными и составляют . Глубина залегания свай составляет 8 м. Программно сваи зададим как 4-ый литологический слой. Предполагается, что сваи состоят полностью из тяжелого (обычного) бетона. Тогда плотность свай , удельная теплоемкость , коэффициент теплопроводности , а также , т.к. фазового перехода в бетонной свае не происходит [31, 34].

Программно их можно задать как 4-ую область. Область исследования имеет тот же самый вид, что и на рис. 1, за исключением 6 свай и 5 термостабилизаторов, расположенных как показано на рисунке 4.

В расчетах моделировался термостабилизатор с глубиной погружения в грунт , общей длиной 9 м. и мощностью . Рассматриваемый термостабилизатор работает с 1 октября по 31 марта и не работает с 1 апреля по 30 сентября каждого года. Термостабилизатор рассматривается как бесконечно тонкий стержень:

$$s(x,y,z,t) = s_0(t)\cdot\delta(x-x_0)\cdot\delta(y-y_0)\cdot I_{[0,z_0]}(z) \qquad (25)$$

Здесь – координаты размещения термостабилизатора в грунте, – индикатор сегмента . Расположение термостабилизаторов представлено на рис. 4.

Для использования источникового члена в методе контрольного объема необходимо найти среднее значение функции по контрольному объему. В результате усреднения имеем:

$$\bar{s} = \frac{1}{\Delta V}\iiint_{\Delta V} s(x,y,z,t)dV = \frac{s_0(t)}{\Delta V}\int_w^e \delta(x-x_0)dx\int_s^n \delta(y-y_0)dy\int_b^t I_{[0,z_0]}(z)dz =$$

$$= \frac{s_0(t)}{\Delta V}\int_{w_{k-1}^z}^{w_k^z} I_{[0,z_0]}(z)dz = \begin{cases} \dfrac{s_0(t)}{\Delta V}h_k^z,\ w_k^z \le z_0, \\ \dfrac{s_0(t)}{\Delta V}\Delta z_0,\ w_k^z > z_0, \end{cases} \qquad (26)$$

где и – координаты граней рассматриваемого КО вдоль оси z, – высота контрольного объема по оси z, – глубина, на которую погружен термостабилизатор в рассматриваемый КО (она может быть отлична от только для того КО, в который попадает нижний конец термостабилизатора).

В задаче мы рассмотрен самый простой тип термостабилизаторов: прямой, без изменения формы для теплоотвода. У здания нет вентилируемого подполья, поэтому термостабилизаторы находятся вне границы здания.

На рис. 5, 6 представлена динамика изменения температуры под зданием и вблизи него. Очевидно, что с течением времени под зданием будет накапливаться холод. На рис. 7, 8 представлены разрезы вдоль оси x и y соответственно.

В работе изложена модель расчета распределения температурных полей в двухфазных дисперсных средах (грунтах). Предложенная методика позволяет осуществлять единый подход к проведению тепловых расчетов грунтов оснований для принятия проектных решений по обеспечению устойчивости и эксплуатационной надежности оснований и фундаментов сооружений в условиях криолитозоны.

В разработанных алгоритмах учитываются условия на границе слоев, условия на границе фа-

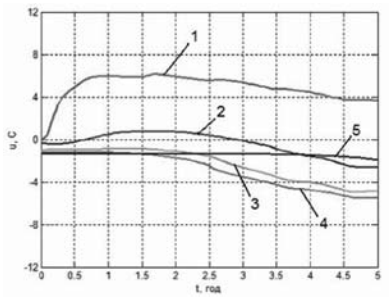


Рисунок 5 Зависимость температуры от времени в точке М1 1 – на глубине 1м., 2 – на глубине 3м., 3 на глубине 5м., 4 на глубине 7м., 5 на глубине 15,5м.

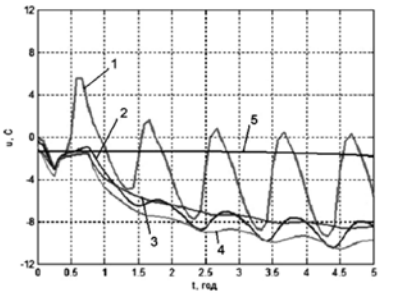


Рисунок 6 Зависимость температуры от времени в точке М2 1 – на глубине 1м., 2 – на глубине 3м., 3 на глубине 5м., 4 на глубине 7м., 5 на глубине 15,5м.

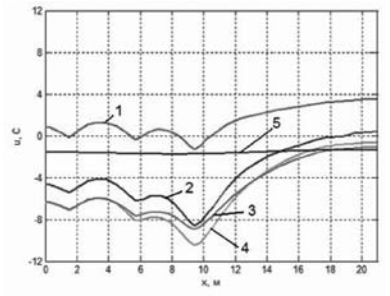


Рисунок 7 Зависимость температуры от координаты х в разрезе Sx2 в конечный момент времени 1 – на глубине 1м., 2 – на глубине 3м., 3 на глубине 5м., 4 на глубине 7м., 5 на глубине 15,5м.

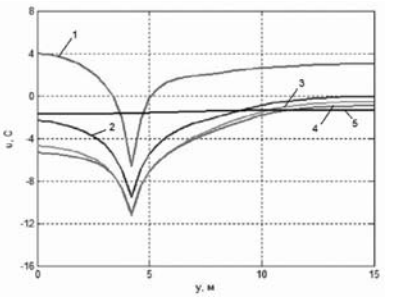


Рисунок 8 Зависимость температуры от координаты у в разрезе Sx1 в конечный момент времени 1 – на глубине 1м., 2 – на глубине 3м., 3 на глубине 5м., 4 на глубине 7м., 5 на глубине 15,5м.

зового перехода воды в лед, физические свойства отдельных слоев. Теплофизические характеристики корректируются по ходу вычислений при изменении влажности и температуры. Величина солнечной радиации определяется в зависимости от времени суток, месяца года и географической широты. Разрешающие уравнения записываются в разностной форме. В каждом узле сетки определяются температура и влажность. С использованием разработанных моделей, алгоритмов и программ будет выполнен аналитический прогноз последствий техногенных воздействий.

Температурный режим (совокупность последовательных температурных полей в грунтовом массиве, соответствующих любым заданным моментам времени от начала расчета) рассчитывается как результат задаваемых на весь период расчета прогноза тепловых воздействий на верхней, боковых и нижней границах грунтового массива.

Расчеты проводились для температурного режима грунтов для конкретных инженерно-геологических разрезов с учетом естественных изменений температурного режима воздуха и радиационного баланса дневной поверхности, естественных и техногенных условий теплообмена на поверхности грунтов и техногенных источников и стоков тепла (здания и сооружения). Применение результатов работы позитивно скажется на совершенствовании проектирования геотехнических объектов благодаря повышению обоснованности и качества принятия проектных решений. Использование методики повысит надежность, безопасность и экономичность эксплуатации фундаментов зданий и сооружений благодаря разработке математического аппарат для проведения прогноза температурного состоянии грунтов, повышению обоснованности и качества проектных решений.

Список литературы

1. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003, 784 с.

2. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1999, 799 с.

3. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991, 248 с.

4. Ferziger Joel H., Petric M. Computational methods for fluid dynamics. 3 rev. ed. New York: Springer, 2002, 423 p.

5. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М.: Издательство МЭИ, 2003, 312 с.

6. Аттетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А. П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003, 440 с.

7. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 496 с.

8. Короновский Н.В. Общая геология: учебник. М.: Изд-во «Книжный дом университет», 2006, 528 с.

9. Крылов Д.А., Мельникова Ю.С. Математическое моделирование распределения температурных полей в криолитозоне // Студенческий научный вестник. Сборник статей четвертой научно-технической выставки «Политехника». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 140 с.

10. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967, 599 с.

11. Короновский Н.В. Общая геология: учебник. М.: Изд-во «Книжный дом университет», 2006, 528 с.

12. Крылов Д.А., Сидняев Н.И., Федотов А.А. Интегральный метод в задачах математического моделирования распределения температурных полей // Материалы Четвертой Всероссийской молодежной научно-инновационной школы «Математика и математическое моделирование». – Саров: Изд-во «Альфа», 2010, 109 с.

13. Фундаментальные основы управления нестационарным температурным режимом в криолитозоне: Отчет о НИР (заключительный) по теме ТП №5/10 / МГТУ им. Н.Э. Баумана; Рук. НИР Н.И. Сидняев; № Госрегистрации 01201151171, инв. №02201157901. М., 2010, 306 с.

14. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. М: Госстрой России, 1987.

15. Попов А.П., Милованов В.И. и др. К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны // Инженерная геология. 2008. Сентябрь. С. 22-38.

ПРОЦЕСС СКАЛЫВАЮЩЕГО РЫХЛЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И КОНСТРУКЦИИ РЫХЛИТЕЛЕЙ СТАТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

В.Б. Сердобов[1], Р.В. Морозов[1], Н.К. Тагиева[1]

[1]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) г. Москва, e-mail: serdobov_2001@rambler.ru

В докладе даны обоснованные предложения по возможным конструкциям гусеничных рыхлителей статического действия и их рабочих органов (наконечников) обеспечивающих рыхление мёрзлых грунтов новым методом – скалыванием (отрывом) грунта снизу. При скалывании (отрыве) грунта энергоёмкость процесса рыхления меньше в 2,5…3 раза, чем при ныне применяемом способе статического рыхления, основанном на сжатии. Так же предложена классификация глубины промерзания сезонно-мёрзлого грунта на территории России на три категории: слой мелкого промерзания или «тонкий» слой (до 0,8 м), слой глубокого промерзания или «толстый» слой (0,8…2,1 м) и, наконец, слой сверхглубокого промерзания или «сверхтолстый» слой (более 2,1 м). При рыхлении слоя глубокого или сверзглубокого промерзания предложено статически воздействовать на грунт наконечником рыхлителя в двух плоскостях (вертикальной и горизонтальной). Это предложение способствует усилению скалывающего эффекта.

В зимний период года наличие хотя бы незначительного по толщине слоя мёрзлого грунта характерно для всей территории России. Вся Европейская часть нашей страны, а также юг и юго-запад Сибири, и Приморский край покрыты грунтами сезонного промерзания. Остальная (большая) часть Сибири и Дальнего Востока России относится к районам с многолетнемерзлыми грунтами. И на большинстве этих территорий проводятся строительные работы.

В настоящее время при проведении подготовительных земляных работ в зимний период года на строительных площадках широко применяют гусеничные рыхлители статического действия [1 – 4, 7 – 19, 21 - 26]. Эти машины разрушают верхний слой промёрзшего грунта при подготовке площадок под возведение фундаментов зданий и сооружений.

Для повышения эффективности работы данного типа машин целесообразно усовершенствовать процесс рыхления грунтов. В настоящее время разрушение происходит путём статического сжатия грунтового массива и последующего отделения крупных элементов. При обеспечении отрыва снизу крупного элемента грунта от массива энергоёмкость процесса снижается в 2,5 … 3 раза [4, 7 – 9, 14 – 16].

Процесс рыхления сезонно-мёрзлых грунтов будет различным для грунтов с различной глубиной промерзания. Это особенно важно учитывать, так как глубина промерзания сезонно-мёрзлого грунта на территории России изменяется в широком диапазоне (0,01…5 м) [14 – 16, 20].

Если глубина промерзания небольшая – до 0,3…0,8 м (слой мелкого промерзания или «тонкий» слой), то процесс рыхления, возможно, осуществить за один проход путём заглубления наконечника рыхлителя до достижения нижерасположенного слоя талого грунта и дальнейшего разрушения слоя сезонно-мёрзлого грунта отрывом снизу от массива (взлом мерзлой корки). Такой процесс осуществляется в непрерывном режиме.

Если глубина слоя сезонно-мёрзлого грунта больше чем возможная глубина рыхления за проход для данного класса рыхлителей (слой глубокого промерзания или «толстый» слой), то процесс рыхления будет выглядеть иначе. При глубине слоя более 0,8 м отрыв грунта снизу может происходить не по границе «сезонно-мёрзлый грунт – талый грунт», а в толще мерзлого грунтового массива. Таким образом, взлом мёрзлой корки будет исключен, и процесс станет менее производительным.

В этом случае процесс рыхления «толстого» слоя сезонно-мёрзлого грунта оптимально организовать по циклическому принципу, комбинируя двойное (в двух плоскостях) статическое воздействие на разрабатываемый грунтовый массив.

Однако, современные статические рыхлители тяжёлого и сверхтяжелого типа по своим конструктивным особенностям способны разрабатывать грунт на глубину до 1,5…2,1 м, и, следовательно, при глубине слоя сезонно-мёрзлого грунта 0,8…2 м возможно достижение наконечником слоя талого грунта. В таком случае отрыв грунта снизу будет происходить по границе «сезонно-мёрзлый грунт – талый грунт» с взломом мёрзлой корки. Однако из-за значительной толщины корки рыхление по первому принципу будет весьма затруднительно, поэтому для таких машин рабочий процесс необходимо организовывать по второму принципу (циклическое комбинированное рыхление).

Следовательно, рыхлители для разработки сезонно-мёрзлых грунтов будут представлены двумя разновидностями машин, каждая из которых работает по своему принципу: непрерывного статического рыхления для «тонкого» слоя промерзания и циклического (комбинированного) рыхления для «толстого» («сверхтолстого») слоя промерзания.

Авторы считают, что для повышения производительности циклического комбинированного рыхления «толстого» слоя промерзания желательно использование специальных бульдозерно-рыхлительных агрегатов тяжёлого и сверхтяжелого типа по конструкции несколько отличающихся от существующих статических рыхлителей (рис. 1). Основным отличием этих машин будет увеличенное расстояние от кромки наконечника до оси ведущей звездочки трактора. Такое конструктивное решение потребует и увеличения переднего свеса машины со смещением в него силовой установки для сохранения положения центра тяжести машины. Основные агрегаты таких машин полностью унифицированы с агрегатами серийных промышленных гусеничных тракторов (рыхлителей).

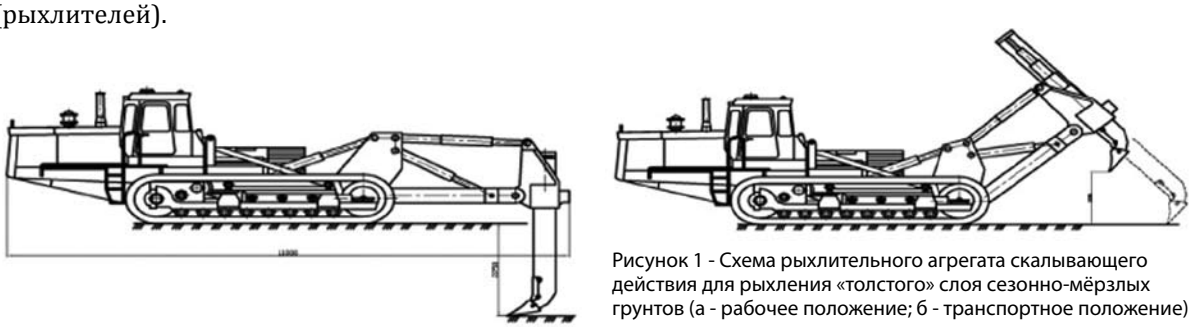


Рисунок 1 - Схема рыхлительного агрегата скалывающего действия для рыхления «толстого» слоя сезонно-мёрзлых грунтов (а - рабочее положение; б - транспортное положение)

Следует особо отметить, что выпускаемые в настоящее время статические рыхлители обладают конструктивной возможностью разрабатывать грунт на глубину до 2,1 м. Однако глубина сезонно-мёрзлого слоя может достигать 4…5 м (слой сверхглубокого промерзания или «сверхтолстый» слой). Статических рыхлителей способных разрабатывать грунт на такую глубину за один проход в настоящее время не существует. Считаем, что необходимо провести проработку возможного облика такого рыхлителя работающего по принципу скалывающего рыхления.

Основной конструктивной особенностью машины будет наличие нескольких (оптимально – трех) гусеничных шасси (тракторов) связанных между собой рамной металлоконструкцией, к которой крепится подвижная стойка однозубого рыхлителя. Рыхлитель закреплен в базе предлагаемой машины по оси продольной симметрии. Стойка рыхлителя имеет механизм вертикального перемещения (для заглубления наконечника и скола грунта снизу) и, возможно, механизм продольного перемещения для сдвига стойки с наконечником назад по разработанной прорези. В качестве шасси машины оптимально применять соответствующим образом доработанные серийные промышленные гусеничные тракторы. Транспортировка машины с объекта на объект производится в частично разобранном виде (рис. 2). У предлагаемой машины рабочий процесс необходимо организовать по принципу циклического комбинированного рыхления.

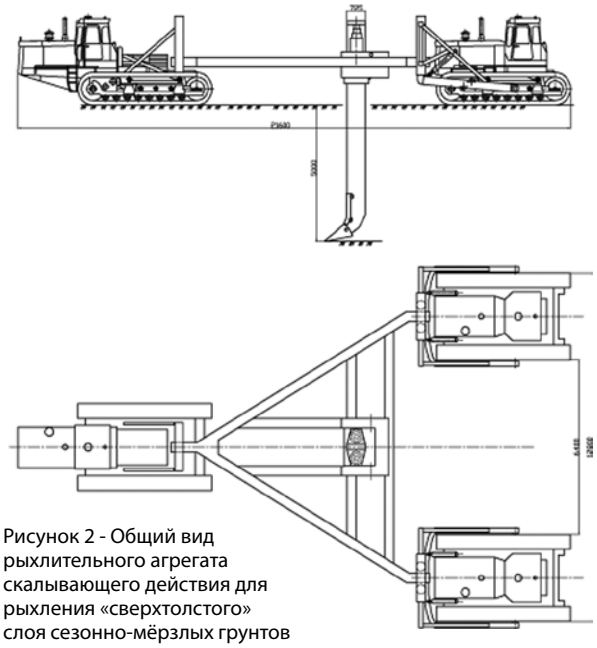


Рисунок 2 - Общий вид рыхлительного агрегата скалывающего действия для рыхления «сверхтолстого» слоя сезонно-мёрзлых грунтов

Для разработки сезонно-мёрзлых грунтов предлагаемыми способами авторы предлагают соответствующие конструкции рабочего оборудования. Рассмотрим возможные варианты конструкций более подробно.

При рыхлении «тонкого» слоя сезонно-мёрзлого грунта непрерывность процесса статического рыхления достигается с помощью установки сменного наконечника предлагаемой формы (рис. 3) на стойку рыхлителя статического действия. Скалывающий эффект при работе такой машины достигается только за счёт формы наконечника, который может быть установлен на любой рыхлитель статического действия вместо стандартного наконечника.

Предлагаемая форма наконечника позволяет создать значительное отрывное усилие снизу при его внедрении в массив грунта. В результате взаимодействия наконечника с грунтовым массивом происходит скол крупного элемента грунта в сторону открытой поверхности (вверх).

Наконечник относится к ассиметричным и имеет вогнутую радиусную лобовую поверхность для создания повышенного отрывного усилия. Для обеспечения увеличенной производительности рыхлителя возможен вариант наконечника с боковыми уширениями, что расширяет площадь одиночной прорези.

При рыхлении «толстого» слоя сезонно-мёрзлого грунта процесс оптимально организовать по циклическому принципу, комбинируя двойное (в двух плоскостях) статическое воздействие на

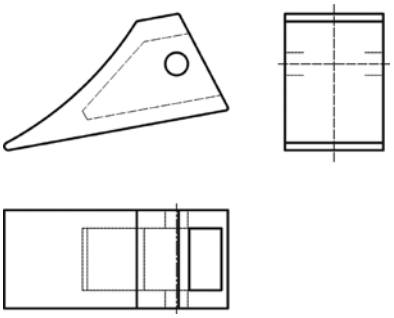


Рисунок 3 - Общий вид наконечника скалывающего действия без боковых уширений для рыхления «тонкого» слоя сезонно-мёрзлых грунтов

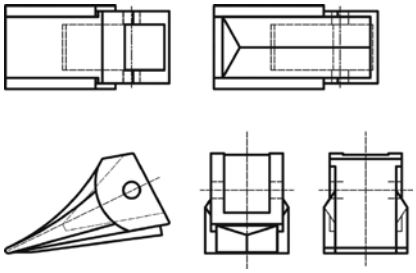


Рисунок 4 - Общий вид наконечника скалывающего действия с боковыми уширениями для рыхления «толстого» слоя сезонно-мёрзлых грунтов

разрабатываемый грунтовый массив. В этом случае рекомендуется иная (чем в случае рыхления «тонкого» слоя) форма наконечника (рис. 4).

Наконечник относится к ассиметричным и имеет радиусную лобовую поверхность для создания повышенного отрывного усилия. Для обеспечения увеличенной производительности рыхлителя также возможен вариант наконечника с боковыми уширениями, что расширяет площадь одиночной прорези. При этом боковые уширения могут быть выполнены как в варианте постоянных элементов (единых с основным телом наконечника) так и в виде подвижных клиньев, раздвигаемых особым механизмом. Наличие подвижных уширений позволяет снизить усилие требуемое при внедрении наконечника в массив сезонно-мёрзлого грунта (уширения втянуты) и увеличить размер отрываемого (скалываемого) снизу крупного элемента грунта от массива при выдвинутых уширениях. Кроме того, на нижней (задней) поверхности наконечника выполнен продольный клиновидный выступ (гребень). Гребень позволяет облегчить внедрение наконечника в дно прорези при заглублении стойки рыхлителя.

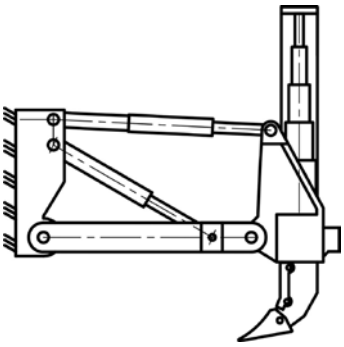


Рисунок 5 - Схема механизма для создания усилия отрыва на наконечнике рыхлителя скалывающего действия для «толстого» слоя сезонно-мёрзлого грунта

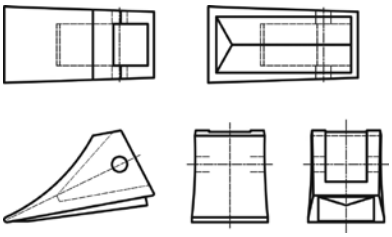


Рисунок 6 - Общий вид наконечника скалывающего действия без боковых уширений для рыхления «толстого» слоя сезонно-мёрзлых грунтов

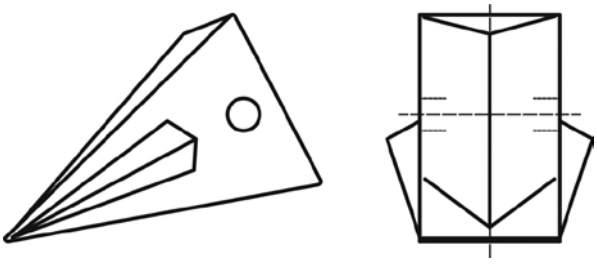


Рисунок 7 - Общий вид наконечника скалывающего действия с боковыми уширениями и центральным продольным гребнем для рыхления «толстого» слоя сезонно-мёрзлых грунтов

Усилие отрыва грунта от массива снизу в данном рыхлителе создаётся предлагаемым механизмом (рис. 5) воздействующим на грунтовый массив через стойку и наконечник. Перемещение вверх (вперёд – вверх) внедренного в массив грунта наконечника создаёт основное отрывное усилие, что и приводит к сколу крупного элемента грунта в сторону открытой поверхности (вверх).

Механизм для создания вертикального усилия отрыва на наконечнике состоит из двух гидроцилиндров установленных вертикально на рабочей балке и воздействующих на стойку рыхлителя. С помощью этого механизма также возможно изменять вылет наконечника (зуба) рыхлителя.

Все варианты наконечника рыхлителя целесообразно выполнять, с точки зрения авторов, с сужающимися в плане боковыми гранями (рис. 6). Таким образом, ширина наконечника в его задней части будет меньше чем в передней на 10…30 мм, в зависимости от размеров наконечника (типоразмера и класса рыхлителя). Такое сужение позволит снизить площадь контакта боковин наконечника со стенками разработанной прорези в зонах вдавливания и сжатия, и соответственно, силу сопротивления трению при рыхлении.

При применении скалывающего рыхления наконечник, по мнению авторов, может приобретать форму сочетающую в себе боковые уширения и центральный продольный гребень (рис. 7). Гребень создает скалывающее усилие и дополнительно дробит грунт, а боковые уширения расширяют разрабатываемую прорезь.

Таким образом, для эффективного рыхления сезонно-мёрзлых грунтов при разной глубине промерзания, как считают авторы, необходимо применять машины, работающие по двум различным процессам: непрерывного статического рыхления для «тонкого» слоя промерзания и циклического (комбинированного) рыхления для «толстого» и «сверхтолстого» слоя промерзания.

Различие в процессах работы прямо влияет на конструкцию рабочих органов скалывающего типа. Рассмотрим возможные варианты процессов скалывания в зависимости от толщины слоя промерзания грунта более подробно.

Как было отмечено выше, при разработке «тонкого» слоя сезонно-мёрзлого грунта процесс работы статического рыхлителя скалывающего действия не отличается от обычного рыхлителя. Процесс рыхления в этом случае выполняется по схеме «заглубление – установившееся рыхление – выглубление» и проходит в непрерывном режиме по всей длине грунтовой прорези.

При разработке «толстого» или «сверхтолстого» слоя сезонно-мёрзлого грунта процесс скалывающего рыхления рекомендуется производить в несколько этапов. На первом этапе – внедряем наконечник в грунт до оптимальной глубины рыхления при помощи механизма заглубления рыхлителя. На втором этапе – внедряем наконечник в грунт на достигнутой глубине поступательным движением в горизонтальной плоскости за счет движения базового тягача вперед. На третьем – при остановке тягача создаём на наконечнике отрывающее усилие в вертикальной плоскости при помощи предлагаемого механизма и отрываем (скалываем) снизу крупный элемент мёрзлого грунта от массива в сторону открытой поверхности (вверх). На четвёртом – сдвигаем стойку с наконечником немного назад (в разработанную прорезь) и вновь опускаем её до оптимальной глубины рыхления. Далее тягач возобновляет движение вперед. Таким образом, процесс разработки «толстого» или «сверхтолстого» слоя сезонно-мёрзлого грунта распадается на несколько последовательных подпроцессов.

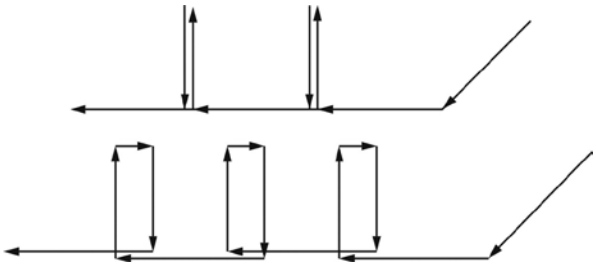


Рисунок 8 - Векторные схемы технологического процесса статического скалывающего рыхления «толстого» слоя сезонно-мёрзлого грунта: а) без сдвига наконечника назад (при малых глубинах рыхления); б) со сдвигом наконечника назад (при больших глубинах рыхления).

На рисунке 8 в графическом виде представлены возможные варианты процесса статического скалывающего рыхления «толстого» слоя сезонно-мёрзлого грунта.

На рис. 8,а показан вариант процесса без сдвига наконечника рыхлителя назад после скола очередного элемента грунта от массива. На рис. 8,б показан вариант процесса со сдвигом наконечника рыхлителя назад после скола очередного элемента грунта от массива. В этом варианте процесс погружения наконечника в прорезь будет облегчен по сравнению с первым вариантом (без сдвига).

Сдвиг наконечника назад при работе машины по второй схеме осуществляется либо за счёт движения всей машины назад (задним ходом), либо за счёт механизма горизонтального сдвига стойки в конструкции рыхлительного рабочего оборудования.

Заключение. Исходя из широкой вариативности глубин промерзания грунтов на территории России, необходима разработка и внедрение в производство, и эксплуатацию новых разновидностей рабочего оборудования рыхлителей, а также самих рыхлителей работающих на новом принципе – статическом скалывании грунта путём отрыва снизу крупных элементов грунта от массива.

Список литературы

1. Баловнев В.И., Хмара Л.А. Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1993. – 383 с.

2. Влияние особенностей конструкции трактора на эффективность работы навесного рыхлителя. / Б.А. Ефимов, Б.З. Захарчук, А.С. Селиванов и [др.] // Исследование машин для разработки мерзлых грунтов: Тр. ВНИИСтройдормаша. – М., 1974, Вып. 65. – С. 35 – 41.

3. Завьялов А.М. Основы теории взаимодействия рабочих органов дорожно-строительных машин со средой: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук/СибАДИ. – Омск, 2002. – 36 с.

4. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. – М.: Машиностроение, 1975. – 422 с.

5. Ковригин В. Отечественные бульдозеры (Состояние и тенденции развития отрасли). // Основные Средства. 2008, №6.

6. Ковригин В. Зарубежные гусеничные бульдозеры (Типоразмерные ряды, состояние и тенденции развития). // Основные Средства. 2008, №8.

7. Лозовой Д.А. Теоретическое и экспериментальное исследование рабочих органов машин для разработки мерзлых грунтов: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук/МАДИ. – М., 1971. – 44 с.

8. Лозовой Д.А., Запускалов В.А. Новое рабочее оборудование для разрушения мерзлых грунтов крупным сколом приложением статической нагрузки. // Исследование параметров и расчеты строительно-дорожных машин. – Саратов, 1972, Вып. 52. – С. 17 – 20.

9. Лозовой Д.А. Разрушение мерзлых грунтов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 181 с.

10. Машины и сменное рабочее оборудование для разработки мерзлых и скальных пород. / Г.А. Шлойдо, Б.З. Захарчук, Б.М. Орлов и [др.] // ЦНИИТЭстроймаш. – М., 1979. – 52 с.

11. Навесное тракторное оборудование для разработки высокопрочных грунтов. / Б.З. Захарчук Б.З., Г.А.

Шлойдо Г.А., А.А. Яркин и [др.] – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

12. Недорезов И.А. Прогрессивные методы разработки мерзлых грунтов. – М.: Транспорт, 1969. – 45 с.

13. Недорезов И.А. Повышение производственного потенциала зем¬леройных машин на основе создания новых рабочих органов: Дисс. ... д-ра техн. наук/МАДИ. – М., 1972. – 336 с.

14. Растегаев И.К. Машины для вечномерзлых грунтов: Учеб. пособие для вузов по спец. «Строит. и дор. машины и оборуд.» – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с. ил.

15. Растегаев И.К. Механика и теплофизика статического рыхления вечномерзлых грунтов. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1988. – 224 с.

16. Растегаев И.К. Разработка мерзлых грунтов в северном строительстве. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. – 351 с.

17. Садаков Ю.П., Уткин В.И. Разработка мерзлых грунтов сезонного промерзания. – М.: Стройиздат, 1972.

18. Сачук А.Ю. Обоснование выбора технологических параметров рыхлителя: Дисс. ... канд. техн. наук/ СибАДИ. – Омск, 2007.

19. Сердобов В.Б., Растегаев И.К. Исследование рыхления грунтов криолитозоны // Применение природосберегающих технологий в условиях холодных регионов: Материалы IX Международного симпозиума по развитию холодных регионов 1-5 июня 2010 г. – Якутск, 2010. – С. 159.

20. СНиП 23 – 01 – 99 (2003). Строительная климатология. – М.: Стройиздат, 2004.

21. Строительные и дорожные машины для районов с холодным климатом. / В.Д. Телушкин, В.А. Винокуров, В.А. Ряхин и [др.] – М.: Машиностроение, 1978. – 197 с.

22. Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. – М.: Машиностроение, 1990. – 359 с.

23. Хмара Л.А., Шатов С.В. Совершенствование конструкции рабочего органа рыхлителя для разработки прочных и мёрзлых грунтов. // Строительные и дорожные машины. 2009, №10. – С. 44 – 49.

24. Черкашин В.А., Червец С.М., Иванов Ю.А. Производство земляных работ в зимних условиях. – М.: Стройиздат, 1971.

25. Черкашин В.А. Разработка мерзлых грунтов. – Л.: Стройиздат, 1977. – 216 с.

26. Чеченков М.С. Современные методы разработки прочных грунтов. – Л.: Стройиздат, 1980. – 125 с.

НЕТРАДИЦИОННЫЙ ФЛЮИДОУПОР МЕРЗЛОТНО-ГИДРАТНОГО ГЕНЕЗИСА

А.И. Сивцев, И.И. Рожин

ИПНГ СО РАН, Якутск, e-mail: maraday@yandex.ru

На основе систематизации газопроявлений полученных из верхней части разреза в ходе нефтегазопоисковых работ в Вилюйской и Предверхоянской нефтегазоносных областях, а также в ряде гидрогеологических скважин Центральной Якутии сделано предположение о существовании промежуточного флюидоупора мерзлотно-гидратной природы. В качестве полигонного объекта с возможным содержанием промышленных скоплений газа под мерзлотно-гидратным флюидоупором рассмотрена территория Мастахского газоконденсатного месторождения. Выбор был обусловлен высокой вероятностью существования скоплений газа техногенного генезиса в отложениях верхней части разреза, т.к. потенциал естественной миграции углеводородов реализуется не в полной мере за время существования многолетнемерзлых пород оцениваемых в 10-20 тыс. лет. Путем сопоставления равновесных условий гидратообразования с пластовыми давлением и температурой определена нижняя граница мерзлотно-гидратного флюидоупора, образующего потенциальную ловушку для накопления газов за счет их перетоков по затрубному пространству скважин из более глубоких горизонтов разреза месторождения.

Введение

В настоящее время из недр полностью или частично перекрытых криолитозоной добывается до 90% производимого в стране газа и дальнейшие перспективы наращивания добычи также связаны с освоением месторождений в высоких широтах, т.е. области распространения криолитозоны. Между тем, интервал осадочных пород залегающих непосредственно под криолитозоной с точки зрения накопления углеводородов остается слабоизученным. Не менее актуальной является проблема предупреждения и ликвидации внезапных газовых выбросов, часто встречающихся при прохождении бурением под криолитозоной.

При проведении поисково-разведочного бурения на площадях и месторождениях Вилюйской синеклизы и прилегающего Предверхоянского прогиба в ряде скважин были получены промышленные и полупромышленные притоки газа из верхней части геологического разреза (ВЧР). В аналогичных геологических и термодинамических условиях в пределах Центральной Якутии в ряде гидрогеологических скважин были зафиксированы газопроявления различной величины [1].

Обзор вышеуказанных газопроявлений позволил обнаружить приуроченность их не непосредственно под многолетнемерзлыми породами, а ощутимо в низких интервалах разреза (до 200-300 м от подошвы многолетнемерзлых пород). Данное явление позволило предположить о существовании промежуточного флюидоупора, образующегося значительно ниже подошвы многолетнемерзлых пород в зависимости от химического состава газа и термобарических условий за счет образования гидратов.

Верхняя часть разреза в Вилюйской синеклизе и Предверхоянском прогибе представлена терригенными отложениями верхнеюрско-мелового возраста. Данные отложения многими исследователями рассматриваются как бесперспективные в отношении нефтегазоносности ввиду относительно неглубокого залегания и отсутствия в них региональных флюидоупоров. Имеющиеся факты газоносности ВЧР большинство исследователей сводит к повсеместной угленосности отложений и связанных с нею незначительным скоплениям газа под многолетнемерзлыми породами (ММП), способных экранировать углеводороды. Естественная миграция углеводородных газов из нижних продуктивных частей разреза и их аккумуляция в незначительном геологическом времени (время существования ММП) исключались ввиду присутствия регионально выдержанного глинистого флюидоупора – сунтарской свиты юрского времени. О газогидродинамической изолированности верхнеюрско-меловых отложений свидетельствуют также данные измерения давлений гидрогеологического комплекса, которые имеют дефицит на 15 атм относительно нормального гидрогеостатического, в то время как под сунтарской свитой давления триасовых и юрских гидрогеологических комплексов находятся в ожидаемых величинах.

Вероятно, часть газопроявлений из ВЧР в пределах освоенных территорий обусловлена межпластовыми перетоками газа по затрубному пространству скважин и аккумулировавшихся под мерзлотно-гидратным флюидоупором. Ниже с техногенной точки зрения рассматривается проблема потенциальной газоносности ВЧР Мастахского газоконденсатного месторождения.

Постановка проблемы

Потенциал «угольных газов» из относительно охлажденных угленосных отложений и их накопление в геологически ничтожное время (первые десятки тысяч лет) по классической схеме осадочно-миграционной теории не в полной мере объясняют довольно значительные величины газопроялений из ВЧР на освоенных структурах. На наш взгляд, альтернативным объяснением га-

зоносности ВЧР в разбуренных площадей является недостаточно высокое качество цементирования колонн скважин, обусловивших межпластовые перетоки в затрубном пространстве особенно с учетом ощутимого дефицита пластового давления в ВЧР. Свидетельства межпластовых перетоков углеводородных флюидов по затрубному пространству известны во многих выработанных или имеющих долгий срок эксплуатации месторождениях вплоть до формирования самостоятельных объектов разработки [2, 3].

Собственно в Якутии зимой 1971 г. в скв. №16 на Усть-Вилюйском месторождении имело место аварийное фонтанирование газа дебитом около 300 тыс.м3/сут при забое 746 м в отложениях бергеинской свиты. К слову сказать, именно получение из этого интервала газа и подключение ее к магистральному газопроводу в большей степени способствовали оперативной нормализации газоснабжения г. Якутска, когда один за другим начали обводняться эксплуатационные скважины Усть-Вилюйского месторождения. В последствии был сформулирован справедливый вопрос: Почему газ оказался среди проницаемых в целом отложений верхней юры при отсутствии над этим скоплением газа сколько-нибудь надежной покрышки? По этому поводу В.С. Ситников в своей статье [4] пишет: «…Разгадка оказалась проста. После бурения первых разведочных скважин на Усть-Вилюйском месторождении в связи с недостаточно высоким качеством цементирования эксплуатационных колонн начались перетоки в затрубном пространстве. Газ, поступая в скважины из первоначально выявленной нижнеюрской залежи, в значительной степени перераспределяется затем по разрезу месторождения. В свою очередь это привело к техногенному разрушению основной газовой залежи горизонта III-А. Темпы перераспределения газа по разрезу могли быть еще выше, но существенно замедлялись из-за толщи ММП в ВЧР. Именно ММП обеспечили задержки некоторых объемов газа под пачками отложений, содержащими отдельные прослои плотных пород, но в целом не отвечающими требованиям, предъявляемыми к флюидоупорам…».

Дело в том, что в районе Усть-Вилюйской структуры подошва ММП по геотермическим данным находится несколько выше уровня полученного аварийного фонтанирования (550±50 м), т.е. в вышеприведенном факте имело место опосредованное воздействие ММП на появление экранирующих свойств в изначально проницаемых породах. Проблема образования мерзлотно-гидратных флюидоупоров и об их уровнях относительно подошвы ММП нами рассматривалась в работе [1], где было показано, что в зависимости от состава газа и имеющихся термодинамических условий гидраты могут образовываться при достаточно высоких температурах (6÷8 ºС), другими словами, несколько ниже уровня подошвы ММП.

В целом, несмотря на многочисленные газопроявления из ВЧР на территории Вилюйской синеклизы и Предверхоянского прогиба к настоящему времени не открыты существенные залежи газа в верхней охлажденной части разреза. Данное явление, по всей видимости, обусловлено как низким начальным потенциалом нефтегазоносности близповерхностных отложений, обуславливающего соответствующую направленность геологоразведочных мероприятий нефтегазового назначения, так и неизученностью проблемы аккумуляции потенциальных переточных газов.

На наш взгляд, особый интерес в отношении перспектив газоносности ВЧР связанных с переточными газами представляет Мастахское газоконденсатное месторождение (ГКМ). В первую очередь, нужно отметить, что опыт строительства скважин в стадии поиска и разведки Мастахского ГКМ в относительно новых геологических и термодинамических условиях был небольшим, что обуславливало соответствующее качество цементирования. Вторым, но немаловажным, моментом можно считать имевшие место неоправданные высокие темпы разработки залежей Мастахского ГКМ с высокой депрессией на пласт [5]. Так, исследованиями Н.В. Черского [6] было показано, что даже при удовлетворительном качестве цементирования скважин разрушение цементного камня может происходить в результате эффекта дросселирования газа при значительном увеличении его отбора или переходе на свободное фонтанирование. Здесь также как в Усть-Вилюйском месторождении были зафиксированы значительные газопроявления в ВЧР. Например, в 1982 г. зафиксирован аварийный выброс газа в скважине №101 с глубины 530 м с дебитом 1100 м3/сут.

В настоящее время Мастахское ГКМ находится на конечной стадии разработки и эксплуатируется преимущественно в качестве дополнительного месторождения для нивелирования пиковых объемов добычи из Средневилюйского ГКМ в зимнее время. Месторождение разбурено многочисленными скважинами в 1960-1970 гг.

Экспериментальная часть

Мастахское ГКМ расположено в центральной части Хапчагайского мегавала Вилюйской синеклизы Сибирской платформы. Месторождение приурочено к двум брахиантиклиналям (Толонской и Мастахской) и разделяющей их седловине. Структуры имеют субширотное простирание и относятся к восточной части Средневилюйско-Мастахского вала. Нужно заметить, некоторые исследователи Толонское и Мастахское структуры (соответственно месторождения) соединяют в одну Толон-Мастахскую на основании их общего пермского слабоизученного структурного этажа с промышленными газопроявлениями. Каждая из них, в свою очередь, осложнена поднятиями меньших размеров, некоторые из которых контролируют отдельные залежи. Размеры Толонской структуры по данным бурения 14х7 км с амплитудой 50÷60 м; размеры Мастахской – 41х14 км с амплитудой 270-300 м. Общие размеры месторождения 70х(7÷14) км. Структура в целом характеризуется со-

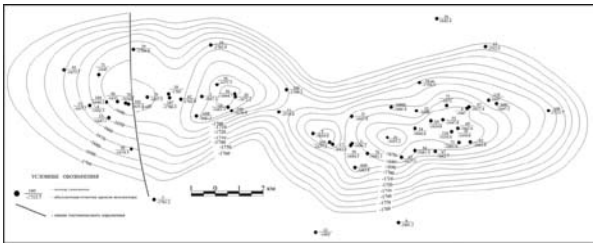


Рисунок 1 - Структурная схема по кровле продуктивного горизонта J1-II

впадением структурных планов по всем основным продуктивным горизонтам. На рис. 1 представлена структурная схема по кровле верхнего продуктивного горизонта J1-II.

Основные промышленные залежи газа приурочены мезозойским и верхнепермским отложениям, где выявлено и в разной степени разведано 9 промышленных залежей. Из них в промышленную эксплуатацию были введены 5 залежей: P2-I, T1-IVa, T1-X (восток), T1-X (запад) и J1-I.

Суммарные балансовые запасы, утвержденные в ГКЗ СССР по пяти введенным в эксплуатацию залежам, составляли более 35 млрд. м3 природного газа. В настоящее время месторождение находится на завершающей стадии разработки. На 01.01.2010 г. из месторождения добыто чуть более 12,5 млрд. м3 газа и в эксплуатации находятся только 3 скважины №65, 110 по залежи T1-IVa и скважина №105 по залежи P2-I, суммарный среднесуточный дебит которых не превышает 200 тыс. м3/сут. Проектом довыработки месторождения ввод новых эксплуатационных скважин не предусматривается.

В настоящее время по месторождению коэффициент конечной газоотдачи составляет 34% от начальных балансовых запасов газа утвержденных в ГКЗ СССР [5]. В этой связи можно предположить, что некоторый оцененный объем запасов газа из залежей неконтролируемо перераспределился в ВЧР по затрубному пространству скважин обуславливая преждевременное обводнение скважин.

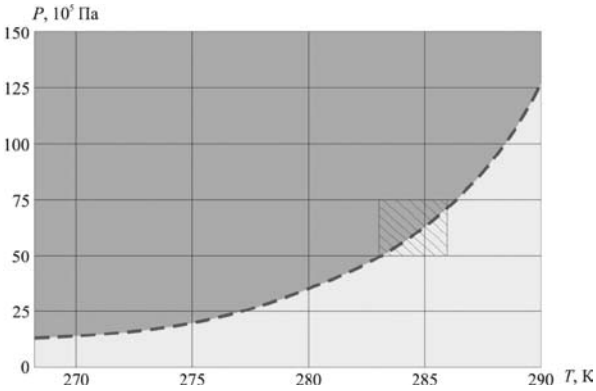


Рисунок 2 - Равновесные условия гидратообразования для газа следующего состава (% мол.): CH_4 – 96,69; C_2H_6 – 2,01; C_3H_8 – 0,27; i-C_4H_{10} – 0,14; C_5H_{12}+ – 0,05; CO_2 – 0,2; N_2 – 0,64

Для выявления возможных промышленных скоплений углеводородов в ВЧР на территории Мастахского ГКМ поставили следующие геолого-промысловые задачи:

1. Оценка потенциального источника, обеспечивающего поступление газа в верхнемезозойский потенциально газоносный этаж.

2. Определение уровня подошвы зоны гидратообразования (ЗГО) как потенциального флюидоупора для переточных газов с оценкой ее структурного плана на предмет образования ловушки.

Установление подошвы МПП в пределах Мастахского ГКМ по данным термометрии скважин и комплекса КВ и ПС (кавернометрия и самопроизвольная поляризация) является довольно несложной задачей с учетом пресности гидрогеологического комплекса ВЧР. Действительно, отличительной особенностью всего Хапчагайского мегавала, в том числе и Мастахского месторождения, является полное отсутствие высоко минерализованных пластовых вод в ВЧР. Воды слабоминерализованные, практически пресные (до 1÷4 г/л). Поскольку температуры замерзания таких вод мало отличаются от 0 °С, границей между мерзлыми и талыми породами служит нулевая геоизотермическая поверхность.

Определение подошвы ЗГО требует вычисления равновесных условий гидратообразования на основе вещественного состава газа и дальнейшего её приведения относительно подошвы ММП. Для расчетов равновесных условий гидратообразования взят состав газа из нижнеюрской залежи J1-I в условиях ВЧР. Такой выбор обусловлен прежде всего тем, что основные балансовые запасы газа (около 4 млрд. м3), остающиеся не выработанными до настоящего времени по месторождению, приурочены к залежи J1-I. При этом ввиду гипсометрического положения продуктивный горизонт является самым разбуренным на месторождении, т.е. углеводороды из этого горизонта являются главными потенциальными мигрантами в верхнемезозойскую часть разреза. Расчет равновесных условий гидратообразования был проведен по методике Е.Д. Слоуна [7]. На рис. 2 выше равновесной кривой находится область гидратообразования (ЗГО), а ниже – область двухфазного состояния «вода-газ» или «лед-газ». Косой линией выделен участок преимущественного попадания пластовых температур и давлений в ЗГО.

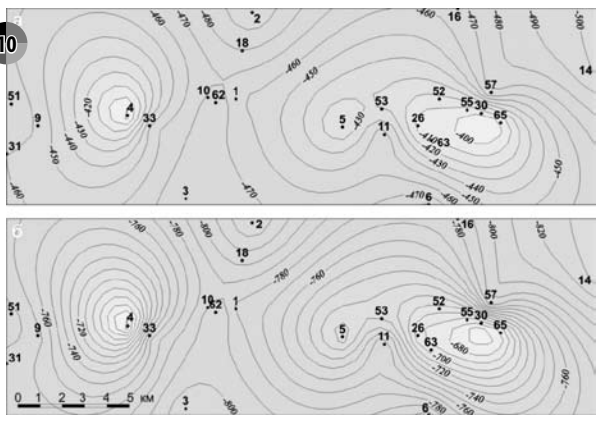


Рисунок 3 - Структурные схемы по подошвам ММП (а) и ЗГО (б)

Для приведения подошвы ЗГО относительно подошвы ММП использованы зависимости температуры и давления от глубины. Средний геотермический градиент подмерзлотных отложений по данным термометрии составляет 0,038ºС/м, а пластовое давление (в атм) вычисляется по формуле: $P_{пл}$ = (Н/10)-15, где Н – абсолютная глубина (в м), 15 – дефицит пластового давления (в атм) подмерзлотного гидрокомплекса. Решение находилось методом деления отрезков пополам (первый отрезок от подошвы ММП до любой безгидратной глубины).

В результате проведенных расчетов были найдены значения, соответствующие абсолютной отметке глубины залегания подошвы зоны гидратообразования по отдельным скважинам. На рис. 3 представлены построенные карты подошвы ММП (а) и ЗГО (б).

Результаты и обсуждение

В целом по месторождению нижняя граница (подошва) ЗГО располагается в пределах нижнемеловых отложений. Нижнемеловые отложения в пределах Мастахского ГКМ представлены тремя свитами – батылыкская, эксеняхская и хатырыкская. Батылыкская и хатырыкская свиты промышленно-угленосны, тогда как разделяющая их эксеняхская свита практически полностью лишена угольных прослоев. При этом на Хапчагайском мегавале эксеняхская свита появляется только на крыльях, будучи размытой в сводовых частях. Пески и песчаники хатырыкской свиты отличаются от батылыкской ожелезненностью и калинитизацией, однако по материалам промыслово-геофизических исследований обе свиты составляют толщу преимущественно грубозернистых терригенных образований довольно равномерно насыщенных промышленными пластами углей. Мощность нижнемеловых отложений в разрезе Мастахского месторождения составляет 300-500 м. Их кровля в присводовых скважинах совпадает с подошвой многолетнемерзлых пород.

Как видно из рис. 3 рельеф нижней границы ЗГО, как и рельеф подошвы толщи ММП, имеют антиклинальное строение и в целом повторяют структурные планы продуктивных комплексов нижней части разреза. Здесь также как и в структурных планах продуктивных комплексов выделяются два участка куполообразного залегания подошвы ЗГО – восточный 8,5□4 км с вертикальной амплитудой порядка 90 м и западный – 4,5□5,5 км с амплитудой 100 м.

Исходя из вышеизложенного, целесообразно проводить дополнительные исследования ВЧР Мастахского с целью выявления потенциальных скоплений газа под мерзлотно-гидратным флюидоупором, желательно прямыми методами исследования пласта. В случае получения положительных результатов при опробовании требуется весьма широкая и разносторонняя программа исследований по определению промысловых характеристик скоплений. Нужно заметить, что, несмотря на относительно высокую степень разбуренности Мастахского месторождения, геологические материалы, способные охарактеризовать потенциальный верхнемезозойский этаж газоносности, весьма скудны, что связано с традиционным отношением к верхнемезозойским отложениям как совершенно бесперспективным.

Заключение

В данной работе газовые гидраты рассмотрены в качестве флюидоэкранирующего материала, а не как самостоятельный потенциальный объект разработки. С появлением экономически выгодных технологических возможностей разработки газогидратных скоплений (залежей) интервалы с потенциальными газогидратами также могут вызывать научно-практический интерес.

Следует заметить, что для построения более точной схемы структурного плана подошвы ЗГО нужно иметь кондиционный вещественный состав газа из ВЧР, скорее всего, отличающийся от состава газа залежи J1-I за счет смешивания газов из разных залежей и так называемых «угольных» газов, которые несомненно имеют место быть.

При получении положительных результатов при опробовании ВЧР Мастахского ГКМ вышеприведенные методические подходы можно применить для всей группы газоконденсатных месторождений Хапчагайского и Логлорского валов Вилюйской синеклизы, характеризующихся относительной схожестью геологических и геотермодинамических условий.

Принципиальная возможность существования мерзлотно-гидратного флюидоупора также вызывает научно-практический интерес к верхней части разреза территорий с активной неотектоникой. К таковым в пределах Республики Саха (Якутия) относятся территории Предверхоянского и Предпатомского региональных прогибов

Список использованных источников:

1. Александров А.Р., Рожин И.И., Сивцев А.И., Сюндюков И.Ш. Об уровне мерзлотно-гидратного флюидоупора в пределах погребенного Якутского поднятия // Дегазация земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь: Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием к 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина, 18–22 октября 2010 г., г. Москва. – М.: ГЕОС, 2010. – С.18-20.

2. Севастьянов О.М., Захарова Е.Е., Багманова С.В. Методические и практические аспекты изучения газовых залежей переточного происхождения // Достижения, проблемы, перспективы. Сб. ст. – Оренбург: Газпромпечать ООО «Оренбурггазпромсервис», 2002. – С. 78-82.

3. Ларичев В.В., Попков В.И. Геоэкологические проблемы освоения нефтяных и газоконденсатных месторождений Прикаспийской впадины // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. НТЖ №3 / Сб. науч. тр. – Астрахань: Издат. дом «Астраханский университет», 2005. – С. 228-236.

4. Ситников В.С. Необычные скопления нефти и газа, прогноз и методика их поисков в условиях Крайнего Севера // Комплексирование геолого-геофизических методов при обосновании нефтегазопоисковых объектов на Сибирской платформе (в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия)). – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2009. – 318 с.; вкл. с. 147-152.

5. Сивцев А.И. Причины низкой эффективности разработки Толон-Мастахского ГКМ // Электронное издание «Нефтегазовое дело». http://www.ogbus.ru/authors/Sivtzev/Sivtzev_1.pdf, 2008. – 20 с.

6. Черский Н.В. Конструкция газовых скважин. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 284 с.

7. Sloan E. Dendy, Jr. Clathrate hydrates of natural gases. – N.Y., Basel, Hong-Kong: Marcel Dekker, Inc., 1997. – 705 pp.

О РАБОТЕ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В ОПЫТНОМ ПОДЗЕМНОМ ХРАНИЛИЩЕ СЕМЯН РАСТЕНИЙ

Г.П.Кузьмин, В.Н.Панин

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск,e-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru

При определенных отрицательных температурах семена растений в течение длительного времени сохраняют жизнеспособность. В подземных хранилищах на большей части криолитозоны требуется охлаждение окружающих мерзлых грунтов. Экспериментальными исследованиями оценивается возможность поддержания в подземном хранилище оптимальной температуры для долговременного хранения семян растений холодным наружным воздухом. Приводятся параметры опытной подземной горной выработки и охлаждающего устройства. Представлены результаты наблюдений за работой охлаждающего устройства и формированием температуры окружающих мерзлых грунтов.

Введение

В настоящее время установлено, что семена растений при определенных отрицательных температурах в течение длительного времени сохраняют свою жизнеспособность. Так, семена бобовых и зернобобовых культур, которые более 30 лет находились в подземной камере при температуре минус 4-5 0С, показали высокую сохранность биологических свойств – всхожесть и воспроизводство [1]. Предварительные исследования и опыты длительного хранения семян, выполненные в Институте биологических проблем криолитозоны СО РАН, указывают, что благоприятными температурами в криохранилищах являются минус 6-8 С. В криолитозоне такие относительно низкие температуры грунтов характерны только для северных его районов.Поэтому на большей части криолитозоны необходимо дополнительное охлаждение окружающих мерзлых грунтов. Единственным природным источником холода , который можно использовать для этого, является наружный воздух, когда его температура становится ниже температуры мерзлых грунтов на глубине расположения подземного криохранилища.

В связи с циклическими изменениями температуры наружного воздуха возникает задача стабилизации температуры в криохранилище – охлаждение его в летнее время.

При охлаждении подземных выработок холодным воздухом нужно учитывать также сублимацию льда, приводящую к иссушению и разрушению пристенных слоев грунта. Как показывают экспериментальные исследования, разрушение мерзлых грунтов при продолжительном их взаимодействии с потоком холодного воздуха достигает значительных величин [2]. В связи с этим для криохранилищ семян растений может быть принят только неконтактный способ охлаждения холодным воздухом. Если стены хранилища гидроизолированы теплопроводным материалом, то холодный воздух целесообразно пропускать по всему его сечению. В этом случае достигается наименьшее аэродинамическое сопротивление и наибольшая площадь теплообменной поверхности. Для охлаждения хранилищ с открытыми стенами может применяться менее эффективный способ охлаждения путем пропуска холодного воздуха по металлическим трубам или каналам.

Конвективное движение воздуха по выработке и трубам происходит вследствие разности давлений столбов воздуха в каналах нисходящего и восходящего потоков и разности разряжения воздуха над ними, вызванного ветром.

С целью оценки возможности охлаждения мерзлых грунтов вокруг криохранилища холодным наружным воздухом, пропускаемым по металлическим трубам, были проведены эксперименты в существующей подземной горной выработке. В докладе приводятся параметры опытной подземной горной выработки и охлаждающего устройства, излагаются результаты наблюдений за температурой и скоростью потока воздуха в охлаждающих трубах и динамикой температуры грунтов стенки выработки, а также рекомендации по охлаждению криохранилища в летнее время.

1. Параметры опытной подземной выработки и охлаждающего устройства

Опытная выработка расположена на территории г. Якутска, где мощность многолетнемерзлых грунтов составляет 250-300 м, а среднегодовая температура воздуха по многолетним данным равна минус 10,3 ºС. Продолжительность периода со среднесуточной температурой ниже 0 ºС составляет 211 суток. Естественная температура грунта на глубине 20 м равна минус 2,3 ºС. Глубина сезонного протаивания на открытом участке составляет 2,2 м. Грунты площадки до глубины 22 м представлены в основном мелкозернистыми песками с отдельными слоями супеси и включениями прослоек из растительных остатков. Плотность грунтов в диапазоне глубин 0-20 м изменяется от 1,79 до 1,94 г/куб.см, а влажность колеблется от 0,19 до 0,29д.е.

Опытная выработка представляет собой горизонтальную подземную камеру круглого поперечного сечения диаметром 3,2 м и длиной 50 м, расположенную на глубине 23 м (рис.1).

Стены ее облицованы льдом толщиной около 5 см. Камера соединяется выработкой прямоугольного сечения (0,5 х 1.3 м) длиной 10 м с вертикальным шахтным стволом. Ствол обсажен сталь-

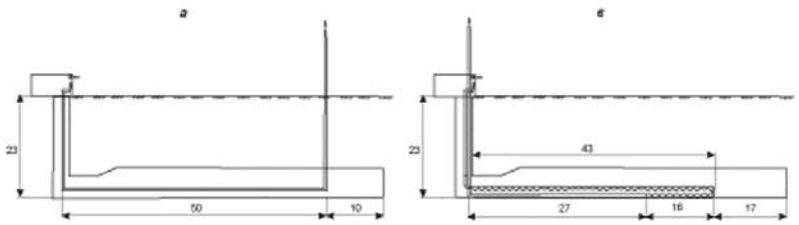


Рис.1 Схема воздушных охлаждающих устройств в опытной выработке а – 2009-2010 гг; в – 2010-2011 гг.

ной трубой диаметром 1220 мм с приваренным днищем и люком в верхней ее части. Обсадная труба оборудована площадками через каждые 3,5 м и вертикальными лестницами.

Охлаждающее устройство состоит из приточного и вытяжного вертикальных воздуховодов и горизонтального теплообменника. Верхний открытый конец воздуховода для нисходящего потока воздуха располагается на уровне поверхности земли, а теплоизолированный воздуховод для восходящего потока воздуха возвышается над поверхностью земли на 5 м.

Теплообменник в 2009 г. был выполнен из алюминиевых гладких труб диаметром 200 мм и длиной 50 м. Вытяжная труба выведена через скважину, пробуренную у конца камеры на расстоянии 50 м от ствола. В 2010 г длина теплообменника была увеличена и выполнена из алюминиевых гладких труб длиной 27 м и гофрированных алюминиевых труб длиной 59 м, соединенных последовательно между собой, и воздуховодами, расположенными в обсадной трубе ствола.

Опытная выработка оборудована датчиками для измерения температуры воздуха в охлаждающем устройстве и грунта вокруг него. Кроме того, производились измерения скорости потока воздуха, циркулирующего в охлаждающем устройстве.

2. Результаты и обсуждение

Ниже приводятся результаты наблюдений, проводившихся в 2009-10 гг в опытной выработке.

На рис. 2 представлена динамика температуры грунтов на различной глубине от стенки горизонтальной камеры при охлаждении ее холодным наружным воздухом.

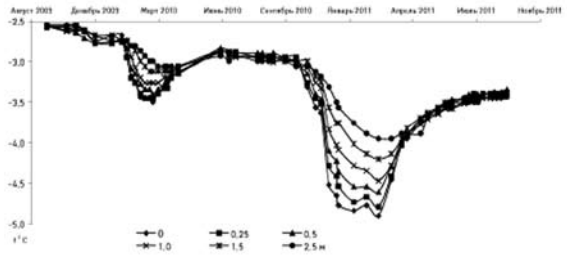


Рисунок 2 - Динамика температуры грунтов вокруг опытной выработки на глубине 0 – 2,5 м.

Анализ кривых температуры грунтов показывает следующее. В процессе работы охлаждающего устройства конвективного действия в 2009-2011 г максимальная в году температура в камере понизилась с - 2,3 до -3,8 ºС, причем примерно одинаково после первой и второй зимы. Разница между максимальными летними и минимальными зимними температурами в камере после второго года работы охлаждающего устройства незначительна и составляет около 0,5 ºС. Скорость потока воздуха в охлаждающем устройстве существенно зависит от температуры наружного воздуха (рис.3). Разброс данных объясняется изменением температуры грунтов стенки выработки. При одинаковых температурах наружного воздуха, измеренных в разное время, скорость потока воздуха в последующий момент времени всегда меньше, хотя и незначительно, скорости потока в предыдущий момент.

Существенным недостатком рассматриваемой схемы охлаждающего устройства подземного хранилища, стены которого не гидроизолированы, является льдообразование на поверхности теплообменника в результате конденсации водяного пара. Несомненно, это приводит к развитию медленного процесса сублимации льда в окружающих мерзлых грунтах и некоторому снижению теплопередачи от воздушной среды в хранилище к потоку холодного воздуха в теплообменнике. За один цикл охлаждения на поверхности трубы намерзает слой плотного льда толщиной до 10 мм, который периодически требуется удалять. Как показывают расчеты, коэффициент теплопередачи от потока воздуха в криохранилище снижается незначительно.

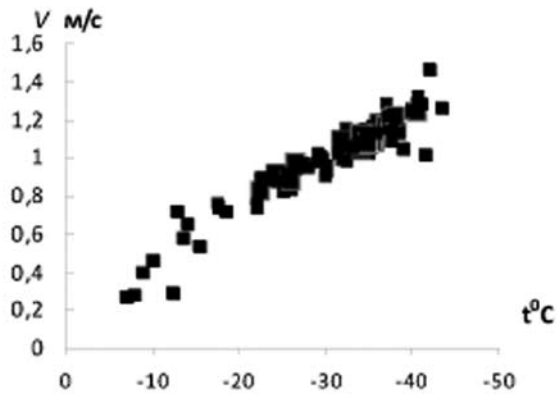


Рисунок 3 - Зависимость скорости нисходящего потока воздуха от температуры на начальном участке трубы диаметром 300 мм.

Увеличение длины и соответственно площади теплообменника в 2010 г в 1,7 раза не вызвало заметного изменения скорости потока воздуха в охлаждающем устройстве. Следовательно, охлаждающая способность рассматриваемого устройства может быть еще повышена за счет увеличения длины теплообменника без изменения параметров труб для нисходящего и восходящего потоков воздуха.

На основании полученных данных можно сделать следующие основные выводы.

Воздушное охлаждающее устройство конвективного действия при соответствующих параметрах и площади теплообменной поверхности может обеспечить понижение температуры в подземной выработке до требуемого значения для долговременного хранения семян растений. Процессы сублимации льда и иссушения окружающих мерзлых грунтов будут происходить в течение всего времени эксплуатации хранилища. Однако интенсивность этих процессов будет низкой в связи с относительно малой площадью поверхности теплообменника, ограничивающей количество льдообразования из водяных паров. Охлаждающая способность устройства должна определяться требованиями достижения оптимальной температуры в подземном хранилище после первого или ряда циклов его работы. При выполнении первого требования возможности охлаждающего устройства в процессе дальнейшей его эксплуатации полностью не будут использованы. При выполнении второго требования эксплуатация хранилища начинается не сразу после окончания его строительства. Рассмотренная схема охлаждения мерзлых грунтов вокруг хранилища холодным наружным воздухом не обеспечивает необходимой стабильности температуры в хранилище. В летнее время температура в хранилище несколько повышается

Для устранения отмеченных недостатков рекомендуется следующее.

Первый цикл охлаждения криохранилища следует производить путем пропуска холодного воздуха через всё сечение выработки. При необходимости в начальный период эксплуатации криохранилища может быть применен принудительный способ вентиляции. Иссушение пристенных слоёв грунта за один зимний период при отсутствии гидроизоляции стен будет незначительным.

Для стабилизации температуры в криохранилище следует предусматривать заложение на небольшую глубину в грунт системы охлаждающих труб с теплоизоляционным слоем над ними. При этом криохранилище должно быть расположено на такой глубине, чтобы зимние температурные волны от заглубленных охлаждающих труб достигали этой глубины в летнее время.

Проект охлаждающего устройства, обеспечивающего стабильную круглогодичную температуру, разработан для Федерального криохранилища 1-й очереди, строительство которого начато в 2011 г и будет завершено в 2012 г.

Заключение

Оптимальная температура для хранения семян растений в подземных хранилищах в условиях криолитозоны с недостаточно низкой отрицательной температурой окружающих мерзлых грунтов может быть обеспечена с помощью воздушных охлаждающих устройств конвективного действия. В зимнее время необходимая температура поддерживается с помощью охлаждающего устройства, проложенного внутри хранилища. В летнее время охлаждение криохранилища достигается за счет холодной температурной волны от системы приземных охлаждающих труб. Для защиты массива мерзлых грунтов от летнего прогрева предусматривается теплоизоляция.

Список литературы

1. Кершенгольц Б.М., Иванов Б.И., Десяткин Р.В., Ремигайло П.А., Федоров И.А., Чжан Р.В. 2008. Использование естественного холода многолетнемерзлых пород для длительного хранения генетических ресурсов. М.: Вестник ВОГиС, 2008, т.12, №4– С.524-533.

2. Кузьмин Г.П.2002. Подземные сооружения в криолитозоне.– Новосибирск: Наука, 2002.– 176 с.

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СОЛИФЛЮКЦИОННЫХ СКЛОНОВ

В.А. Чихарев[1]

[1]ООО «ТюменНИИгипрогаз», г.Тюмень, e-mail: chiharevva@tngg.ru

В статье предлагается новый способ выявления картографирования солифлюкционных склонов средствами построения модели рельефа в программном комплексе Isoline GIS, по данным топографических карт.

Солифлюкция – широко распространенный склоновый геокриологический процесс смещения по уклону под действием силы тяжести протаявшей верхней части насыщенных водой пород, обладающих вязко-текучей консистенцией. В рельефе солифлюкция фиксируется по характерным формам террас или валов. Солифлюкционное движение масс отличается от оползней и сплывов тем, что скорость движения гораздо меньше и осуществляется оно не только на крутых, но и на очень пологих склонах. Солифлюкционные склоны непригодны для строительства площадных сооружений. Для строительства линейных сооружений на солифлюкционных склонах применяются специальные технические решения. Выявление и картографирование солифлюкционных склонов является важной задачей инженерных изысканий еще на предпроектной стадии.

Известные способы картографирования склонов с потенциальным развитием солифлюкции сводятся к вычислению углов уклона, механического состава, влажности и температурного режима пород. Для чего используются топографические и тематические карты, материалы инженерных изысканий, а также расчетные формулы [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Нами для картографирования солифлюкции использована методика построения модели рельефа по наиболее доступным топографическим картам М 1:25 000 (рис. 1 и 2) средствами программного комплекса Isoline GIS, используемого для геолого-геофизических целей.

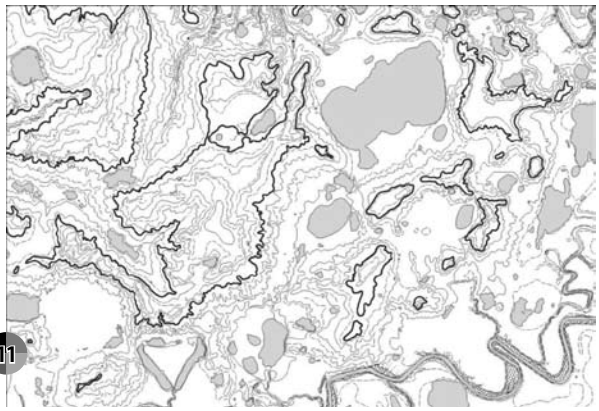


Рисунок 1 - Схема рельефа представляемого участка

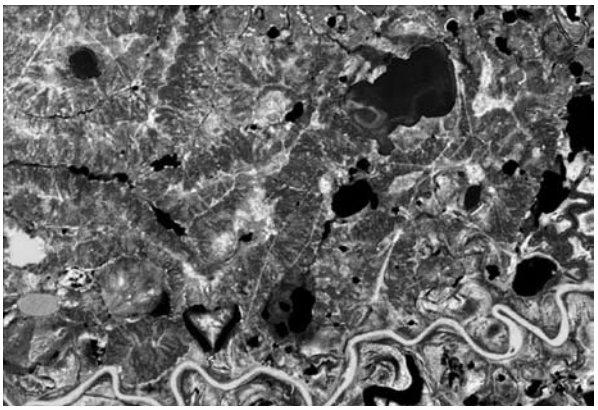


Рисунок 2 - Космический снимок территории

При создании модели рельефа была построена сетка высот с визуализацией рельефа (рис. 3), а так же карта углов уклонов поверхности (рис. 4). Визуализация рельефа является обратной задачей по построению изолиний для топографических карт. Однако при этом имеется ряд отличий полученной модели от исходного рельефа ввиду ряда условий. Во-первых, мы не можем восстановить «исходный рельеф», поскольку отметки высот интерпретированы в изолинии, заведомо отличающиеся от «реальной» ситуации. Во-вторых, изолинии генерализованы в соответствии с масштабом карты.

Эти обстоятельства играют положительную роль для картографирования солифлюкционных процессов, ввиду возможности создавать модель генерализованного рельефа соответствующего масштаба. Так, при построении модели рельефа 1:25 000 отражаются элементы, необходимые при изучении природных тел среднемасштабного картографирования (типов местности, серий урочищ) с отсеиванием информационного шума. При построении мелкомасштабной модели данным способом возможно отражение крупных геологических элементов.

Картографирование солифлюкционных процессов сопряжено с рядом трудностей: интерпретация данных дистанционного зондирования требует определенных навыков и знаний конкретной территории с фактическими наблюдениями, использование стандартных топографических карт также требует значительных временных затрат и навыков. Построение модели рельефа четко выделяет солифлюкционные трассированные склоны, визуализируя их, что значительно повышает качество картирования солифлюкции и облегчает работу исследователя.

Предложенный в докладе способ выявления и картографирования солифлюкционных склонов средствами построения модели рельефа, позволяет произвести инвентаризацию последних и принять необходимые решения по оптимизации размещения инженерных объектов.

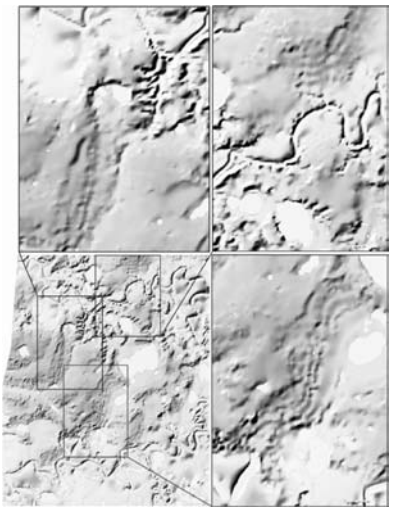


Рисунок 3 - Модель рельефа в Isoline с четким выявлением солифлюкционных террас

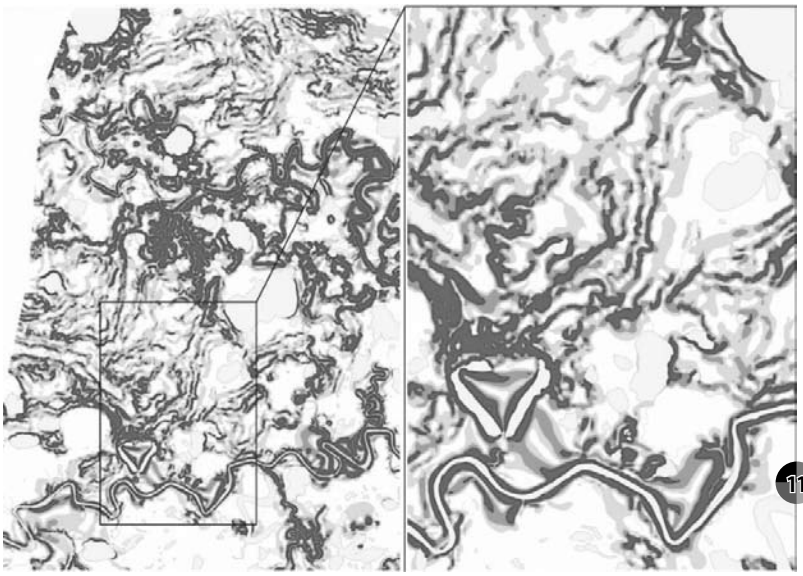


Рисунок 4 - Градиент уклона наклона в Isoline отражает уклон поверхности в градусах. Выделяются вертикальная и наклонная части солифлюкционных террас

Список литературы

1. Втюрина Е. А., Геоворкян С. Г., Познанин В. Л. Криогенные сплывы как стадия перехода закрытой солифлюкции в открытую // I Международная конференция по вечной мерзлоте: мат-лы конф. Пекин, 1993. С. 660-663 (на англ.яз).

2. Жигарев Л. А. Причины и механизм развития солифлюкции. М.: Наука, 1967. 158 с.

3. Каплина Т. Н. Криогенные склоновые процессы. М.: Наука, 1965. 296 с.

4. Козин В. В. Ландшафтно-экологическая среда Западной Сибири: Ямало-Гыданская область: учебное пособие. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2007. 286 с.

5. Козин В. В., Левченко В. С., Шляхов А. Ф. Среднемасштабная ландшафтная карта полуострова Ямал // Ландшафты Западной Сибири. Иркутск: ИГ АН СССР, 1984. С. 34-39.

6. Кудрявцев В. А., Гарагуля Л. С., Кондратьева К. А. Закономерности формирования и прогноз развития мерзлотно-геологических процессов и явлений. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1974. 348 с.

7. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Институт криосферы Земли СО РАН, 2007. 206 с.

8. Познанин В. Л. Факторная классификация процессов рельефообразования в криолитозоне // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. № 3. 2000. С. 43-48.;

9. Познанин В. Л., Баранов А. В. Криогенные склоновые процессы: Эрозионные процессы центрального Ямала / Под ред. А. Ю. Сидорчука и А. В. Баранова. СПб., 1999. С. 119-132.

РЕЗУЛЬТАТЫ И СТРАТЕГИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УПРАВЛЕНИЯ НАУКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ НПО «ФСА»

С.Н. Стрижков

НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень, strigkov@pochta.ru

Изложена стратегия инновационных исследований управления науки и проектирования. Показан опыт инновационно активного предприятия НПО «Фундаменстройаркос»: замкнутый инновационно-инвестиционный цикл включает научные исследования, проектирование, производство, монтаж и строительство, авторский надзор и мониторинг систем ТСГ. На примере более 300 объектов показана рентабельность инновационных технических решений и огромный фактический экономический эффект от внедрения их в производство. В докладе приведены результаты опытно-промышленных и экспериментальных исследований, а также результаты численного моделирования процессов теплового взаимодействия зданий и сооружений с вечномерзлым грунтом. Представлены практические рекомендации для проектирования и производства систем термостабилизации грунтов оснований. Показаны перспективные направления инновационной деятельности НПО «Фундаментстройаркос».

В России к северным территориям относится около двух третей территории Российской Федерации. В то же время в этих районах постоянно проживает 10,7 млн.чел. или 7,4% населения. В настоящее время в российской арктической зоне добывается и производится около 80% российского газа, более 90% никеля и кобальта, 60% меди, 96 % платиноидов, 100% барита, производится продукция, составляющая 22% российского экспорта. Согласно прогнозам Минприроды РФ, в российской Арктике (площадь – 6,2 млн. кв. км или 21% всего шельфа запасов углеводородов. На сегодняшний день выявлено более 20 крупных нефтегазовых месторождений, и в 10 из них перспективность недр уже доказана. Если учесть, что нефтегазовые ресурсы в Западной Сибири истощаются, очевидно, что в стратегической перспективе добыча сырья в Арктическом регионе должна будет расти. Причем условия для разработки «дорогих» в освоении месторождений начинают складываться только сейчас – благодаря выгодной конъюнктуре нефтяных цен и огромным накоплениям в Стабилизационном фонде Россия может себе позволить запуск крупномасштабных проектов по освоению Севера и Арктики. В условиях ужесточения мировой конкуренции за обладание энергетическими ресурсами понятно, что задача контроля над Арктикой и разработка арктических ресурсов является для нашей страны стратегической задачей. Поэтому эффективное использование этих богатств, возможное только на инновационном пути развития, так важно для экономики России. К сожалению, в России инновационный потенциал используется недостаточно для развития национальной экономики. По различным оценкам в Росси используется 8-10% инновационных идей и проектов, в то время как Япония использует 95%, а США -62%. Сегодня инновационное развитие в районах Севера и Арктики приобретает особое значение. Прежде всего, это связано с тем, что в ближайшей перспективе начнется разработка новых крупных запасов полезных ископаемых на территориях Полярного Урала, Севера Сибири и Дальнего Востока, на шельфе арктических морей.

Эффективная деятельность отраслевых комплексов и компаний, занимающихся развитием строительства и освоением районов Крайнего Севера, расположенных на вечной мерзлоте, в долгосрочной перспективе в условиях рыночной экономики, главным образом, определяется **инновационным развитием**.

Сопровождение инновационной деятельности с самых нижних звеньев организационной структуры должно осуществляться на основе продуманной и регламентированной **инновационной стратегии** (на государственном, региональном уровнях и на уровне инновационно-активного предприятия, каким себя позиционирует ООО НПО «Фундаментстройаркос».



Рисунок 1 - Сопряженный классификатор инноваций

По определению, данному в «Концепции инновационной политики РФ», «инновация» - конечный результат, получивший реализацию в виде нового или усовершенствованного продукта, реализуемого на рынке, нового или усовершенствованного технологического процесса, используемого в практической деятельности.

В г. Осло в 1992 г. приняты международные стандарты системного описания инноваций, названные «Руководство Осло».

Основные классификационные признаки инноваций представлены на рисунке 1.

Для Российской строительной практики характерен особый тип инноваций не вошедший в мой классификатор, а именно – пионерные

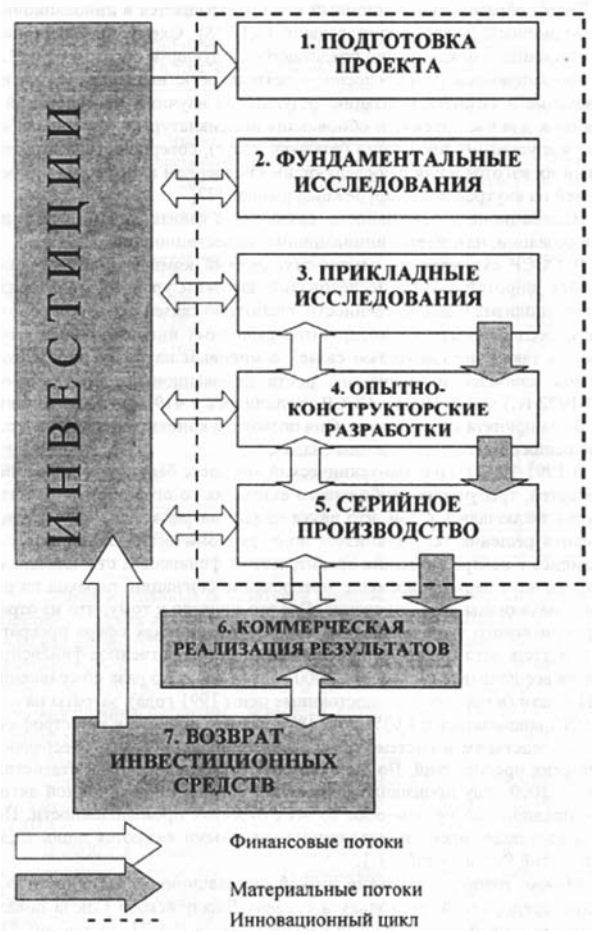


Рисунок 2 - Схема инновационно-инвестиционного цикла

инновации.

Пионерные инновации являются новым для данного сегмента рынка (потребителей) или отрасли (в нашем случае нефтегазовой отрасли строительства).

К пионерным инновациям мы отнесём изобретение парожидкостных термостабилизаторов (базисная инновация) и далее создание абсолютно уникальной системы термостабилизации «ГЕТ» (горизонтальной естественнодействующей трубчатой) и «ВЕТ» (вертикальной), разработанной двадцать лет назад талантливым изобретателем Г.М. Долгих[1].

Рождение пионерных («ГЕТ», «ВЕТ», ТК) инноваций протекает через инновационный процесс – это система процессов преобразования научного знания в прикладные, где инновация вызревает от идеи до конкретного продукта, технологии или услуги.

В условиях рыночной экономики в основу инновационной деятельности положена реализация конкретных проектов, каждый из которых состоит из нескольких фаз: получение знаний, их коммерческой реализации и возврата инвестиционных средств. Это представляет собой инвестиционный цикл (рисунок 2).

Одним из главных показателей инновационного потенциала предприятия – является его изобретательская активность. Как свидетельствует статистика – изобретательская активность в России снижается: количество выданных патентов снижается на 8-10%, а вот зарубежных растёт на 26%.

Эта статистика не касается ООО НПО «Фундаментстройаркос», поскольку число полученных патентов постоянно растет и уже перевалило за 50.

Специализация ООО НПО «Фундаментстройаркос» - инновационное предпринимательство. Это процесс создания и коммерческого использования технико-технологических нововведений (инноваций) в области создания новой продукции – систем термостабилизации, и услуг – производство СМР по их монтажу и обслуживанию.

Стратегия инновационного развития предприятия должна быть направлена на освоение и захват новых рынков сбыта инновационной продукции [4]. На рисунке 8 представлены перспективные области применения систем термостабилизации грунтов, разработанных и выпускаемых в ООО НПО «Фундаментстройаркос». Из этой схемы видно, что возможно по крайне мере, удвоение объема выпуска продукции и производства строительно-монтажных работ с учетом выхода на новые рынки.

Очень важным звеном стратегии является повышение качества выпускаемой продукции. Об этом будет много сказано в докладах ученых ООО НПО «Фундаментстройаркос».

Совершенствование и модернизация оборудования неразрывно связаны с проведением большого количества научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, создания новых инноваций.

С этой целью в ООО НПО «Фундаментстройаркос» создано специальное научное подразделение.

Научная часть ООО НПО «Фундаментстройаркос» состоит из нескольких подразделений и включает в себя:

– опытно-промышленный полигон в п.Матмасы,
– лабораторию (группу) инновационных технологий и конструктивных решений,
– лабораторию (группу) физического моделирования процессов,
– лабораторию (группу) компьютерного моделирования,
– лабораторию (группу) мерзлотоведения и инженерно-геологических исследований
– лабораторию (группу) экологических исследований, охраны окружающей среды и геокриологического мониторинга

Планируется расширение видов и направлений научно-исследовательских опытно-конструкторских работ с открытием новых направлений и лабораторий.

Научные исследования и опытно-конструкторские разработки направлены на повышение качества, модернизацию и совершенствование уже существующих систем термостабилизации грун-



Рисунок 3 – Опыт и перспективы внедрения различных систем термостабилизации грунтов оснований ООО НПО «Фундаментстройаркос»

тов оснований, а также на разработку новых технологий, конструкций, узлов этих систем.

На рисунке 9 представлены основные стратегические направления инновационной активности, которые, безусловно, необходимо корректировать исходя их конкретных условий, ситуаций и вызовов.

При разработке и создании новых инновационных конструкций и технологий следует учитывать, что в России общая площадь районов распространения вечной мерзлоты равна ~10,7 млн. км2, что составляет около 63% территории страны. В районах распространения вечной мерзлоты на территории РФ сосредоточено более 80% разведанных запасов нефти, коло 70% - природного газа, огромные залежи каменного угля и торфа, создана разветвленная инфраструктура объектов ТЭК. Многие из них построены на свайных фундаментах, используют многолетнемерзлый грунт в качестве оснований и рассчитаны на эксплуатацию в определенных температурных условиях. Рост температуры мерзлых грунтов, в связи с повышением на Земле средней годовой температуры воздуха приблизительно на 0,6 0С, и уменьшение их несущей способности представляет серьезную угрозу для ТЭК России, приводя к повреждениям объекты инфраструктуры (дороги, нефте- и газопроводы, резервуары, площадки нефтегазопромысловых объектов, здания и др.) и затрудняя освоение новых месторождений.

Исследования показали, что при оттаивании мерзлых грунтов изменяются их физико-механические свойства (объемный вес, влажность, пористость, адгезия к сваям-основаниям), что, в конечном счете, уменьшает несущую способность фундаментов, приводя к повреждению построенных на них сооружений.

Особенно высокой уязвимостью обладают мерзлые грунты с повышенным содержанием солей. В таких грунтах по всей глубине мерзлого слоя наблюдаются линзы различного размера с высокоминерализированной водой, имеющей отрицательную температуру – криопэги. Рассол в криопэгах находится в термодинамическом равновесии с окружающим мерзлым грунтом, и даже небольшое увеличение грунтов, при том, что она остается отрицательной, приводит к нарушению равновесия «раствор-лед» и развитию деструктивных геоморфологических процессов. Особую опасность криопэги представляют для опор и скважин. Локальное протаивание прилегающего к криопэгу грунта вблизи вертикальной стенки даже на большой глубине может привести к распространению рассола вдоль всей конструкции и дальнейшему протаиванию грунта вдоль скважины или опоры. Засоленные грунты широко распространены на Ямале в районах открытых и перспективных нефте- и газовых месторождений.

Помимо объектов ТЭК имеются многочисленные примеры нарушения целостности и разрушения жилых и производственных зданий из-за уменьшения несущей способности вечной мерзлоты и различных форм термокарста.

Проблема устойчивости сооружений дополнительно осложняется негативным влиянием антропогенных и техногенных факторов, усиливающих деструктивное воздействие меняющегося климата.

Установлено, что при отклонениях от проектного режима эксплуатации отапливаемых зданий и сооружений процесс таяния льдонасыщенных мерзлых грунтов наблюдается в основании фундаментов при попадании в них теплых технологических или грунтовых вод, возникающих под влиянием тепловыделения сооружений, инженерными коммуникациями и др.

В Якутске с начала 1970-х годов более 300 зданий получили серьезные повреждения в резуль-



Рисунок 4 – Стратегические направления инновационной деятельности

тате просадок мерзлого грунта. Статистика свидетельствует, что в период с 1990 по 1999 годы число зданий, получивших различного рода повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов, увеличилось по сравнению с предшествующим десятилетием на 42% в Норильске, на 61% в Якутске и на 90% в Амдерме (НАО).

С потеплением климата может также существенно измениться пораженность территорий морозным пучением пород. Сейчас в регионах с низкотемпературными мерзлыми породами интенсивность морозного пучения невелика из-за небольшой глубины сезонного оттаивания и суровой зимы, при которой промерзание сезонноталого слоя происходит быстро, за 1-1,5 месяца. Потепление климата и соответствующее увеличение глубины сезонного оттаивания приведет к увеличению пучения пород, особенно на равнинах с избыточным увлажнением поверхности, на 20-50%.

Если современные тенденции сохранятся, а именно на это указывают теоретические прогнозы климата, опасные геоэкологические последствия деградации вечной мерзлоты будут неизбежны. В результате возможны массовые деформации зданий и сооружений, построенных без учета климатического потепления. Многие факты свидетельствуют о том, что в последние десятилетия деструктивное воздействие криогенных процессов на объекты инфраструктуры в области распространения вечной мерзлоты усилилось. Согласно опубликованным данным, в Западной Сибири ежегодно происходит около 35 тыс. отказов и аварий на нефте- и газопроводах. Причем около 21% всех зафиксированных аварий вызваны механическими воздействиями, в том числе связанными, в том числе связанными с потерей устойчивости фундаментов и деформацией опор.

Для получения количественных оценок изменения параметров вечной мерзлоты применяются математические модели. Расчеты, проведенные с использованием пяти различных долгосрочных прогнозов изменения климата, дали следующие результаты: в ближайшие 25-30 лет площадь вечной мерзлоты может сократиться на 10-18%, а к середине столетия – на 15-30%, при этом ее граница сместится к северо-востоку – на 150-200 километров. Повсеместно увеличится глубина сезонного протаивания, в среднем на 15-25%, а на Арктическом побережье и в отдельных районах Западной Сибири – до 50%ю В западной Сибири (Ямал, Гыдан) температура мерзлых грунтов повысится в среднем на 1,5-20С, с -6…-50С до -4…-30С, и возникнет опасность формирования высокотемпературных мерзлых грунтов даже в районах Арктики. На участках деградации вечной мерзлоты в южной периферийной зоне будет происходить таяние островной мерзлоты.

Поскольку здесь мерзлые толщи обладают небольшой мощностью (от нескольких метров до нескольких десятков метров), за время порядка нескольких десятилетий возможно полное протаивание большей части островной мерзлоты. В наиболее холодной северной зоне, где вечная мерзлота подстилает более 90% поверхности, будет главным образом увеличиваться глубина сезонного протаивания.

Научный потенциал, приобретенный специалистами НПО “Фундаментстройаркос” в процессе работы, обобщение мирового опыта и собственные исследования позволили коллективу НПО создать эффективные, надежные и экономичные устройства, обеспечивающие устойчивость мерзлого состояния грунтов за счет использования естественного холода: горизонтальные трубчатые системы замораживания и температурной стабилизации грунтов -тип “ГЕТ”, вертикальные трубчатые системы замораживания - тип “ВЕТ”, индивидуальные сезоннодействующие охлаждающие устройства - “СОУ- термостабилизаторы” и ряд других.

Использование этих разработок позволяет с наименьшими капиталовложениями на стадии нулевого цикла выполнить фундаменты различных зданий и сооружений и в последующем снизить затраты на их эксплуатацию в экстремальных, с точки зрения геокриологии, природно-климатических условиях Крайнего Севера и восточной части России в целом.

Одной из главных составляющих успешного проектирования оснований и фундаментов является разработка и промышленное применение новых экономичных и надежных технических решений по замораживанию, температурной стабилизации и управлению температурным режимом грунтов оснований с помощью естественного и искусственного холода; использование программ автоматизированного расчета теплового взаимодействия грунтов оснований с системами замораживания, а также зданиями и сооружениями.

В своей работе мы используем современные программные комплексы: FROST-ДК, Termostab, MathCAD, HEAT-3D и другие.

При строительстве новых объектов в зоне ММП, выполнении работ по восстановлению мерзлого состояния грунтов оснований на действующих зданиях и сооружениях, при устранении аварийных ситуаций в период строительства ООО НПО «Фундаментстройаркос» применяет следующие технические решения, касающиеся замораживания и темперной стабилизации грунтов:

1.Система «ГЕТ»;

2.Система «ВЕТ»;

3.Индивидуальные СОУ-термостабилизаторы;

4.Глубинные СОУ;

5.Передвижные холодильные машины с компрессорами без смазки цилиндров.

Применение систем «ГЕТ» позволяет значительно укрупнять объекты, исключать пандусы, сокращать площади застройки и насыпи, применять металлические сваи из стали 10-20 взамен 09Г2С.

Экономическая эффективность применения изложенных технических решений составляет величину от 24 до 61 % от стоимости затрат нулевого цикла при использовании проветриваемых подполий и воздушных каналов.

Огромный комплекс опытно-промышленных испытаний и опытно-промышленных исследований выполняется на специально построенном, уникальном и единственном в России мерзлотном опытно-промышленном полигоне, расположенном в п. Матмасы близ Тюмени.

На полигоне имеются опытно-промышленные экспериментальные установки и системы температурной стабилизации грунтов, выполненные в натуральную величину и служащие для изучения, моделирования, и исследования теплофизических и тепло-гидравлических процессов, протекающих в различных узлах, конструкциях и системах.

Всего построено более двадцати опытно-промышленных экспериментальных установок и каждый год продолжается их новое строительство или модернизация.

Многие установки и системы являются уникальными и единственными в мире.

По поставкам и наладке приборных комплексов мы сотрудничаем с ведущими научно-производственными объединениями «ВЗЛЁТ» (г. Москва), «Эталон» (г. Омск), «Спектр» (г. Энгельс) и т.д.

Большая работа ведется по компьютеризации, автоматизации сбора данных с экспериментальных установок. Планируется в ближайшее время завершить цикл работ по автоматизированному сбору экспериментальных данных с приборов и датчиков, расположенных на узлах и системах, а также в грунте в термометрических скважинах. В помещении операторской будет поступать инфор-



Рисунок 5 - Фото экспериментального опытно-промышленного полигона ООО НПО «Фундаментстройаркос»

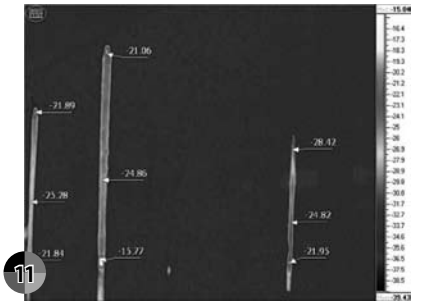




Рисунок 6 - Ванкор. Производственный корпус №2. Тепловизионные исследования термостабилизаторов производства ООО НПО «Фундаментстройаркос»

мация со всех измерительных приборов и обрабатываться непосредственно в лабораторном корпусе операторной.

Ведется работа по численному моделированию процессов теплового взаимодействия зданий и сооружений с грунтами оснований, в том числе с использованием систем термостабилизации грунта типа ВЕТ, ГЕТ, СОУ, ТК.

В исследованиях широко используются программные комплексы HEAT 3D, Mathcad, Frost DK, Termostab и др.

Численное моделирование позволяет в условиях до принятия проектных решений скорректировать и научно-обосновать выбор той или иной системы термостабилизации или замораживания грунта основания.

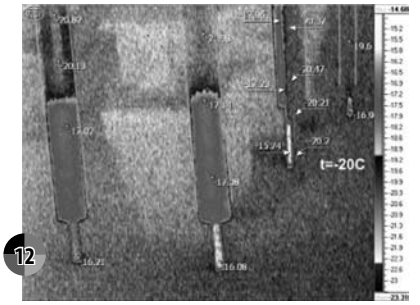




Рисунок 7 - Ванкор. Поз. 66. 1 Парк химических реагентов №1. Тепловизионные исследования термостабилизаторов производства ОАО «Фундаментпроект»

Большой комплекс работ ведется по термостабилизации устья газовых и нефтяных скважин. В настоящее время разработана техника и технология термостабилизации устья скважин, включающая специально разработанный блок-бокс компрессорного агрегата, позволяющего производить работы по замораживанию устья скважин и в летний период времени. Кроме того, проведено численное моделирование процесса и разработаны технические решения с использованием систем ВЕТ.

Большая работа ведется на оптимизации конструктивных элементов систем термостабилизации.

Мы проводим исследования оребренной части термостабилизаторов и конденсаторных блоков, различных производителей. Экспериментальные исследования проводятся с использованием тепловизора.

Проведен большой комплекс исследований по сравнительным экспериментальным исследованиям теплофизических показателей различных конструкций термостабилизаторов и различных заваодов-изготовителей. В результате этих исследований получены результаты, подтверждающие оптимальность и эффективность индивидуальных систем термостабилизации, грунта типа ТК производства ООО НПО «Фундаментстройаркос».

Ведутся наблюдения, обобщение и анализ данных по геокриологическому мониторингу на объектах, построенных ООО НПО «Фундаментстройаркос» другими подрядчиками и на опытно-промышленном полигоне с использованием программ SigmaPlot и Surfer.

В обработке данных геотехнического мониторинга используются современные программные комплексы, а также тепловизионные компьютерные термографы.

Большое внимание уделяется повышению качества выпускаемой продукции, ее надежности, долговечности и безопасной работе.

Для этого ведутся работы по внедрению современных программных комплексов для компьютерного контроля качества заправки систем и контроля сварных швов.

Исследуются новые типы антикоррозионных покрытий, увеличивающих срок службы систем до 30-50 лет.

В своей деятельности мы широко используем инновационные методы исследования, такие как тепловизионная диагностика, которая впервые была внедрена на Ванкорском месторождении на системах СОУ, ГЕТ, ВЕТ, ТК.

Преимущества этого метода очевидны:

-дистанционность,

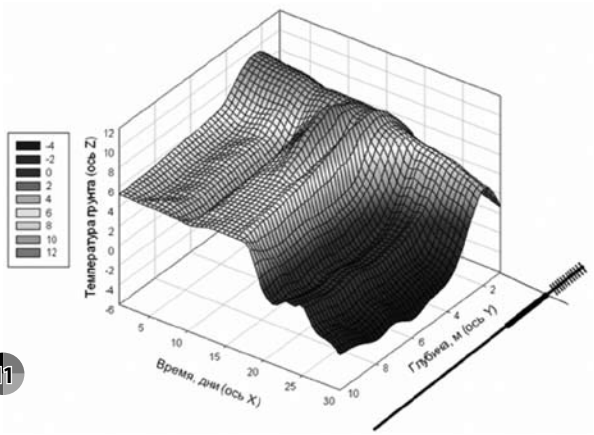
- информативность,

- точность,

-экономичность,

-производительность.

ООО НПО «Фундаментстройаркос» осуществляет научное сотрудничество с научно-исследовательскими институтами и университетами ИКЗ, ТГУ, ТГНГУ, ТюмГАСУ, МГУ, «Фундаментпроект», «ВНИПИгазДобыча», «ТомскНИПИнефть», ВНИИСТ, Гипротрубопровод и др.



11

Рисунок 8 - Поверхность, описывающая изменение температуры вблизи с ТК в термоскважине по глубине с течением времени по результатам геотехнического мониторинга

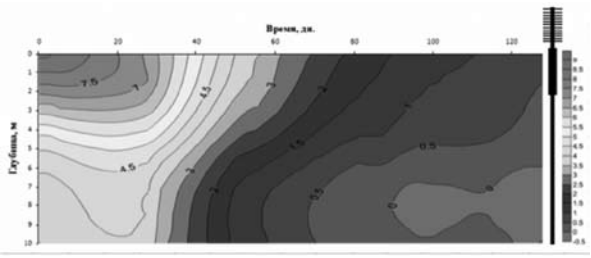


Рисунок 9 – Изменение температуры грунта на расстоянии 0,5 м. от испарителя ТК-3 в период с 21.10.2010 по 28.02.2011 по результатам геотехнического мониторинга

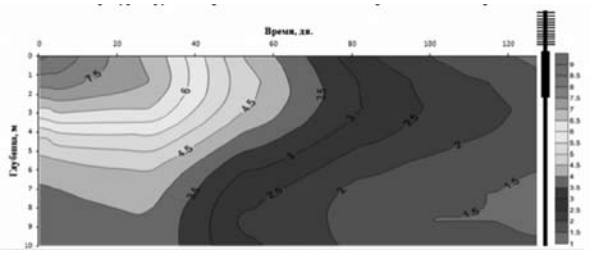
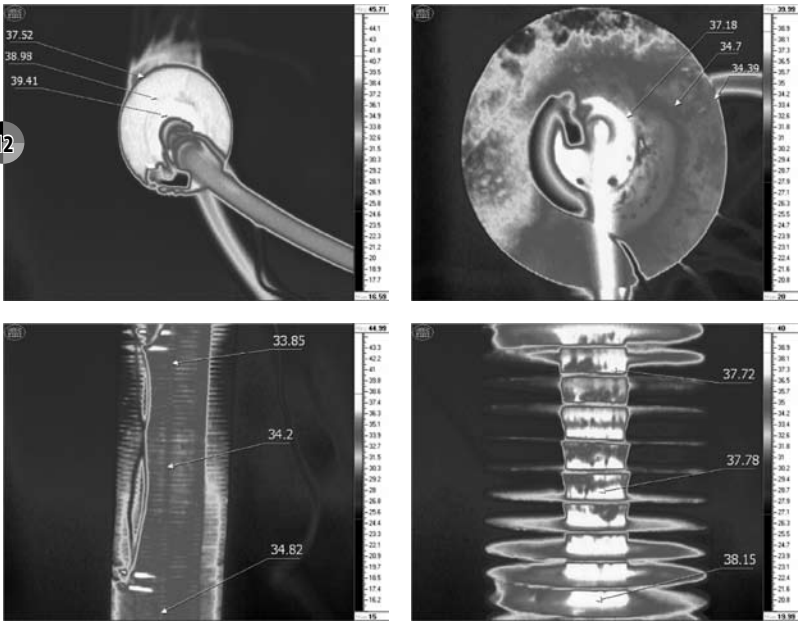


Рисунок 10 – Изменение температуры грунта на расстоянии 1 м. от испарителя ТК-3 в период с 21.10.2010 по 28.02.2011 по результатам геотехнического мониторинга



12

Рисунок 11 - Экспериментальное исследование конденсаторов термостабилизаторов различных производителей с использованием тепловизора

Научные исследования проводят квалифицированные кадры:

Кандидаты и доктора наук, младшие, старшие и ведущие научные сотрудники, многие молодые исследователи учатся в аспирантуре.

Написано и опубликовано около 30 статей и тезисов конференций в центральных научных изданиях.

Принимали участие в более, чем 10 научно-практических конференциях и семинарах: г. Москве, С.-Петербург, Надым, Тюмень, Омск, Мирный и др. Инновационные технические решения внедрены на следующих объектах и месторождениях: Уренгойском НГКМ, Северо-Уренгойском ГМ, Юбилейном ГМ, Ямбургском ГКМ, Заполярном НГКМ, Сандибинском НГКМ, Самбургском НГКМ, Яро-Яхинском НГКМ, Ен-Яхинском НГКМ, Южно-русском ГКМ, Медвежье ГМ, Ям-Совейском ГКМ, Береговом ГМ, Песцовом ГМ, Ванкорском НМ; на объектах железной дороги Обская-Бованенково; поселках Тазовский, Газсале, Яр-Сале, Аксарка, Коротчаево, Катровож в Тюменской области; Хаканджинском ЗСМ – Хабаровский край, Западно-Озерном ГМ на Чукотке, ЗИФ Барун-холба в Республике Бурятия.

Список литературы

1. Долгих Г.М. и др. Надежность, эффективность, и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений./ Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов», 21-24 апреля 2008, Тюмень, с. 34-39.

2. Стрижков С.Н. О необходимости создания строительного технопарка Тюменской области (концепция инновационного технологического центра строительства, архитектуры и управления производством): предпринт.-Спб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2007. – 88с.

3. Стрижков С.Н. Управление инновационной и инвестиционной деятельностью строительных предприятий нефтегазового комплекса. – Спб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2003. – 223с.

4. Стрижков С.Н. Методологические проблемы совершенствования управления инновационной и инвестиционной деятельностью строительных фирм нефтегазового комплекса России. Тюмень: Печатник, 2006. 208 с.

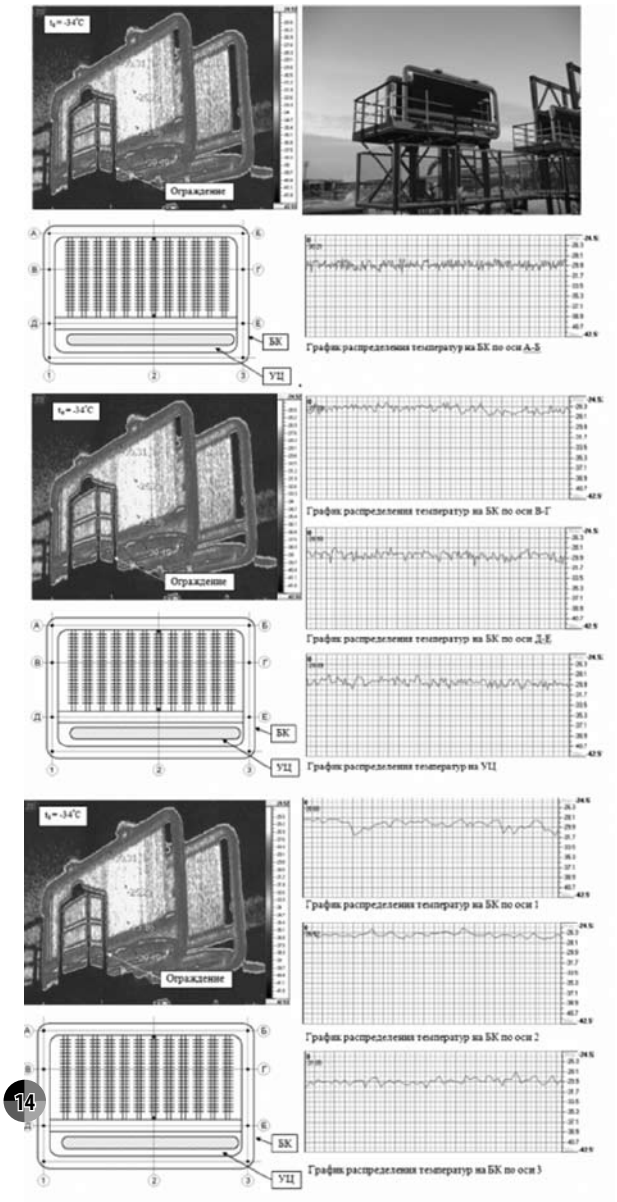


Рисунок 12 - Полная тепловая карта блока конденсации

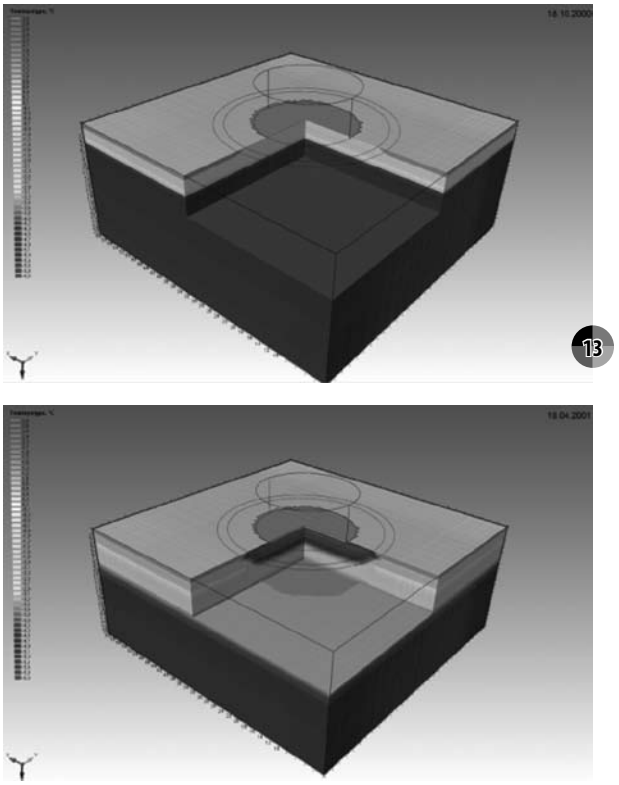


Рисунок 13 - Динамика изменения температурного поля грунта основания РВС-50000 в процессе численного моделирования.

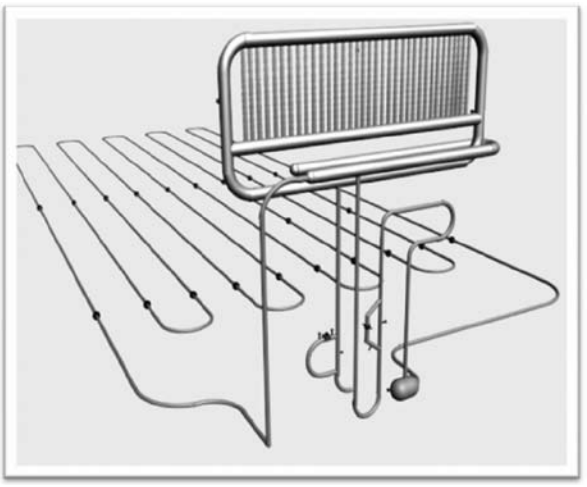
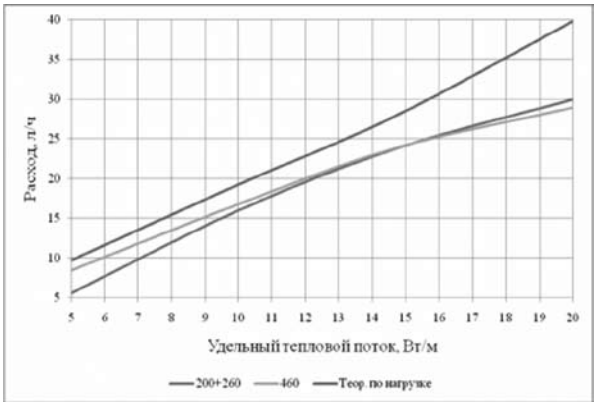


Рисунок 14 – Опытно-промышленная экспериментальная установка ГЕТ-460



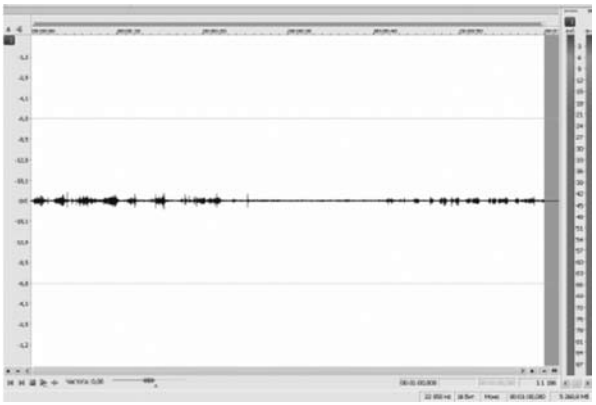


Рисунок 15 – Результаты натурных экспериментальных исследований теплогидравлических параметров ГЕТ-460.

ОБЗОР И АНАЛИЗ УСТРОЙСТ И СИСТЕМ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ И ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ

Н.И. Сидняев[1], П.В. Храпов[1], С.В. Разгуляев[1]

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, г.Москва, e-mail: Sidn_ni@mail.ru

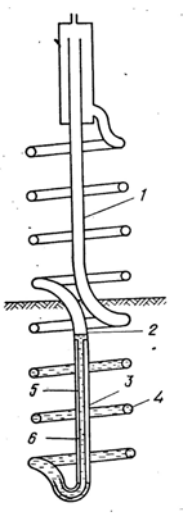
В статье представлен обзор технических устройств для термостабилизации и регулирования температурным режимом вечномерзлых грунтов, оснований зданий и сооружений в криолитозоне. Представленные устройства позволят осуществлять комплексный подход к проектированию и проведению тепловых расчетов грунтов оснований для принятия проектных решений по обеспечению устойчивости и эксплуатационной надежности оснований и фундаментов сооружений в условиях криолитозоны. Результаты обзора предполагается использовать строительными организациями, проектирующих основания и фундаменты, системы термостабилизации грунтов в районах распространения многолетнемерзлых пород.

Введение

Одна из особенностей северных территорий — это суровые климатические условия, где температура опускается ниже 50 градусов по Цельсию, что определило широкое распространение вечномерзлых пород. Их наличие стало причиной чрезвычайно неустойчивой инженерно-геологической среды, которая быстро реагирует на малейшее вмешательство со стороны человека. Вмешательство человека часто было пагубным для природы, поэтому строительство зданий и сооружений в этом районе на вечной мерзлоте породило массу проблем. Грунты под построенными зданиями стали таять, фундаменты проседать, а здания крениться и разрушаться. Опасные мерзлотные процессы негативным образом сказывались на устойчивости инженерных сооружений. Учитывая значительную удаленность и сложную природную обстановку, затраты на обустройство и эксплуатацию северных нефтегазодобывающих объектов существенно возросли. Причем значительная часть средств тратится на обеспечение эксплуатационной надежности инженерных сооружений, устойчивость которых в первую очередь зависит от надежности их фундаментов и оснований. Известно, что стоимость фундаментов в районах распространения вечной мерзлоты может достигать 70% от стоимости всего сооружения. Поэтому практически на протяжении всего периода покорения и освоения Севера инженеры работали над созданием экономичных и надежных фундаментов. При этом стоял вопрос: как сохранить вечную мерзлоту, как сохранить устойчивость фундаментов под уже построенными зданиями и нефтепроводами, как заморозить оттаявшую вечную мерзлоту. Ответить на этот вопрос удается с помощью термостабилизации — искусственного замораживания термостабилизаторами талых и понижения температур мерзлых грунтов в основании сооружений. Для этих целей разработано и серийно выпускаются термостабилизаторы. Так, например, в некоторых термостабилизаторах работа осуществляется без внешних источников питания, только за счет законов физики — переноса тепла вследствие испарения в испарителе хладагента и его поднятия в конденсаторную часть, где пар конденсируется, отдавая тепло, и стекает по внутренним стенкам трубы вниз. Существуют сезоннодействующие термостабилизаторы с одним вертикальным конденсатором, функционирование которого происходит естественным образом в зимний период за счет отрицательных температур воздуха, а в летнее время (при положительных температурах воздуха) переходит в состояние покоя вследствие прекращения циркуляции хладагента. Также, специально для случаев, когда требовалось осуществлять охлаждение грунтов и в летнее время, была разработана модель термостабилизатора круглогодичного действия.

Устройство для охлаждения и замораживания грунта [1].

Описываемое устройство [1] включает заполненные парожидкостным теплоносителем воздушный 1 и грунтовый 2 теплообменники. Грунтовый теплообменник 2 выполнен в виде двухветьевой трубы, одна из ветвей 3 которого выполнена прямолинейной, а другая 4 - спиральной и охватывающей ветвь 3. В грунтовом теплообменнике 2 размещен патрубок 5 так, что в основном он установлен коаксиально в прямолинейной ветви 3, а его нижний конец был изогнут и заведен в спиральную ветвь 4. Зазор между патрубком 5 и стенками трубы ветви 3 заглушен.



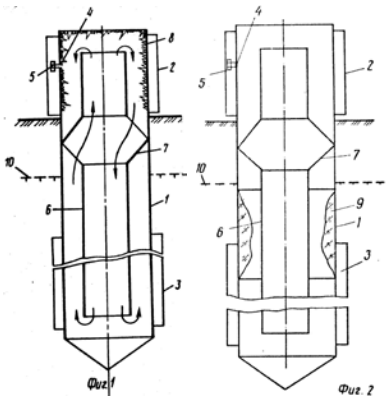
При понижении температуры наружного воздуха ниже температуры грунта в грунтовом теплообменнике 2 происходит испарение или вскипание теплоносителя и пузырьки пара, сливаясь в пробки, перемещаются вверх по спиральной ветви 4, имеющей большую поверхность теплообмена, поступают в воздушный теплообменник 1, где компенсируются, и жидкая фаза теплоносителя по ветви 3 сливается вниз, вновь поступает в ветвь 4, совершая при этом замкнутый цикл циркуляции. При этом зазор 6, образованный патрубком 5 и ветвью 2, выполняет роль емкости - накопителя, в холодное время года зазор заполняется паром

теплоносителя в насыщенном состоянии, а летом - жидким теплоносителем. Пар при избыточном давлении периодически стравливается в ветвь 3, повышая при этом интенсивность циркуляции. Стравливание пара в ветвь 2 предотвращается за счет выполнения нижнего конца патрубка 5 изогнутым и заведения его в ветвь 3. Повышению скорости циркуляции теплоносителя способствует также и выполнение зазором 6, заполненным паром, роли теплоизолирующей прослойки.

Воздушно-конвективная термосвая [2].

На фиг. 1 изображена описываемая термосвая в зимний период, продольный разрез; на фиг.2 - то же, в летний период.

Термосвая содержит герметичный трубчатый корпус 1 с наружным оребрением 2 надземной части, наружным оребрением 3 подземной части и отверстием 4 в наземной части, закрываемым резьбовой пробкой 5. Внутри корпуса установлена циркуляционная труба 6 с переточным устройством 7, выполненная из материала с низкой теплопроводностью, например, из полиэтилена высокого давления.



Фиг. 1

Фиг. 2

Внутренняя полость корпуса заполнена обычным атмосферным воздухом при обычном атмосферном давлении и частично водой из расчета предпочтительно 0,5-1,5 кг на 1 м2 внутренней поверхности надземной части, но не более 5 кг на 1 м2 этой поверхности.

Термосваю погружают на требуемую глубину в грунт, через отверстие 4 заполняют требуемым количеством воды, после чего отверстие герметично закрывают резьбовой пробкой 5.

При заливке воды в установленную термосваю летом вода может замерзнуть в донной части и частично на стенках подземной части. При заливке воды в установленную термосваю зимой вода может частично замерзнуть на стенках надземной, подземной и донной части. В последнем случае, т.е. зимой, надземную часть после заливки воды прогревают с той целью, чтобы вода стекла в подземную часть. Вода может быть залита и при изготовлении термосвай. В этом случае при установке термосваи зимой надземную часть также прогревают с аналогичной целью.

Независимо от того, в каком качестве и в каком месте подземной части находится залитая вода, в зимнее время она испаряется (сублимируется) в циркуляционный поток воздуха и осаждается из этого потока на наиболее холодных участках, т.е. на внутренней поверхности надземной части корпуса.

Такой перенос влаги происходит в результате ненасыщенного состояния циркулирующего воздуха относительно температуры воздуха относительно температуры подземной части и пересыщенного состояния относительно температуры надземной части. В связи с тем, что это пересыщение незначительно, на так называемых «активных» центрах, обладающих повышенной поверхностной энергией, происходит образование кристаллов льда и их прирост.

На металлической поверхности такими центрами являются мельчайшие выступы естественной шероховатости, на которых и образуются «зародышевые» кристаллы. Дальнейший рост этих «зародышей» происходит при существенном меньшем пересыщении, чем образование новых «зародышей». Поэтому на стенке образуется не сплошная ледяная корка, а отдельные, рядом лежащие кристаллы, поскольку поверхность имеет, как правило, регулярную структуру. Эти кристаллы также растут преимущественно за счет своих «активных» центров, каковыми являются их вершины. Поэтому в результате образуется игольчатая структура 8, существенно уменьшая термическое сопротивление со стороны внутренней поверхности надземной части.

В летнее время циркуляция воздуха прекращается, корпус 1 надземной части термосваи нагревается и ледяные кристаллы начинают таять. Образующаяся вода стекает по стенке корпуса в подземную часть и замерзает на ней в виде ледяной корки 9, размещенной ниже границы деятельного слоя 10 вечномерзлых грунтов.

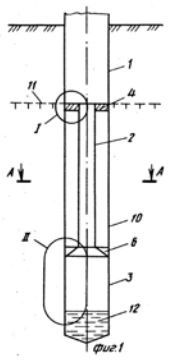
В начале очередного зимнего периода ледяная корка вновь сублимируется в восходящий поток цикрулирующего воздуха и вновь осаждается на внутренней поверхности надземной части корпуса, повторяя прежнюю игольчатую структуру 8 с развитой поверхностью контакта с теплоносителем.

Термосвая [3].

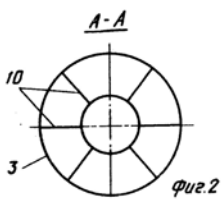
На фиг. 1 изображена описываемая термосвая, продольный разрез; на фиг.2 - разрез А-А на фиг.1; на фиг.3 - узел I на фиг.1; на фиг.4 - узел II на фиг.1.

Термосвая содержит трубчатый корпус, состоящий из трех последовательно соединенных секций 1, 2 и 3. Верхняя секция 1 и нижняя секция 3 имеют одинаковый диаметр. Диаметр средней секции 2 меньше диаметра смежных секций в 2-3 раза. Высота нижней секции 3 равна 0,3-0,5 высоты средней секции 2 (обычно заглубленная часть несущих термосвай составляет 4-8 мм, при этом нижний предел с учетом относительной эффективности должен использоваться для длинных термосвай, верхний для коротких). Средняя секция 2 соединена с верхней при помощи кольца 4 и имеет на этом стыке распределитель 5 жидкой фазы теплоносителя, выполненный, например, в

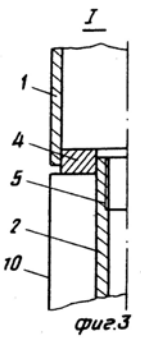
виде многозаходной резьбы на внутренней поверхности средней секции 2 с длиной нарезки, равной 1-2 шагам резьбы.



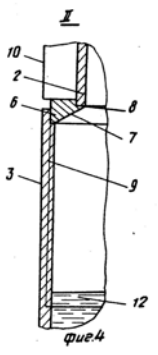
Фиг.1



Фиг.2



Фиг.3



Фиг.4

Нижняя секция 3 соединена со средней при помощи кольца 6, имеющего внутреннюю коническую поверхность 7, угол конусности которой ≤ 120о. Коническая поверхность 7 при помощи поверхности 8 плавно сопрягается с внутренней поверхностью средней секции 2. На верхней части внутренней поверхности нижней секции 3 выполнена резьба 9, соприкасающаяся в рабочем состоянии с донной жидкой фазой теплоносителя (донная жидкость).

Средняя секция 2 имеет наружное оребрение 10, обеспечивающее равнопрочность корпуса термосваи.

Термосвая заглублена в грунт таким образом, что нижний торец верхней секции 1 располагает на уровне деятельного слоя 11.

В зимний период пары теплоносителя конденсируется в надземной части корпуса термосваи и образующаяся при конденсации жидкость стекает к распределителю 5. Распределитель 5 выравнивает жидкую пленку по периметру внутренней поверхности средней секции 2. Жидкая пленка полностью смачивает эту поверхность, так как, во-первых, она имеет существенно меньший диаметр и, во-вторых, существует транзитный поток жидкости в этой пленке, оставшийся от ее испарения на этой поверхности.

Этот транзитный поток с внутренней поверхности средней секции 2 по сопряженной с ней поверхности 8 и конической поверхности соединительного кольца 4 стекает на резьбу 9 нижней секции 3 и по винтовой поверхности этой резьбы стекает в донную жидкость 12. При течении пленки по поверхностям 8 и 7 и резьбе 9 жидкость непрерывно испаряется из этой пленки. При этом указанные поверхности принудительно полностью смачиваются независимо от толщины пленки.

В зимний период пары теплоносителя конденсируется в надземной части корпуса термосваи и образующаяся при конденсации жидкость стекает к распределителю 5. Распределитель 5 выравнивает жидкую пленку по периметру внутренней поверхности средней секции 2. Жидкая пленка полностью смачивает эту поверхность, так как, во-первых, она имеет существенно меньший диаметр и, во-вторых, существует транзитный поток жидкости в этой пленке, оставшийся от ее испарения на этой поверхности.

Этот транзитный поток с внутренней поверхности средней секции 2 по сопряженной с ней поверхности 8 и конической поверхности соединительного кольца 4 стекает на резьбу 9 нижней секции 3 и по винтовой поверхности этой резьбы стекает в донную жидкость 12. При течении пленки по поверхностям 8 и 7 и резьбе 9 жидкость непрерывно испаряется из этой пленки. При этом указанные поверхности принудительно полностью смачиваются независимо от толщины пленки. Поверхности 8 и 7 смачиваются полностью по следующим причинам: по причине естественной спиральной шероховатости, образующейся в результате механической обработки и способствующей смачиванию; по причине наличия транзитного потока жидкости, стекающей на резьбу 9 и составляющей 30-40% от потока, поступающего на распределитель 5. Резьба 9 смочена полностью потому, что жидкость вынуждена стекать по ее винтовой поверхности вплоть до уровня донной жидкости 12. В донную жидкость 12 стекает такое количество жидкости, какое испаряется с ее верхней поверхности. Сама донная жидкость 12 при этом находится в движении. Слои жидкости 12, прилегающие к внутренней цилиндрической поверхности секции 3, нагреваются от нее и поднимаются на поверхность. На поверхности они охлаждаются на счет испарения и по оси корпуса опускаются, образуя таким образом замкнутый торообразный поток, передающий тепло от грунта путем естественной конвекции донной жидкости.

Поскольку вся поверхность нижней секции 3, прилегающей к донной жидкости 12, принудительно смочена стекающей пленкой и охлаждается за счет ее испарения, охлаждающее действие донной жидкости распространяется только на прилегающую к ней область грунта и становится таким же эффективным, как и охлаждающее действие тех участков, которые смочены стекающей пленкой.

Таким образом, вся поверхность подземной части термосваи интенсивно участвует в охлаждении грунта, однако удельные тепловые потоки к секциям 2 и 3 неодинаковы.

В нижней секции 3, кроме грунта, распространяющегося в радиальном направлении, прилегают глубинные слои грунта, которые также необходимо охладить, чтобы предотвратить возникновение с их стороны летних отепляющих потоков через термосваю. Эти глубинные слои охлаждаются за счет восходящего теплового потока к слоям грунта, охлаждаемого нижней секцией 3, поэтому удельный тепловой поток к нижней секции 3 должен быть больше, чем к средней секции 2. Эта задача в зимнее время и выполняется за счет разницы в диаметрах секций 2 и 3 с учетом отсутствия

«сухого» участка в секции 3.

С наступлением летнего периода аккумулированный в грунте холод начинает рассеиваться по радиусу от термосваи, а также вверх и вниз от охлажденной зоны грунта, однако сама термосвая в этом процессе не участвует (кроме металла корпуса).

Конвективные отепляющие потоки перегретого пара замыкаются в верхней секции 1 и не проникают в среднюю секцию 2 из-за существенной разницы их диаметров. Линии тока нижнего тора в верхней секции 1 вблизи отверстия средней секции 2 поворачивают на 90о и образуют застойную зону на уровне верхнего торца средней секции 2.

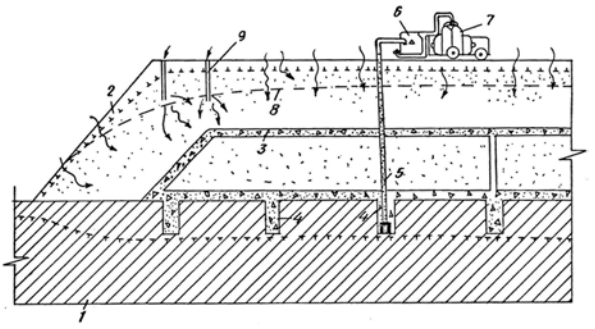
Парожидкостная отепляющая конвекция со стороны нижней секции 3 исключена, как указано выше, опережающим охлаждением грунта этой секции в зимний период, поэтому остаются только отепляющие потоки через металл корпуса. Но эти потоки на порядок меньше конвективных, так как основная часть тепла, поступающего от нагретой выступающей из грунта части корпуса, рассеивается в деятельном слое. Кроме решения чисто теплотехнической задачи, уменьшенный диаметр средней секции 2 обеспечивает наличие грунта между ребрами 10 на этом участке, в связи с чем сдвиг под нагрузкой наблюдается не по поверхности смерзания, а грунта по грунту на диаметре радиальных торцов ребер 10, равном диаметру секций 1 и 3, поэтому несущая способность термосваи возрастает не только за счет понижения температуры грунта, но и за счет изменения характера сопротивления этого грунта приложенной к нему нагрузке.

Способ замораживания грунтовых сооружений, возводимых навечномерзлых грунтах [4].

На чертеже изображено грунтовое сооружение, замораживаемое описываемым способом.

Описываемый способ осуществляют следующим образом.

На подстилающих многолетнемерзлых грунтах 1 до начала возведения грунтового сооружения 2 подготавливают дренажную систему, состоящую из слоев 3 хорошо дренирующего материала, причем нижний слой укладывают на поверхности подстилающих грунтов и выполняют с вертикальными дренами 4. Вертикальные дрены размещают в зоне сезонного оттаивания подстилаемого грунта на глубину прогнозируемого протаивания. При послойном возведении сооружения 2 системы может иметь один или несколько сообщающихся слоев 3, в зависимости от толщины грунтового массива и характеристик его проницаемости при обезвоживании и конвективном охлаждении холодным воздухом. Дренажную систему выполняют из материала с более высоким, чему замораживаемого грунта, коэффициентом фильтрации.



К дренажной системе, желательно в нижней части вертикальных дрен 4, подключают нижний конец трубы 5, присоединяемой к приемной камере 6 воздушно-водяного насоса 7. Трубы 5 устанавливают либо до начала возведения сооружения 2 в случае его гидронамыва, либо после его возведения через пробуриваемые для этого скважины.

После наступления устойчивой отрицательной температуры воздуха трубу 5 подключают к насосу для откачки воды и отсоса воздуха и начинают откачку. К этому времени уровень депрессивной поверхности в грунтовом сооружении, если он был обводнен или если он был возведен способом гидронамыва, занимает положение 8. После начала откачки уровень депрессионной кривой быстро понижается до уровня расположения нижнего уровня всасывающей трубы 5. Причем, вследствие того, что разрежение создается во всей дренажной системе, обезвоживание грунтового массива происходит относительно равномерно по всему объему без крутого падения поверхности депрессии к устью всасывающей трубы, что наблюдалось бы, если бы не было дренажной системы.

Одновременно с началом откачки начинается проникновение холодного воздуха с поверхности внутрь грунтового сооружения. По мере понижения депрессионной поверхности, освобождающиеся от воды поры заполняются холодным наружным воздухом, а после обезвоживания грунтового массива, то есть после понижения поверхности депрессии до уровня нижнего конца трубы 5, начинается вентиляция пор воздухом, проникающим с поверхности и отсасываемым из дренажной системы через трубу 5 насосом 7. Отсос воздуха продолжают до тех пор, пока температура охлаждаемого грунтового массива не понизится до заданной в контролируемых точках массива. Пространство между стенками скважины и трубой 5 тампонируют, чтобы воздух не проникал через щели в дренажную систему, минуя грунтовый массив.

Способ аккумуляции холода в грунте основания [5].

Изобретение относится к области строительства сооружений, возводимых в зоне распространения вечномерзлых грунтов, и касается способа аккумуляции холода в грунте основания.

Целью изобретения является повышение эффективности способа.

Аккумуляция холода в грунте основания по описываемому способу осуществляется путем его

поверхностного промораживания. При этом перед началом промораживания осушают поверхностный слой грунта в пределах деятельного слоя, в результате чего изменяются теплофизические свойства грунта. В основном это касается скрытых теплот при фазовых переходах свободной воды. При отсутствии скрытых теплот потоки холода быстрее проникают в толщу грунта и способствуют понижению его температуры. Существенное влияние на температурный режим оказывает также разность коэффициентов температуропроводности для талого и мерзлого состояния грунта. Эта разность гораздо выше во влажном грунте, чем в сухом. Осушение производят различными известными методами: устройством водоотводных каналов, дренажей и др. Осушение возможно рассматривать несколько шире: устройство подсыпок из сухого грунта, замена поверхностного слоя грунта другим грунтом или иным материалом, являющимся, например, частью фундамента конструкции. С целью повышения эффективности аккумуляции холода производят защиту поверхности от дождя путем устройства навеса, гидроизоляции, обеспечения стока поверхностных вод. Для районов с сухим, жарким летом предохранение от дождевых вод не обязательно.

Область применения данного способа определяется зоной распространения вечномерзлых грунтов, причем он может быть успешно применен как для аккумуляции холода в основаниях отдельных сооружений, так и целых поселков. Эффективность способа определяется достижением более низкой температуры грунта оснований при прочих равных условиях.

Формула изобретения: способ аккумуляции холода в грунте основания путем его поверхностного замораживания, отличающийся тем, что с целью повышения эффективности способа, перед началом промораживания осуществляют осушение грунта в пределах его деятельного слоя.

Устройство для аккумуляции холода в грунтах [6].

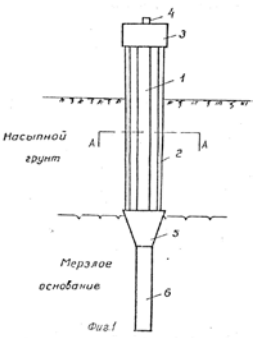
На фиг.1 показан фасад предлагаемого устройства; на фиг.2 - разрез А-А на фиг.1.

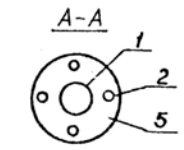
Устройство содержит центральную вертикальную трубу 1 для восходящего потока, периферийные трубы 2 малого диаметра для нисходящего потока, расширитель 3, представляющий из себя отрезок трубы большого диаметра, имеющий днище с отверстиями для ввода в него всех труб снизу, и крышку с завинчивающейся пробкой 4. В нижней части все трубы герметично введены в крышку расширяющегося кверху торца 5 прямолинейного патрубка 6 с заглушенным нижним его концом.

Отверстие трубы 6 подбирается равным сумме диаметров отверстий - трубы 1 восходящего и труб 2 нисходящего потоков.

Устройство размещают нижней его однотрубной частью в пробуренную в мерзлом грунте скважину.

В заполненном теплоносителем (керосином) устройстве зимой в трубах малого диаметра керосин быстро охлаждается, увеличивает свой объемный вес, в результате чего происходит циркуляция керосина в многотрубной системе. Движение керосина характеризуется ламинарным потоком, направленным в тонких трубах вниз, в толстой (центральной) трубе - вверх. В нижней однотрубной части системы происходит конвекция керосина, обеспечивающая теплосъем в мерзлом основании, что сохраняет основание в твердомерзлом состоянии.





Фиг.2

Устройство для охлаждения грунта [7].

На фиг.1 показано устройство в холодный период года, поперечный разрез; на фиг.2 то же, в теплое время года для случая, когда высота сегмента равна нулю и соответственно нижняя, верхняя и промежуточная части струераспределительной системы сливаются в одну плоскость.

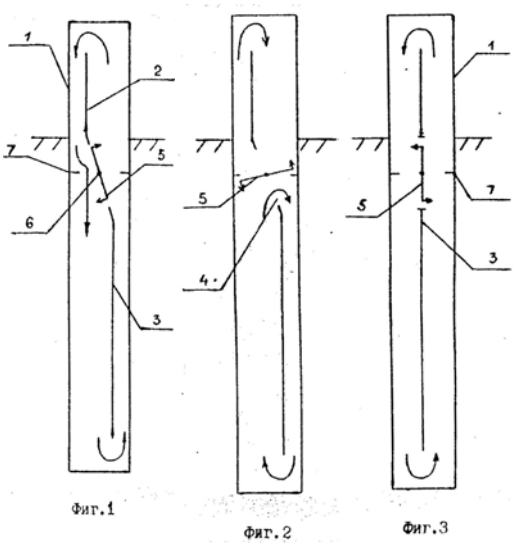
Устройство для охлаждения грунта включает в себя заполненный теплоносителем трубчатый корпус 1, струераспределительную систему, состоящую из верхней 2 и нижней 3 сегментных диафрагм, соединенных промежуточной диафрагмой. Последняя снабжена круглым отверстием 4 с круглой заслонкой 5, закрепленной с возможностью поворота на горизонтальном стержне 6, который размещен по центру тяжести заслонки и ориентирован по диаметру отверстия 4. На стенках корпуса в одной горизонтальной плоскости размещены ограничительные упоры 7. Стрелки на заслонке указывают направления, в которых может перемещаться заслонка, стрелки в пространстве корпуса направления циркуляции теплоносителя.

Устройство работает следующим образом.

В холодное время года (в надземной) части устройства холоднее, чем в нижней. Кроме того, в верхней его части в «узкой» половине и в нижней в «широкой» холоднее, чем по другую сторону струераспределителя. Поэтому обеспечивается направленная циркуляция в сторону, показанная стрелками на фиг. 1.

Под давлением потока теплоносителя заслонка 5 принимает положение, показанное на фиг.1 - отверстие 4 закрыто.

В теплое время года холоднее в подземной части устройства и теплоноситель здесь плотнее, поэтому его циркуляция здесь плотнее, поэтому его циркуляция возникает только за счет разни-

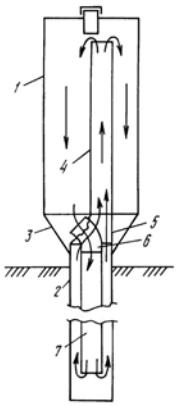


цы горизонтальных градиентов температуры, которые по сравнению с холодным периодом меняются на противоположные (фиг. 2). Изменение знака горизонтальных градиентов вызвано тем, что вверху теплее в «узкой» части (она раньше нагревается), а внизу в «широкой» («узкая» часть охлаждается раньше, так как «холодильником» летом является подземная часть устройства). Поэтому при отсутствии отверстия 4 (или его закрытом положении) в теплое время теплоноситель циркулирует, хотя и в значительно с меньшей скоростью в направлении, противоположном, показанному стрелками на фиг.1. При открытом отверстии 4 (фиг.2), разделенном заслонкой 5 горизонтально на верхнюю и нижнюю части, поток теплоносителя под влиянием горизонтальных градиентов плотности (в вертикальном направлении имеет место устойчивая стратификация и естественная тенденция к вертикальному перемещению теплоносителя отсутствует) разделяется на два контура - верхний и нижний. Перемешивания, теплого и холодного потоков не происходит и практически не происходит нагрева грунта. При этом заслонка 5 отверстия 4 открывается автоматически под давлением теплоносителя поворотом на стержне 6 до упора 7 (фиг.2).

После того, как температура воздуха вновь станет ниже температуры грунта, направление потока теплоносителя установится таким, как показано на фиг. 1. Под давлением вертикальных потоков хладоносителя заслонка 5 закроет отверстие 4.

Термосифон [8].

На чертеже изображена схема термосифона.



Термосифон содержит наружную трубу 1 теплообменника, соединенную с наружной трубой 2 колонки концентрическим переходом 3, и внутреннюю трубу 4 теплообменника, соединенную эксцентрическим переходом 5 с наружной трубой 2 колонки. В наклонную образующую эксцентрического перехода вварен отвод 6 под углом 30о, соединяющий кольцевое пространство теплообменника с внутренней трубой 7 колонки. Диаметры внутренних труб теплооб- менника 4 и колонки 7 равны.

Термосифон работает следующим образом (стрелками показано направление восходящего и нисходящего потоков жид- кости).

Охлажденный теплоноситель за счет большей плотности из кольцевого пространства теплообменника поступает через отвод 6 во внутреннюю трубу 7 колонки. У дна колонки теплоноситель вытекает из внутренней трубы колонки в кольцевое пространство колонки и поднимается по нему, отбирая тепло через поверхность наружной трубы 2 колонки, к теплообменнику, где по эксцентрическому переходу 5 поступает во внутреннюю трубу 4 теплообменника, изливаясь в верхней части в кольцевое пространство теплообменника. Через поверхность наружной трубы 1 теплообменника теплоноситель охлаждается и опускается вниз в концентрический переход 3, втекает в отвод 6, и цикл повторяется.

Устройство для охлаждения и противоэрозионной защиты от атмосферных осадков грунтового основания зданий [9].

На фиг. 1 изображено устройство для охлаждения и противоэрозионной защиты от атмосферных осадков грунтового основания зданий; на фиг. 2 - разрез А-А на фиг. 1; на фиг. 3 - поворотно-запорный механизм.

Устройство для охлаждения и противоэрозионной защиты от атмосферных осадков грунтового основания зданий включает в себя воздуховодные каналы, размещенные соответственно вокруг здания и внутри его, которые объединены в сплошную открытую снизу и перекрытую сверху теплоизолированным цокольным перекрытием здания камеру, за пределами здания камера перекрыта покрытием-экраном 1 из непрозрачного преимущественно белого, гладкого или профилированного стеклопластика или пластмассы с образованием между слоями воздушных прослоек 2. Покрытие размещено на каркасе 3, к которому для усиления в средней части прикрепляются стойки 4 крепежными элементами 5.

Каналы выполнены из открытых снизу секций. Верх канала каждой секции за пределами здания должен быть выгнутым к середине и иметь желоб 6 для стока по нему жидких атмосферных осадков. На краях секции вдоль длинной оси устраиваются водосливные канальчики с выпуском за габариты камеры для создания непрерывного потока воды за пределами защищаемой от осадков площадки. В средней части боковых поверхностей секции устраиваются элементы 8 для их соеди-

нения и плотного прилегания друг к другу.

Вдоль коротких осей секций на одном из краев устраивают по 2 всасывающих прямоугольных канала в виде вертикальной части экрана, в верху которых внутри на горизонтальном стержне 9 находится крышка-клапан 10, располагающаяся вертикально зимой, что допускает всасывание воздуха, а летом отверстие всасывающего канала перекрывается горизонтально этой крышкой-клапаном. Это выполняется вручную или при помощи автоматического поворотного устройства, прикрепляемого к узкой стенке всасывающего канала. Над нижней частью засасывающего прямоугольного канала с помощью крепления 11 надстраивают круглую трубу 12 из белого материала с прорезями для кольцевого напорного сужающегося к внутренней стенке ветрозахвата 13, направляющего струи воздуха вниз. Над трубой 12 на тонких стойках 14 подвешивают крышку 15 для защиты от попадания атмосферных осадков. Та часть всасывающей трубы, на которой имеются напорные ветрозахваты с трубами вниз, должна всегда находиться выше снежной поверхности.

Воздуховыводящая часть из многослойного сплошного горизонтального экрана в виде прямоугольного отверстия располагается под центром здания 19 со свайным основанием 25, а затем идет под цокольным перекрытием с теплоизоляционным слоем 20.

На воздуховыводящие прямоугольные трубы в обязательном порядке надставляют круглые трубы 16 из материала черного цвета с прорезями для установки кольцевых ветрозахватов 17, направляющих при помощи сужающих трубок поток воздуха вверх под ветровым напором. Круглые воздуховыводящие трубы оканчиваются дефлекторами 18.

Для достижения циркулирующим воздухом центра площадки и отъема им грунтового тепла под зданием в подполье устраивается перемычка 21 из любого воздухонепроницаемого материала, которая удерживается подвесками 27, прикрепленными к цокольному перекрытию.

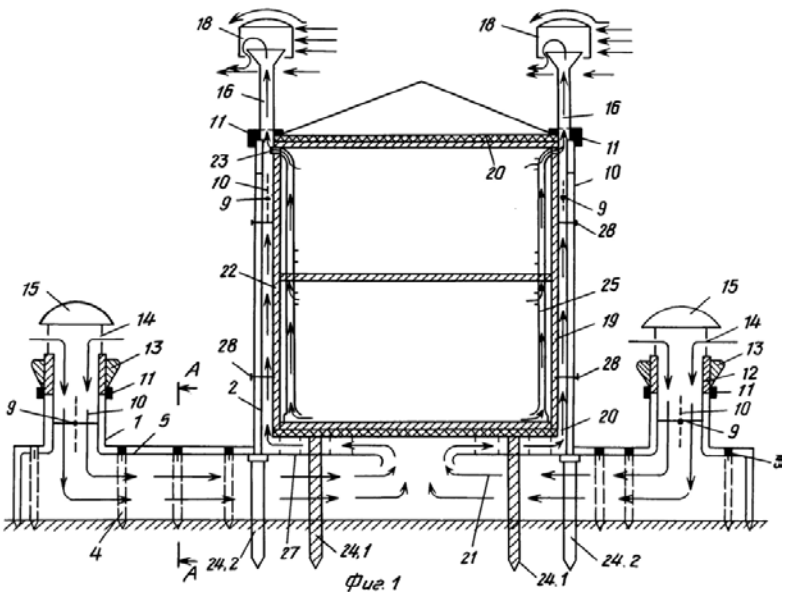
Из подполья воздух выходит по экрану в виде плоских труб высотой до потолка последнего этажа (количество которых определяется расчетом) и дополнительно нагревается от стен здания. Вертикальная часть экранных труб вдоль стен здания крепится болтами-стяжками 28 и опирается на сваи 24.1 и 24.2.

Из помещений здания по системе естественной вытяжной вентиляции 22 в верхнюю часть экрана-воздухоотвода поступает через отверстие под потолком верхнего этажа 23 теплый воздух, создавая дополнительную тягу к уже имеющимся механизмам. Над общим отверстием вытяжного канала из экрана и естественной вентиляции здания устанавливается черная труба 16, оканчивающаяся дефлектором 18. Это дает еще одну тягу для воздуха через экран и подполье под зданием. Благодаря такому многофакторному механизму зимой обеспечивается непрерывная направленная циркуляция воздуха с температурой, равной на входе температуре приземной атмосферы.

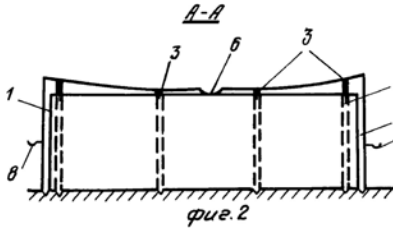
Летом как входной, так и выходной каналы для воздуха перекрываются перегородками 10, благодаря действию автоматического поворотного устройства. Расчеты и опыты показывают, что под такой системой теплообмена и теплозащиты среднегодовая температура грунтов оснований оказывается на 3-5оС ниже средней годовой температуры воздуха, а сезонное простаивание сокращается до 0,3-0,5 м.

Так как такой эффект достигается, в частности, благодаря исключению вентиляции воздуха под экраном летом, то приводим описание автоматического поворотного устройства, работающего за счет природных ресурсов.

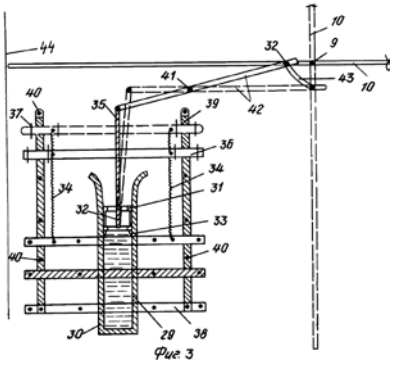
Автоматическое поворотное устройство состоит из гидрофобного материала с уширением в верхней части 29, заполненного водой 30, запасы которой в теплый период пополняются из атмосферы. В цилиндрике расчетной длины располагается поршень 31 с небольшими отверстиями 32



Фиг. 1



фиг. 2



Фиг. 3

сбоку для притока воды под него. Под поршнем снизу находится ограничитель в виде утолщения стенки 33, не позволяющий стягивающим пружинам 34 осаждать его ниже заданного уровня. Поршень 31 связан через шарнир с негнущимся вертикальным стержнем 35, который в свою очередь связан с подвижным вверх и вправо (влево) горизонтальным негнущимся стержнем 36, имеющим ограничители 37. Горизонтальный подвижный стержень 36 жестко связан со стягивающими пружинами 34, которые другим концом жестко закреплены с рамкой 38. В верхней части рамки имеются отверстия 39 для свободного хода вверх-вниз и вправо-влево стержня 37.

Стержень 35 через шарнирное устройство связан с рычагом 42, жестко насаженным на болт 41, который длинным плечом также шарнирно завязан с болтом 32, встроенным наглухо в крышку-клапан 9.

Болт 32 выходит наружу из всасывающего канала или воздуховыводящего канала через отверстие 43, по которому он передвигается в течение года. Все поворотное устройство крепится к вытяжному или входному каналам болтами 40.

В летний период положение всех работающих частей поворотного устройства обозначено сплошной линией, в зимний прерывистой.

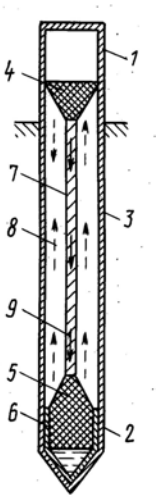
Устройство работает следующим образом.

После замерзания воды 30 в цилиндре 29 лед расширяется, и занимает больший объем, благодаря отсутствию связи со стенками цилиндра. Благодаря гидрофобности материала цилиндра 29, поршень 31 перемещается в верхнее положение, а вслед за ним через систему стержня 35 и рычага 42, и болт 32, крышка-клапан 10 занимает вертикальное положение, позволяя воздуху свободно поступать под экран 1. Летом лед растаивает, вследствие чего пружины 34 возвращают поршень 31 и всю систему поворотного устройства в летнее состояние, когда крышка-клапан занимает горизонтальное положение и закрывает отверстие всасывающего и воздуховыводящего каналов. Испарившаяся вода к концу лета снова заполняет весь цилиндр и цикл снова повторяется. Избыток воды, скопившиеся выше поршня, при замерзании выталкивается из цилиндра и падает вниз. Предлагаемые технические решения могут обеспечить устойчивую во времени эксплуатацию зданий и сооружений в умеренной и полярной климатической зонах, там, где они запроектированы по первому принципу в области вечной мерзлоты, или при их помощи можно создавать искусственную вечную мерзлоту и переводить функционирование природных и техногенных ландшафтов из режима протаивания грунтов в режим появления многолетних устойчивых вечномерзлых грунтов. В связи с наблюдающимся и возможным потеплением климата изобретение может найти самое широкое применение.

Способ аккумуляции холода в грунте [10].

Предлагаемый способ включает последовательное активное и пассивное замораживание грунта и состоит из следующих операций. При активном замораживании: размещение в грунте двухтрубных коаксиальных колонок; соединение замораживающих и питающих труб соответственно с коллектором и распределителем; подключение для вынужденной циркуляции хладагента коллектора к калориферу (радиатору) с вентилятором и насоса нагнетающего хладагент из калорифера в распределитель; заполнение всей жидкостной замораживающей системы хладагентом, например керосином. При пассивном замораживании: извлечение из двухтрубных коаксиальных колонок питающих труб; наращивание замораживающих труб трубами того же диаметра для естественной циркуляции хладагента; заполнение однотрубных колонок хладагентом и плотное закрытие их крышками.

С появлением отрицательных температур воздуха начинается циркуляции хладагента по жидкостной замораживающей системе насосом и включается вентилятор, в результате чего начинается аккумулирование холода в грунте. При наступлении весны выключаются насос и вентилятор и прекращается аккумулирование холода в грунте. В летний период происходит повышение температуры замороженного грунта, однако к началу следующей зимы его температура будет ниже начальной (естественной) температуры, поскольку в Северных районах длительность летнего периода значительно меньше зимнего.



После интенсивной аккумуляции холода за 1-2 сезона работы жидкостной замораживающей системы внутренние трубы в колонках вынимаются и к заглубленным внешним трубам присоединяются сверху трубы того же диаметра с плотно закрывающими крышками, через которые доливается хладагент. Демонтируются коллектор, калорифер с вентилятором и распределитель с насосом.

Переделанные таким образом составные трубы аккумулируют холод в грунте в холодные периоды года по принципу естественной конвекции, восполняя в грунте утерянный холод летом.

Устройство для замораживания грунта [11].

На рисунке изображен общий вид устройства, которое содержит воздушный теплообменник 1, грунтовый теплообменник 2, соединительный теплопровод 3, сетчатый конденсатосборник 4, сетчатый рассеиватель 5 с поддоном 6 и конденсатопровод 7, выполненный в виде гибкого фильтрующего шнура, пары теплоно-

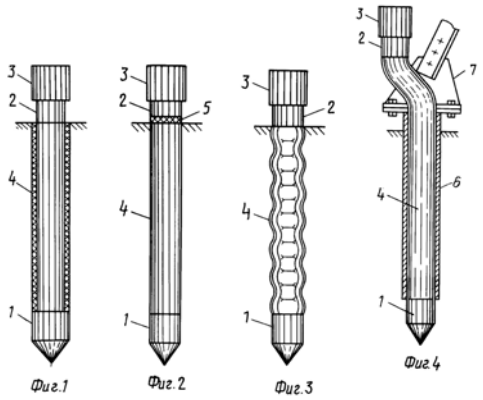
сителя 8 и конденсат теплоносителя 9.

При испарении теплоносителя, находящегося в поддоне 6, пары теплоносителя, поднимаясь по внутренней полости тепло провода 3, как показано пунктирными стрелками, проникают сквозь сетчатый конденсатосборник 4 и, охлаждаясь, конденсируются на стенках воздушного теплообменника 1. Затем конденсат стекает по сетке конденсатосборника 4 и впитывается гигроскопическим материалом конденсатопровода 7, по которому фильтруется, как показано сплошными стрелками, в рассеиватель 5 и скапливается в поддоне 6.

Устройство для охлаждения и замораживания грунта [12].

На фиг. 1 - 3 изображен общий вид устройства для охлаждения и замораживания грунта в различных вариантах исполнения; на фиг. 4 - вариант использования термоустройства со свайным фундаментом 6 опоры линии электропередачи 7.

Устройство содержит грунтовый теплообменник 1, воздушный теплообменник 2 с ребрами 3, теплопровод 4, тепловой разъем, выполненный в виде теплоизоляционной прокладки 5.



При наличии теплоизоляционного покрытия теплопровода 4, как показано на фиг. 1, устраняются тепловые потери на пути между теплообменниками 1 и 2 и рассеивание теплового потока в слоях грунта, расположенных выше зоны мелиорации. Это позволяет эффективно осуществлять избирательную локальную термомелиорацию в зоне размещения теплообменника 1.

Наличие теплового разъема 5 (см. фиг. 2) исключает теплообмен между теплообменниками 1 и 2 через корпус теплопровода 4, что предотвращает перенос тепла из внешней среды (атмосферы) в зону термомелиорации в летний период и обеспечивает поддержание в зоне низкой температуры, аккумулированной в течении зимнего сезона.

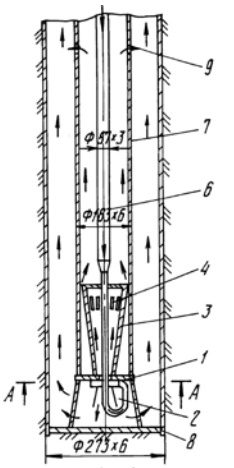
Установка для замораживания грунта [13].

На фиг. 1 изображена предлагаемая установка; на фиг. 2 - разрез А-А на фиг. 1.

Установка включает вихревой охладитель 1, отвод 2 холодного потока, камеру 3 расширения вихревого охладителя, отверстия 4 для выхода части потока из камеры расширения, улитку 5, трубу 6 подвода газа к вихревому охладителю, коаксиальную трубу 7, обсадную трубу 8 с дном, отверстия 9 для перепуска газа в коаксиальной трубе.

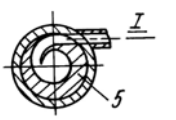
Работает установка следующим образом.

Сжатый газ давлением свыше 0,6 МПа (6 атм) подводится к вихревому охладителю 1 по трубе 6, которая сужена перед охладителем и пропущена по его оси для обеспечения лучшего охлаждения входного потока. В улитке поток ускоряется до звуковой скорости, а затем расширяется в камеру 3, где часть потока через отверстия 4 выводится внутрь коаксиальной трубы 7 и далее поднимается вверх встречно входному потоку. Другая более холодная часть потока отводится вниз через отвод 2, охлаждая дно и основание обсадной трубы, а затем прилегающий грунт. Часть газа из коаксиальной трубы 7 через отверстия 9 удаляется в пространство между трубами 7 и 8, обеспечивая более интенсивное охлаждение верхней части скважины.



Фиг.1

А-А



Фиг.2

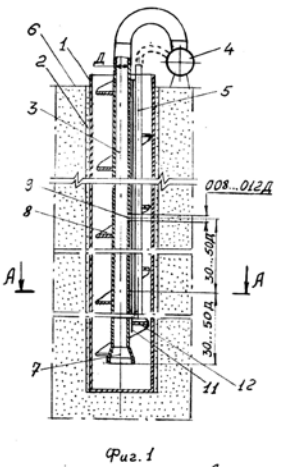
Устройство для охлаждения грунта [14].

На фиг. 1 изображено устройство для охлаждения грунта в разрезе; на фиг. 2 - сечение А-А на фиг.1.

Устройство для охлаждения грунта состоит из обсадной трубы 1, размещенной в охлаждающей (замораживающей) скважине 2, установленной в обсадную трубу внутренней трубы 3, соединенной воздуховодом 4 с всасывающим или напорным патрубком вентилятора (не показано) и трубки 5, сообщающейся с окружающей воздушной средой или с воздуховодом 4 и установленной в зазоре между обсадной трубой 1 и внутренней трубой 3 так, что она имеет возможность продольного перемещения внутри обсадной трубы с фиксацией заданного положения.

Принцип действия устройства следующий. При включении вентилятора холодный воздух по воздуховоду 4 при работе по схеме нагнетания подается во внутреннюю трубу 3 и далее по межтрубному пространству между обсадной трубой 1 и внутренней трубой 3 поступает на поверхность грунта 6 или наоборот при работе по схеме всасывания холодный воздух с поверхности грунта 6 по межтрубному пространству засасывается внутрь обсадной трубы 1 и по внутренней трубе 3 поступает в воздуховод 4 и далее на всасывающий патрубок вентилятора. Одновременно с движением

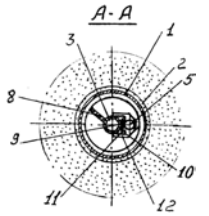
воздуха по межтрубному пространству осуществляется движение воздуха по трубке 5 внутрь обсадной трубы 1, причем трубка 5 соединена с воздуховодом 4 (штриховая линия на фиг.1) в случае работы по схеме нагнетания или в случае работы по схеме всасывания трубка 5 сообщается с окружающей скважину воздушной средой.



Фиг. 1

Из-за того, что трубка 5 выполнена из материала с низкой теплопроводностью или имеет покрытие из теплонепроводящего материала, холодный воздух, окружающий скважину воздушной среды, подводится непосредственно в нижнюю часть охлаждающей скважины 2. В связи с тем, что трубка 5 имеет возможность продольного перемещения внутри обсадной трубы 1, осуществляется регулирование за процессом охлаждения грунта по длине (глубине) обсадной трубы (замораживающей скважины).

Для интенсификации процесса охлаждения (замораживания) на конце внутренняя труба 3 имеет эжектирующую насадку 7, которая уменьшает сопротивление при движении воздуха как при выпуске воздуха в осадную трубу 1, в случае работы по схеме нагнетания, так и при всасывании воздуха из обсадной трубы во внутреннюю трубу 3 в случае работы по схеме всасывания.



Фиг. 2

Имеющиеся на боковой поверхности внутренней трубы 3 винтовое ребро (шнек) 8, отверстия 9 диаметром 0,8 - 0,12 D, расположенные в нижней части трубы 3 с шагом по длине трубы 30 - 50D, где D - внутренний диаметр трубы 3, также способствуют интенсификации замораживания и снижению продолжительности процесса охлаждения грунта за счет увеличения пути движения (времени) и перепуска части холодного воздуха в обсадной трубе.

Перемещение трубки 5 по длине внутренней трубы 3 осуществлено посредством направляющих 10, расположенных на боковой поверхности трубы 3 и полоза 11, закрепленного на трубке 5. Полоз имеет удлинение, выступающее за торец трубки 5, что позволяет перекрывать отверстия 9 на боковой поверхности внутренней трубы, расположенные ниже торца трубы 5.

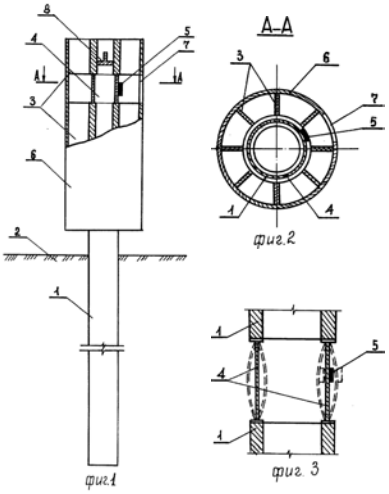
Для свободного перемещения трубки 5 по длине (глубине) обсадной трубы 1 в винтовых ребрах (шнеках) 8 выполнены отверстия 12.

На первом этапе охлаждения (замораживания) грунта трубка располагается в крайнем нижнем положении. С понижением температуры в нижней части обсадной трубы до требуемой величины трубку 5 перемещают вверх. В случае работы по схеме нагнетания, когда трубка 5, соединенная гибким шлангом или рукавом (не показано) с воздуховодом 4, выполнена составной из отдельных звеньев и с перемещением вверх до определенной высоты одно звено от трубки 5 отсоединяют. При этом шланг или рукав от трубки 5 отсоединяют, отделяют от трубки одно звено и затем снова к трубке 5 подсоединяют шланг или рукав. В случае работы по схеме всасывания трубка 5 поднимается вверх на требуемую высоту и фиксируется.

Устройство для замораживания грунта [15].

На фиг. 1 изображено предлагаемое устройство; на фиг. 2 - разрез А-А на фиг. 1; на фиг. 3 - различные положения трубчатой вставки 4 и пластины 5 из пористого материала.

Предлагаемое устройство состоит из испарителя 1 в виде трубы, заглушенной снизу и заглубленной в грунт 2, на верхнем конце которой смонтирован конденсатор, нижняя часть которого снабжена по периметру теплопроводящими ребрами 3 жесткости. Конденсатор состоит из двух вертикальных отрезков труб, соединенных между собой трубчатой вставкой 4 из эластичного материала, являющейся индикатором рабочего состояния предлагаемого устройства. На трубчатой вставке 4 закреплена пластина 5 из пористого материала, являющаяся дополнительным контрольным индикатором. Конденсатор заключен в защитный корпус 6, открытый снизу и сверху, и снабжен смотровым окном 7, размещенным на уровне и со стороны пластины 5 из пористого материала. Конденсатор имеет патрубок 8 с заглушкой.



Работа устройства осуществляется следующим образом.

Устройство внедряют в массив грунта 2. Через патрубок заполняют устройство двухфазовым хладоносителем и заглушают его. Закрывают верхнюю часть конденсатора.

В зимний период в устройстве начинается циркуляция хладоносителя. Охлажденный в конденсаторе за счет низких температур окружающий воздух конденсируется на внутренней поверхности трубы конденсатора, приобретая низкую температуру наружного воздуха, под действием силы тяжести опускается вдоль стенок испарителя, нагревается от стенок испарителя

за счет тепла окружающего грунта и испаряется, поднимаясь в конденсатор. В конденсаторе за счет низких температур конденсируется воздух и через стенки теплопередающего ребра 3 и корпуса 6 тепло передается в атмосферу. Таким образом происходит естественная циркуляция в устройстве, охлаждение и замораживание массива грунта до температуры окружающего воздуха. В устройстве двухфазный хладоноситель находится в термодинамическом равновесии. Температура давления и его объем внутри постоянно меняются в течение года.

При положительных температурах окружающей среды в конденсаторе увеличивается давление и трубчатая эластичная вставка 4 раздувается, а при отрицательных температурах окружающей среды давление в конденсаторе уменьшается и вставка 4 втягивается. При этом на пластине 5 из пористого материала, имеющей зону с большим тепловыделением, чем поверхность вставки 4, в зимний период за счет конденсата влаги образуется снежная шуба, а в летний период пластина 5 будет влажная.

Устройство для аккумуляции холода в основании сооружений [16].

Сущность предлагаемого изобретения пояснена на чертежах, где на:

фиг. 1 представлен общий вид устройства;

фиг. 2 сечение по А-А устройства на фиг. 1;

фиг. 3 термоэлектрический модуль в разрезе;

фиг. 4 термоэлектрический модуль с радиатором на фиг. 1, вид сбоку;

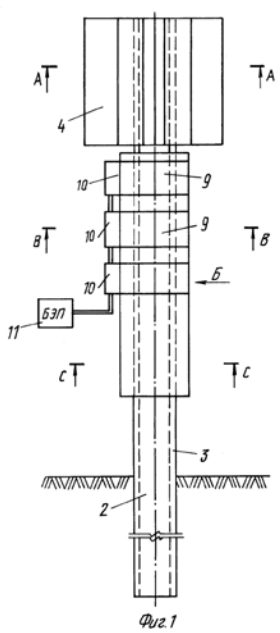
фиг. 5 сечение по В-В термоэлектрического модуля с радиатором на фиг. 4.

Устройство выполнено в виде герметичного трубчатого корпуса, снабженного снаружи по меньшей мере одной продольной полкой 1, трубчатый корпус частично заполненного хладоагентом. Трубчатый корпус размещен частично в грунте. Подземная часть трубчатого корпуса является испарителем 2, а надземная - конденсатором 3. Для работы устройства в зимнее время как сезонно-охлаждающего устройства наружная поверхность конденсатора 3 может быть частично снабжена ребрами 4. На продольной полке 1 конденсатора 3 размещен, по меньшей мере, один термоэлектрический модуль 5. Основой модуля 5 служит керамическая пластина 6 с высокой теплопроводностью, механической прочностью и электрическим сопротивлением. В пластине 6 выполнены пазы 7, в которые вставлены стержни 8, спрессованные из металлических частиц, покрытых пленкой p- и n-полупроводниковых материалов на основе теллурида висмута и образующих с помощью керамических печатных плат с нанесенными медными соединителями (на чертеже не изображены) последовательную батарею элементов Пельтье. Количество устанавливаемых на продольной полке 1 конденсатора 3 модулей 5 зависит от необходимой развиваемой мощности устройства для аккумуляции холода. Для отвода тепла на теплой стороне каждого модуля 5 установлен радиатор 9. На радиаторе 9 установлен вентилятор 10, служащий для продувания воздушной среды через радиатор 9.

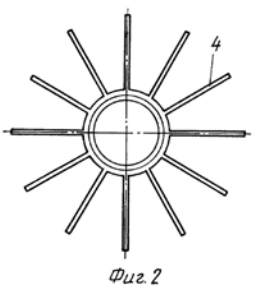
Модуль 5 и вентилятор 10 подключены к блоку 11 электропитания. Питание блока 11 осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Выходные данные блока 10: ток 3 А, напряжение 12 В, колебание от стационарного режима ± 5%.

Устройство работает следующим образом.

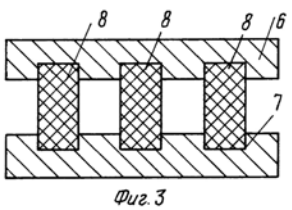
Трубчатый корпус, частично заполненный хладоагентом, погружают нижней частью-испарителем 2 в грунт, температуру которого необходимо понизить. В качестве хладоагента можно использовать низкокипящую жидкость: керосин, аммиак, фреон, пропан и т. п. Хладоагент, отбирая из окружающего массива грунта тепло, испаряется и его пары поднимаются в верхнюю часть трубчатого корпуса - конденсатор 3. В результате работы модулей 5 происходит охлаждение конденсатора 3 до отрицательных температур, при этом пары хладоагента конденсируются и стекают в испаритель 2. Далее термодинамический цикл «испарение-конденсация» хладоагента повторяется. Радиатор 9 и вентилятор 10 обеспечивают интенсивный конвективный теплообмен теплой стороны модуля 5 с окружающей средой и создают максимальную отрица-



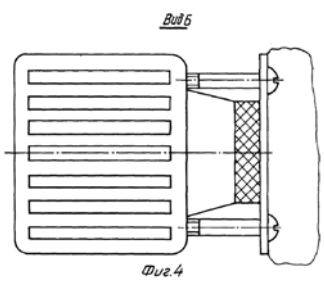
Фиг.1



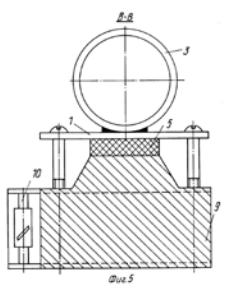
Фиг.2



Фиг.3



Фиг.4



Фиг.5

тельную температуру на холодной стороне модуля 5, обращенной к конденсатору 3. В зимнее время при отрицательных температурах окружающей среды устройство, установленное на открытом воздухе, может работать как сезонноохлаждающее устройство за счет охлаждения конденсатора атмосферным воздухом, так и за счет дополнительного включения модулей 5. При установке в закрытых помещениях при положительной температуре окружающей среды устройство может также работать круглогодично за счет охлаждения конденсатора 3 только модулями 5. Таким образом, работа устройства осуществляется круглый год.

Устройство для зонального азотного замораживания грунтов [17].

Предлагаемое устройство для зонального азотного замораживания грунтов иллюстрируется следующими графическими материалами.

Фиг. 1 - устройство для замораживания грунтов, продольный разрез по корпусу замораживающей колонки;

фиг. 2 - соединение центральной питающей трубы с обтекателем и уплотнительным устройством;

фиг. 3 - узел соединения центральной питающей трубы с вертикальными распределительными патрубками;

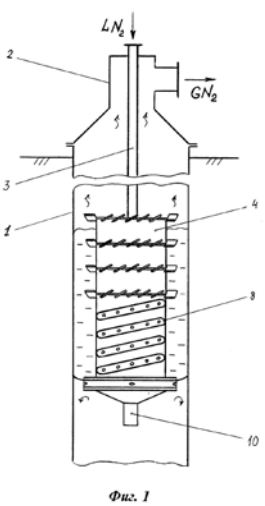
фиг. 4 - то же, со спиралевидными распределительными патрубками;

фиг. 5 - сечение А-А фиг. 1, вариант радиальных выпускных окон криогенного испарителя;

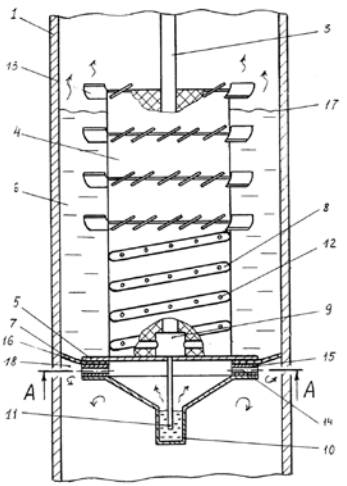
фиг. 6 - то же, вариант тангенциальных выпускных окон криогенного испарителя.

Сведения, подтверждающие возможность осуществления изобретения

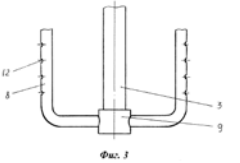
Устройство для зонального азотного замораживания грунтов содержит корпус 1 замораживающей колонки с оголовником 2, центральной питающей трубой 3, обтекателем 4, смонтированным на питающей трубе 3 на основании 5 с образованием кольцевого зазора 6 между корпусом 1 и обтекателем 4. Под основанием 5 обтекателя 4 установлено центрирующее гибкое кольцо 7, выполненное из упругого материала. Центральная питающая труба 3 соединена с распределительными патрубками 8 в уровне основания 5 обтекателя 4 посредством переходника 9 и в случае выполнения уплотнительного устройства 10 в виде криогенного испарителя соединена с последним посредством перепускного канала 11 и переходника 9. Распределительные патрубки 8 выполнены с перфорацией 12, охватывают нижнюю часть обтекателя 4 и могут быть выполнены как вертикальными, так и спиралевидными. В верхней зоне обтекатель 4 снабжен отбойниками 13, которые могут быть выполнены в виде наклонных лопаток, а также могут быть снабжены по краям зубчатой перфорацией (условно не показано). Корпус криогенного испарителя 10 также закреплен на основании 5, в его фланце 14 выполнены выпускные сопла 15 (радиальные или тангенциальные). Устройство устанавливают в корпус 1 замораживающей скважины на проектную отметку 16 с выходом уровня замораживания грунтов на уровень 17, причем гибкое центрирующее кольцо 7 фиксирует основание 5 обтекателя в монтажном зазоре 18 у стенок корпуса 1.

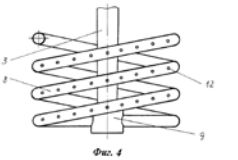


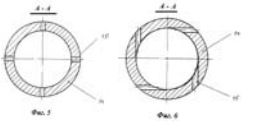
Фиг. 1



Фиг. 2


Фиг. 3


Фиг. 4


Фиг. 5 Фиг. 6

Рассмотрим работу устройства для зонального азотного замораживания грунтов со спиральными распределительными патрубками 8 и уплотнительным устройством 10 в виде криогенного испарителя. Жидкий азот через центральную питающую трубу 3 замораживающей колонки подается в переходник 9, соединенный с перфорированными распределительными патрубками 8. Проходя через перфорационные отверстия 12 в патрубках 7, жидкий азот заполняет кольцевой зазор 6 до проектного уровня 17. При этом жидкий азот движется в распределительных патрубках 8 снизу вверх так, что направление потоков жидкостной и газовой фаз совпадают.

Термоустройство для охлаждения и замораживания грунта [18].

Изобретение относится к строительству, в частности к устройствам, используемым при термомелиорации грунтов основания фундаментов сооружений, возводимых в районах распространения вечной и сезонной мерзлоты.

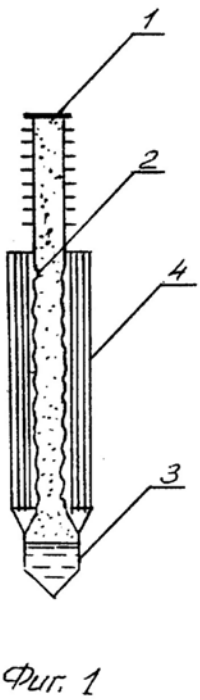
Наиболее близким к изобретению по решаемой задаче и достигаемому результату является термоустройство для охлаждения и замораживания грунта, включающее грунтовый и воздушный

теплообменники и соединительный теплопровод (см. RU, заявка, 95106005/03, кл. Е 02 D 3/12, 27.01.97, БИ 9703). Это известное решение как наиболее близкое принято за прототип.

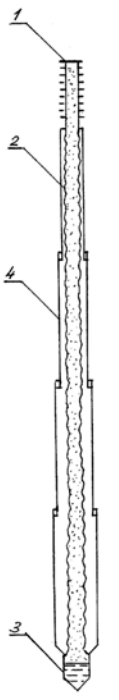
Недостатком известных конструкций термоустройств являются неудобства, возникающие при их использовании вследствие невозможности регулирования и глубины установки в охлаждаемый грунт.

Задачей изобретения является повышение эффективности и удобства применения термоустройства путем обеспечения возможности регулирования его длины и глубины установки в грунт.

Задача решается за счет того, что в термоустройстве для охлаждения и замораживания грунта, включающем грунтовый и воздушный теплообменники и соединительный теплопровод, соединительный теплопровод выполнен по длине составным из телескопически соединенных между собой полых элементов, причем длина элементов определена зависимостью lэi=(0,2-0,08)lтп, где lтп - длина соединительного теплопровода. При этом полые элементы могут быть снабжены фиксаторами относительного осевого перемещения, а внутри соединительного теплопровода может быть размещена герметичная оболочка, заполненная теплоносителем и выполненная в виде мягкого гофрированного рукава, открытыми торцами сообщающегося с внутренними полостями грунтового и воздушного теплообменников.



Фиг. 1



Фиг. 2

Технический результат, обеспечиваемый за счет указанного сочетания конструктивных особенностей, состоит в повышении эффективности работы и удобства транспортировки, а также в упрощении технологии монтажа на месте установки термоустройства за счет возможности регулирования глубины заложения.

На фиг. 1 изображен общий вид термоустройства в сложенном (транспортном) положении, а на фиг. 2 - в раздвинутом виде.

Термоустройство содержит воздушный теплообменник 1, мягкий гофрированный рукав 2, грунтовый теплообменник 3, составные телескопические элементы 4 соединительного теплопровода.

Доставленное к месту установки в сложенном виде (фиг. 1) корпус термоустройства раздвигают до нужной длины (фиг. 2) и устанавливают в предварительно пробуренную скважину. Благодаря телескопической конструкции корпуса соединительного теплопровода глубина заложения термоустройства может регулироваться в зависимости от намеченной глубины расположения намораживаемой зоны в грунтовом основании фундамента сооружения.

При временном использовании после окончания применения термоустройство может быть извлечено из грунта, приведено в транспортное положение и привезено на новое место установки.

Описанная конструкция термоустройства обеспечивает унификацию его использования, а также удобство монтажа и транспортировки за счет возможности регулирования его длины взамен необходимости применения устройств различных типоразмеров.

Предложенная конструкция термоустройства может быть эффективно использована при возведении различных сооружений, в частности, опор линий электропередачи в северных районах с сохранением природного состояния мерзлых грунтов.

Формула изобретения:

1. Термоустройство для охлаждения и замораживания грунта, включающее грунтовый и воздушный теплообменники и соединительный теплопровод, отличающееся тем, что соединительный теплопровод выполнен по длине составным из телескопически соединенных между собой полых элементов, причем длина элементов определена зависимостью lэi = (0,2 - 0,8) lтп, где lтп - длина соединительного теплопровода.

2. Термоустройство по п.1, отличающееся тем, что полые элементы снабжены фиксаторами относительного перемещения.

3. Термоустройство по п.1, отличающееся тем, что внутри соединительного теплопровода размещена герметичная оболочка, заполненная теплоносителем и выполненная в виде мягкого гофрированного рукава, открытыми торцами сообщающегося с внутренними полостями грунтового и воздушного теплообменников.

Термоустройство для охлаждения и замораживания грунта [19].

Изобретение относится к строительству, в частности к устройствам, используемым при термомелиорации грунтов основания фундаментов сооружений, возводимых в районах распространения вечной и сезонной мерзлоты.

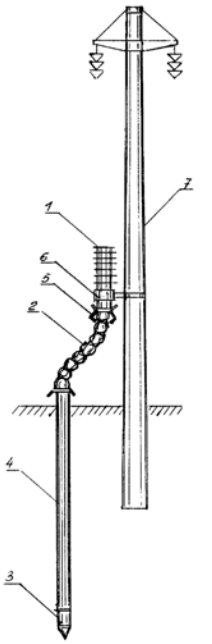
Наиболее близким к изобретению по решаемой задаче и достигаемому результату является термоустройство для охлаждения и замораживания грунта, включающее грунтовый и воздуш-

ный теплообменники и соединительный теплопровод (см. заявка RU 95106005/03, кл. E 02 D 3/12, 27.01.97, бюл. изобр. 9703). Это известное решение как наиболее близкое принято за прототип.

Недостатком известной конструкции термоустройства является невозможность его самостоятельного применения без пустотелого свайного фундамента, во внутренней полости которого она размещается. Этот недостаток вызван тем, что в устройстве, выполненном в виде гибкого рукава, отсутствует жесткий корпус.

Задачей изобретения является повышение эффективности и удобства применения термоустройства путем обеспечения возможности его автомобильного использования вне элементов строительных конструкций.

Задача решается за счет того, что в термоустройстве для охлаждения и замораживания грунта, включающем грунтовый и воздушный теплообменники и соединительный теплопровод, часть соединительного теплопровода, примыкающая к воздушному теплообменнику, выполнена в виде гибкого гофрированного рукава, размещенного в его внутренней полости, причем воздушный теплообменник соединен с корпусом соединительного теплопровода с помощью быстроразъемного соединения, а длина гибкого гофрированного рукава в растянутом положении не превышает длину воздушного теплообменника. Для удобства монтажа воздушный теплообменник снабжен приспособлением для крепления его к строительным конструкциям, стойкам или опорам ЛЭП.



Технический результат, обеспечиваемый за счет указанного сочетания конструктивных особенностей, состоит в повышении эффективности и удобства применения термоустройства, а также в упрощении технологии установки термоустройства в грунт в зоне заложения фундамента сооружения за счет исключения необходимости монтажа устройства внутри возводимого фундамента.

На чертеже изображен общий вид термоустройства, установленного в грунте в зоне заложения фундамента опоры ЛЭП.

Термоустройство содержит воздушный теплообменник 1, гибкий рукав 2, грунтовый теплообменник 3, соединительный теплопровод 4, быстроразъемное соединение 5, приспособление для крепления 6 к опоре ЛЭП 7.

После установки термоустройства в грунт в зоне заложения фундамента опоры ЛЭП или иного сооружения воздушный теплообменник 1 отсоединяют от корпуса соединительного теплопровода 4 посредством быстроразъемного соединения 5 и с помощью приспособления 6 прикрепляют к опоре 7. При этом гибкий гофрированный рукав 2, размещенный в сложенном виде в корпусе соединительного теплопровода 4, растягивается и воздушный теплообменник 1 может быть смещен в сторону относительно продольной оси соединительного теплопровода 4.

При установке термоустройства могут применятся различные варианты взаимного расположения воздушного теплообменника, соединительного теплопровода и конструктивных элементов сооружений. Например, грунтовый теплообменник и соединительный теплопровод могут располагаться внутри здания или сооружения, а воздушный теплообменник для улучшения теплообмена с внешней средой - снаружи. Кроме того, предложенная конструкция термоустройства позволяет устанавливать воздушный теплообменник под различным наклоном к продольной оси соединительного теплопровода. Это обеспечивает удобство его размещения относительно элементов сооружений.

Описанная конструкция термоустройства позволяет повысить эффективность работы и расширить область его применения, а также повысить удобство монтажа и обслуживания и обеспечить автономность установки вне элементов сооружений.

Предложенная конструкция термоусройства может быть эффективно использована при возведении различных сооружений, в частности, опор линий электропередачи в северных районах с сохранением природного состояния мерзлых грунтов.

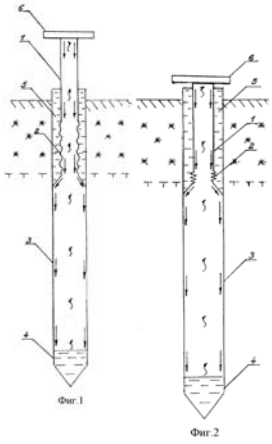
Формула изобретения:

1. Термоустройство для охлаждения и замораживания грунта, включающее грунтовый и воздушный теплообменники и соединительный теплопровод, отличающееся тем, что часть соединительного теплопровода, примыкающая к воздушному теплообменнику, выполнена в виде гибкого гофрированного рукава, размещенного в его внутренней полости, причем воздушный теплообменник соединен с корпусом соединительного теплопровода с помощью быстроразъемного соединения, а длина гибкого гофрированного рукава в растянутом положении не превышает длину воздушного теплообменника.

2. Термоустройство по п.1, отличающееся тем, что воздушный теплообменник снабжен приспособлением для крепления его к строительным конструкциям, стойкам или опорам ЛЭП.

Устройство для охлаждения и замораживания грунта [20].

На фиг. 1 изображен общий вид термоустройства в рабочем положении, соответствующем активному периоду, а на фиг. 2 - в законсервированном положении, соответствующем пассивному периоду.



Фиг.1 Фиг.2

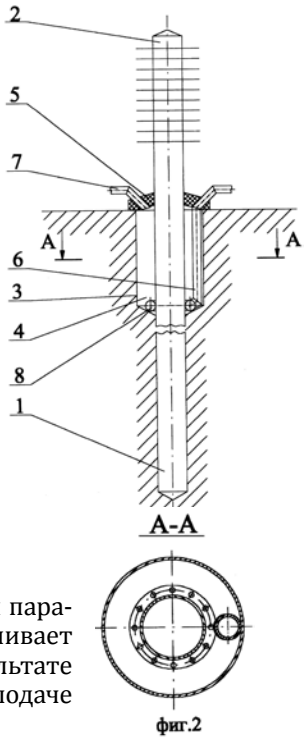
Термоустройство содержит воздушный теплообменник 1, мягкий гофрированный рукав 2, соединительный теплопровод 3, грунтовый теплообменник 4, термоаккумулятор 5, ограничитель перемещения воздушного теплообменника 6. Нижний торец мягкого гофрированного рукава прикреплен к внутренней поверхности корпуса соединительного теплопровода, а верхний - к нижнему торцу воздушного теплообменника.

Термоустройство устанавливают в предварительно пробуренную скважину, воздушный теплообменник 1 выдвигают из корпуса устройства и фиксируют в выдвинутом положении (фиг. 1). В этом положении теплообмен осуществляется в активный период между охлаждаемым грунтовым основанием и внешней средой. При этом температура антифриза, заполняющего полость термоаккумулятора, также понижается. По окончании активного периода воздушный теплообменник 1 вдвигают внутрь корпуса термоустройства и оставляют в таком положении (фиг. 2) в течение всего пассивного периода. В этом положении теплообмен осуществляется между грунтовым основанием и сезонно-мерзлым слоем грунта через термоаккумулятор. Таким образом, вместо растепления мерзлого грунтового основания за счет переноса тепла из внешней среды через корпус термоустройства в пассивный период будет осуществляться дальнейшее охлаждение грунтов основания за счет использования запасов холода, накопленных сезонно-мерзлым слоем грунта и термоаккулятором за активный период.

Устройство для аккумуляции холода [21].

На фиг. 1 изображено заявленное устройство (в разрезе), а на фиг. 2 - разрез по А - А на фиг. 1.

Устройство включает обсадную трубу, состоящую из испарителя 1, погруженного в грунт, и конденсатора 2, расположенного выше поверхности грунта. Вокруг испарителя и части конденсатора смонтирована оболочка 3 с зазором 4, который заполнен хладоносителем. Оболочка, смонтированная вокруг конденсатора, снабжена теплоизоляцией 5. К оболочке подведены нагнетательный 6 и отводящий 7 трубопроводы, причем нагнетательный трубопровод находится внутри оболочки и соединен с коллектором 8.



фиг.2

Устройство работает следующим образом.

С наступлением зимнего периода, когда температура наружного воздуха становится ниже температуры охлаждаемого грунта, происходит охлаждение и замораживание грунта и промораживание хладоносителя, находящегося в зазоре 4, за счет циркуляции хладагента в обсадной трубе.

С наступлением летнего периода, когда температура наружного воздуха становится выше температуры замораживаемого грунта, в оболочку 3 через питающий трубопровод 6 подается захоложенный в испарителе холодильной машины хладоноситель, находящийся в зазоре 4, отепляется парами хладагента и выводится через отводящий трубопровод 7, что обеспечивает заданный температурный режим. В первом случае это достигается в результате передачи холода грунту работающей термосваей, а во втором -благодаря подаче захоложенного хладоносителя.

Стабилизатор для пластично-мерзлых грунтов с круглогодичным режимом работы [22].

На фиг.1 схематично изображено сооружение со стабилизатором; на фиг.2 - узел А на фиг.1.

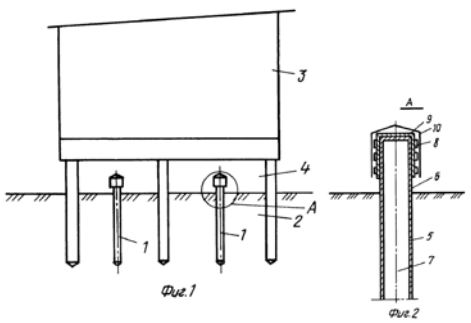
Стабилизатор 1 для пластично-мерзлых грунтов с круглогодичным режимом работы для аккумуляции холода в основании 2 инженерных сооружений 3 с низким по высоте подпольем 4 включает подземную 5 и надземную 6 части трубчатого герметичного корпуса 7, заполненного хладоагентом. Подземная часть 5 является испарителем, а надземная 6 - конденсатором. Конденсатор снабжен термоэлектрическими модулями 8 в виде батареи элементов Пельтье.

Надземная часть 6 снабжена П-образным стаканом 9, выполненным из теплопроводного материала.

Внутренняя поверхность П-образного стакана имеет конфигурацию, соответствующую конфигурации наружной поверхности конденсатора, на которую его устанавливают с возможностью вертикального перемещения и фиксации.

Термоэлектрические модули 8 в виде батареи элементов, использующих эффект Пельтье, установлены на наружной поверхности П-образного стакана 9.

Термоэлектрические модули защищены от повреждения съемным наружным кожухом 10.

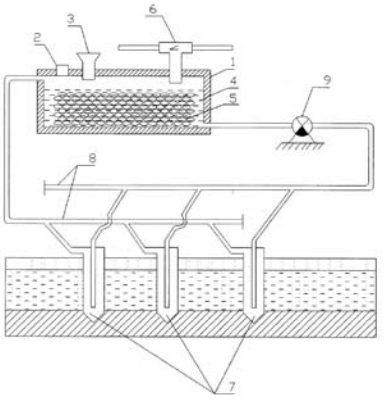


Монтаж стабилизатора для пластично-мерзлых грунтов с круглогодичным режимом работы производят путем погружения его в грунт.

На верхнюю часть 6 стабилизатора 1 устанавливают П-образный стакан 9, на котором смонтированы термоэлектрические модули в виде батареи элементов, использующих эффект Пельтье. Охлажденный термоэлектрическими модулями хладоноситель в конденсаторе конденсируется на внутренних поверхностях корпуса 7, под действием силы тяжести хладоноситель опускается вдоль стенок испарителя, нагревается за счет отбора тепла окружающего грунта и испаряется, поднимаясь в конденсатор. Происходит естественная циркуляция, охлаждение и замораживание массива грунта.

Способ замораживания грунтов при строительстве подземных сооружений [23]

Замораживающая система состоит из резервуара 1 с двумя входными отверстиями 2, 3 для подачи хладоносителя 4 и твердого криоагента 5, эжектора 6, всасывающий патрубок которого расположен в верхней части резервуара 1, и замораживающей сети. Замораживающая сеть включает замораживающие колонки 7, соединенные с резервуаром 7 посредством магистральных трубопроводов 8, и насос 9, установленный на выходе резервуара 7.

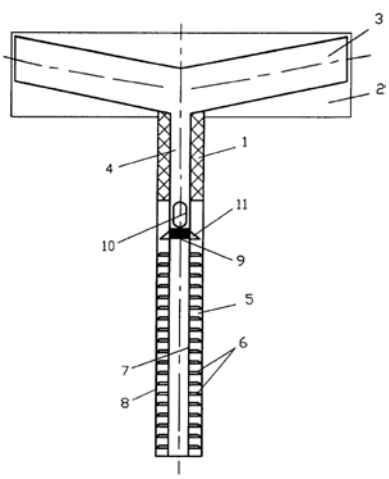


Способ замораживания грунтов при строительстве подземных сооружений осуществляют следующим образом.

Вокруг подземного сооружения на заданном от него расстоянии бурят скважины и устанавливают в них замораживающие колонки 7 с жидким хладоносителем, которые соединяют с резервуаром 7. Далее резервуар заполняют жидким хладоносителем и твердым криоагентом. В результате непосредственного взаимодействия твердого криоагента с хладоносителем происходит сублимация криоагента и интенсивное охлаждение хладоносителя. При этом газовую составляющую криоагента отделяют от жидкого хладоносителя посредством эжектора 6. Затем охлажденный хладоноситель поступает с помощью насоса 9 в замораживающие колонки, в которых он отбирает тепло от окружающего массива грунта и движется на повторное охлаждение. Циркуляцию хладоносителя по замораживающей сети осуществляют до образования ледогрунтового ограждения заданной толщины.

Способ охлаждения грунта и тепловая свая для его охлаждения [24]

Тепловая свая для охлаждения грунта содержит вертикальный железобетонный ствол 1 с горизонтальной опорой 2, расположенной над поверхностью грунта, как и конденсатор 3 тепловой трубы, выполненной из труб, и транспортная зона 4 которой выполнена внутри вертикального железобетонного ствола 1 и соединена вдоль продольной своей оси с испарителем 5 тепловой трубы, выполненным с оребрением 6. Конденсатор 3 тепловой трубы выполнен в виде симметрично изогнутой трубы с уклонами к центральной его части и с диаметром, большим чем диаметр трубы, из которой выполнена транспортная зона 4 тепловой трубы, подключенная к центральной части конденсатора 3 и которая при переходе в испаритель 5 выполнена в качестве его внутренней стенки 7 с образованием с выполненной его внешней стенкой 8 кольцевой полости испарителя 5 в плоскости его поперечного сечения и с объемом полости, меньшим объема полости конденсатора 3, после указанного перехода трубы транспортной зоны 4 в трубу внутренней стенки 7 она выполнена с герметичной заглушкой 9, перед которой на ней выполнены боковые отверстия 10 для соединения полости транспортной зоны 4 с полостью испарителя 5. Оребрение 6 испарителя 5 выполнено на внутренней стороне его наружной стенки 8 в виде оболочек усеченных конусов, внутренние кромки которых расположены выше своих наружных кромок и образуют с внутренней стенкой 7 испарителя 5 кольцевые проходы. На внутренней стенке 7 испарителя 5 ниже ее отверстий 10 выполнен козырек 11 в виде оболочки усеченного конуса, внутренней своей кромкой соединенный с внутренней стенкой 7 по ее периметру, а своей наружной кромкой образующий с наружной стенкой 8 испарителя 5 проходную щель. Горизонтальная опора 2 выполнена в виде металлической пластины, расположенной в вертикальной плоскости и соединенной с конденсатором 3 в тепловом отношении по его боковым образующим.



Предложенное устройство работает следующим образом.

Тепловые сваи для охлаждения грунта устанавливаются в вечную мерзлоту в зимнее время путем просверливания в ней с помощью буровой установки колодцев. Затем сваи выставляют и закрепляют между собой, после чего в зазоры колодцев заливают воду, которая замерзает и жестко связывает всю конструкцию в вечной мерзлоте. Замерзанию залитой воды в зазоры колодцев в вечной мерзлоте способствует также работа ТТ, когда температура окружающего воздуха ниже температуры вечной мерзлоты. При этом

начинается охлаждение грунта вокруг внешней стенки 8 испарителя 5 до температуры, практически равной температуре окружающего воздуха.

В зимнее время, когда температура окружающего воздуха в тундровой полосе Земли находится на уровне (например, минус 40°С) ниже, чем температура грунта, окружающего сваю, то грунт будет интенсивно охлаждаться практически до температуры окружающего воздуха. Рабочая жидкость, например аммиак, равномерно распределенная по высоте кольцевого испарителя 5 в его ребрах 6 у внутренней поверхности внешней стенки 8, испаряется за счет теплоподвода к внешней стенке 8 от окружающего ее грунта. Пар поднимается вверх, проходит через отверстия 10 и по транспортному участку 4 поступает в конденсатор 3, в котором он конденсируется под воздействием на него низких температур окружающей среды, и снова стекает в кольцевой испаритель 5.

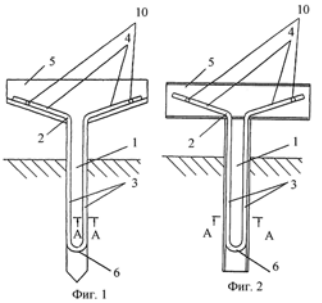
Равномерное распределение аммиака по ребрам 6 вдоль внешней стенки 8 испарителя 5 обеспечивается козырьком 11, который направляет стекающий на него жидкий аммиак на внешнюю стенку 8 испарителя 5. Интенсивность испарения аммиака в испарителе 5 повышается за счет того, что полость конденсатора 3 выполнена больше, чем полость испарителя 5, так как при этом увеличивается объем и поверхность для образования конденсата, а также поверхность тепловой связи с окружающей средой вследствие того, что тепловая труба конденсатора выполнена с большим диаметром. Так как испаритель 5 выполнен с внешней стенкой 8, имеющей увеличенную поверхность взаимодействия с грунтом, то это увеличивает теплоподвод к испарителю от грунта и тем самым дополнительно повышается интенсивность охлаждения грунта тепловой трубой.

В летнее время тепловая труба не работает, так как пар не конденсируется в конденсаторе 3 из-за того, что его температура выше, чем температура кольцевого испарителя 5. При этом прекращается жидкостно-паровая циркуляция аммиака в тепловой трубе, и отвод тепла от испарителей 5 к конденсатору 3 прекращается, что обеспечивает сохранение вечной мерзлоты на глубине в качестве жесткой опоры для сваи в летнее время несмотря на то, что верхний слой грунта находится в оттаянном состоянии. Чем глубже установлены сваи и чем более интенсивно они охлаждают окружающий грунт вокруг своих испарителей 5 в зимнее время, тем прочнее и надежнее вечная мерзлота служит для них опорой в летнее время и для и для сооружения, которое установлено на них.

Тепловая свая [25].

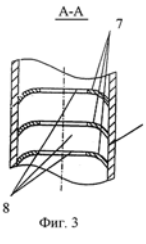
На фиг.1 и 2. На фиг.1 показана тепловая свая с железобетонным стволом, на фиг.2 - с металлическим стволом, на фиг.3 - сечение А-А на фиг.1, на фиг.4 - сечение А-А на фиг.2.

Тепловая свая выполнена Т-образной формы и включает: железобетонный или металлический ствол 1 с внутренней или наружной тепловой трубой 2 в виде оребренного испарителя 3 и конденсаторами 4, выполненными с металлическим пластинчатым оребрением 5 и расположенными над поверхностью грунта наклонно к вертикальной части ствола 1. Тепловая труба 2 в виде оребренного испарителя 3 выполнена симметрично двойной относительно оси ствола 1 с соединением 6 одних концов ее испарителей 3, другие концы соединены с конденсаторами 4, при этом оребрение испарителей 3 выполнено в виде выпуклых вверх кольцевых поверхностей 7 с центральными проходами 8, закрепленных на внутренних поверхностях стенок 9 испарителей 3 тепловой трубы 2 и равномерно распределенных по ее высоте, а металлическое пластинчатое оребрение 5 конденсаторов 4 является элементом горизонтальной части Т-образной тепловой сваи. К поверхностям конденсаторов 4 приварены штуцеры 10 для подключения системы аварийного оттаивания тепловой сваи.

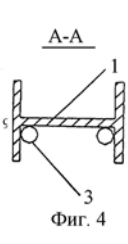


Фиг. 1

Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

В зимнее время, когда температура окружающего воздуха в тундровой полосе Земли находится на уровне (например, минус 40°С) ниже, чем температура грунта, окружающего сваю, то он будет интенсивно охлаждаться практически до температуры окружающего воздуха. Рабочая жидкость, например аммиак, испаряется в выпуклых вверх кольцевых поверхностях 7 оребренных испарителях 3, пар поднимается вверх по центральным проходам 8 в более холодные по сравнению с оребренными испарителями 3 конденсаторы 4, в которых конденсируется и стекает по стенкам снова в оребренные испарители 3, равномерно заполняя выпуклые вверх кольцевые поверхности 7 по всей высоте испарителей 3, и таким образом обеспечивается интенсивное охлаждение оребренных испарителей 3 и окружающего их грунта по всей их высоте.

В летнее время ТТ 2 не работает, так как температура конденсаторов 4 выше температуры оребренных испарителей 3 и пар не конденсируется в них.

Устройство для глубинного замораживания грунта [26].

На фиг.1 изображена замораживающая колонка устройства в грунте; на фиг.2 - разрез по А-А на фиг.1; на фиг.3 - участок внутренней трубы замораживающей колонки с одетыми на нее теплоизоляционными трубками; на фиг.4 - принципиальная схема расположения оборудования, обеспечивающего охлаждение и циркуляцию жидкого хладоносителя в замораживающей колонке; на фиг.5 -

изображены замораживающие колонки устройства, нижние половины которых размещены в грунте основания плотины, а верхние - в грунте центральной части ее тела.

Устройство для глубинного замораживания грунта 1 включает замораживающую колонку 2, размещенную в буровой скважине (канале) 3, наружный теплообменник 4 (фиг.4), отдающий тепло жидкого хладоносителя 5 источнику холода (атмосфера, холодильная установка), и приспособление в виде насоса 6 для принудительной циркуляции в устройстве жидкого хладоносителя 5. Замораживающая колонка 2 представляет собой две коаксиально расположенные трубы: наружная (замораживающая) 7 и внутренняя (питательная) 8. Эти трубы образуют между собой кольцевой канал 9 для циркуляции жидкого хладоносителя 5. В зазоре 10 между наружной трубой 7 и стенкой 11 буровой скважины 3 размещен материал заполнения 12.

Трубы, наружная 7 и внутренняя 8, выполнены из металла (сталь), при этом внутренняя труба 8 в пределах большей половины своей длины, примыкающей к устью 13 буровой скважины 3, покрыта теплоизоляционным слоем 14, обеспечивающим величину коэффициента теплопередачи стенки внутренней трубы 8 Кст менее 100 Вт/(м2·К). Теплоизоляционный слой 14 в пределах верхнего участка hв внутренней трубы 8 выполнен из длинномерных деревянных элементов 15 (фиг.2), стянутых хомутами 16 (фиг.1), отгибы которых центрируют внутреннюю трубу 8 в полости наружной трубы 7. Материал заполнения 12, размещенный в зазоре 10, содержит частицы металла и/или углерода технического (сажа) и/или графита в количестве, соответствующем заданной по длине буровой скважины концентрации, необходимой для придания материалу заполнения 12 проектной теплопроводности.

На верхнем участке hв буровой скважины 3, примыкающем к ее устью 13, материал заполнения 12 имеет наибольшую концентрацию частиц высокой теплопроводности, наружная труба 7 и буровая скважина 3 имеют каждая наибольший диаметр, а теплоизоляционный слой 14 - наибольшую толщину.

Внутренняя труба 8 может быть выполнена из полимерного материала, например армированного полипропилена, стойкого по отношению к керосину, чаще всего используемого в качестве хладоносителя, а в случае металлической внутренней трубы 8 ее теплоизоляционный слой 14 может быть выполнен из такого же полимерного материала, преимущественно пористого.

Теплоизоляционный слой 14 обычно имеет вид теплоизоляционных трубок 17 (фиг.3), одетых на внутреннюю трубу 8, выполненных из теплоизоляционного материала и удерживающихся опорными хомутами 18. Трубки 17 могут быть выполнены так же, например, из одревеснев ших стволов бамбука, которые из условия обработки их внутренней полости имеют обычно длину lт около одного метра.

Принудительная циркуляция хладоносителя в замораживающей колонке 2 осуществляется оборудованием, чаще всего работающим на группу замораживающих колонок 2, например, при создании противофильтрационной ледогрунтовой стенки при гидротехническом строительстве. Это оборудование состоит из коллекторной трубы 19 (фиг.4), наружного теплообменника 4, сливного бака 20, насоса 6, расходомера 21, распределительной трубы 22 и соединительных труб и рукавов 23 (фиг.1)

При подаче керосина в замораживающую колонку 2 происходит заполнение керосином пор деревянных теплоизоляционных элементов 15 и трубок 17, а также неплотностей между ними и стеной внутренней трубы 8. Но поскольку теплопроводность керосина около 0,13 Вт/(м•К), что существенно ниже теплопроводности воды и ее растворов [5], это не ухудшает теплоизоляционные свойства деревянных элементов теплоизоляции. Напротив, в случае сухих деревянных элементов их теплоизоляционные свойства в сравнении с сырыми содержащими древесный сок улучшаются.

Материал заполнения 12 состоит из грунта и порошка, содержащего металлы, например, в виде хвостов обогащения, углерода технического (сажа) или преимущественно некондиционного графита, теплопроводность которых аномально высокая.

При принудительном движении жидкого хладоносителя 5, охлажденного в зимнее время в наружном теплообменнике 4, по внутренней трубе 8 вниз на теплоизолированных ее участках верхнем hв и среднем hср через ее стенку не происходит значительного теплообмена. На ее же нижнем участке hн, длина которого обычно не превышает 15-20 метров, из-за малого перепада температуры на стенке теплообмен невелик и является допустимым.

При движении жидкого хладоносителя 5 по кольцевому каналу 9 вверх вследствие повышенной теплопроводности материала заполнения 12 происходит интенсивное замораживание грунта при одновременном повышении температуры жидкого хладоносителя. Однако по мере приближении жидкого хладоносителя к устью 13 буровой скважины 3 в устройстве увеличиваются:

- концентрация частиц с высокой теплопроводностью в материале заполнения 12, что повышает теплопроводность последнего;

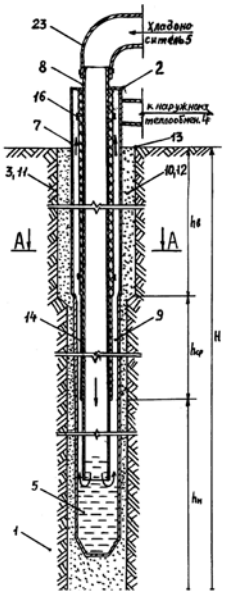
- диаметр наружной трубы, в результате чего увеличивается поперечное сечение кольцевого канала и, как следствие, - уменьшение скорости движения хладоносителя до 0,1 м/с;

- диаметр буровой скважины, в результате чего увеличивается поверхность охлаждения грунта.

Указанные увеличения, обоснованные расчетом и экспериментами, обеспечивают заданную равномерность замораживания грунта на всех участках замораживающей колонки при одновременном достижении перепада температуры в жидком хладоносителе от входа в замораживающую колонку до выхода из нее до 5-7 градусов и более. Это повышает эффективность работы устройства по равно-

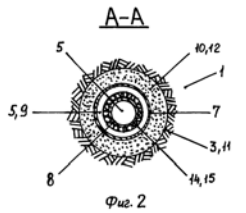
мерному замораживанию грунта на глубину до 100 метров и более.

На фиг.5 изображены замораживающие колонки 2 устройства для замораживания грунта, нижние половины которых размещены в грунте основания 24 плотины 25, а верхние - в грунте центральной части тела плотины. Выполнение таких замораживающих колонок 2 в процессе возведения плотины 25 осуществляют в следующей последовательности работ.



Первоначально, в случае наличия в основании 24 высокоскоростного фильтрационного потока, с бетонной плиты 26 путем нагнетания раствора в цементационные скважины 27 осуществляют укрепление грунта в границах 28. После чего на заданном расстоянии «а» друг от друга и в два ряда выполняют буровые скважины 3, в которых размещают наружные трубы 7, а зазоры 10 заполняют материалом 12.

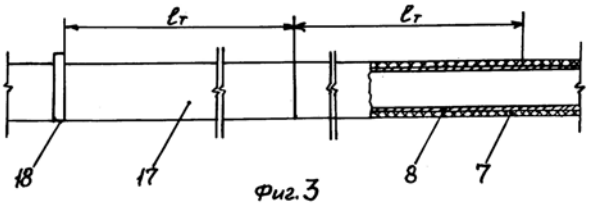
Дальнейшее наращивание наружных труб 7 осуществляют одновременно с послойным возведением по высоте тела плотины 25. При этом вокруг каждой наружной трубы 7 посредством короткой переставной обсадной трубы 29 образуют имеющий вид скважины (скважинообразный) канал 30, а зазор 10 заполняют материалом 12 заданной теплопроводности - повышенной.



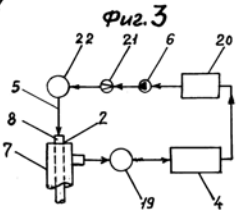
Фиг. 2

Обычно диаметр обсадной трубы dоб превышает диаметр буровой скважины dск, а концентрация частиц материала высокой теплопроводности в материале 12 по мере возведения по высоте плотины повышают.

После возведения плотины 25 на полную высоту с ее гребня 31 в наружную трубу 7 опускают внутреннюю трубу 8, снабженную по всей длине теплоизоляционным слоем (на фиг.5 теплоизоляционный слой не показан). Замораживающие колонки 2 заполняют жидким хладоносителем и их подсоединяют к оборудованию, обеспечивающему циркуляцию жидкого хладоносителя и его охлаждение.



Фиг. 3

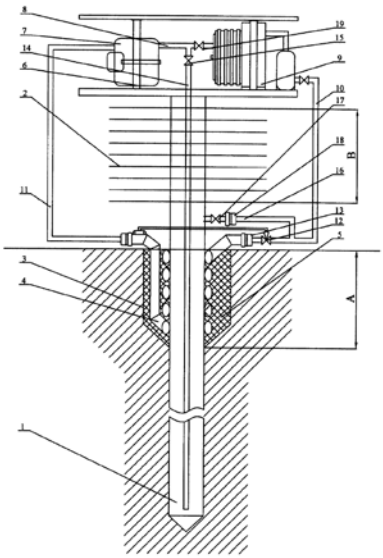


Фиг. 4

Работа таких замораживающих колонок 2 аналогична ранее описанной, а именно: при движении по теплоизолированной внутренней трубе 8 вниз в жидком хладоносителе 5 сохраняется низкая первоначальная температура, а при его движении вверх, вследствие заданного повышения теплопроводности материала заполнения 12 и увеличенной поверхности охлаждения грунта, происходит интенсивное и равномерное замораживание грунтов основания 24 и плотины 25 вокруг замораживающих колонок 2. В результате этого происходит качественное образование сплошной противофильтрационной ледогрунтовой стенки в границах 32, как в основании 24, так и в плотине 25.

Устройство для аккумуляции холода [27].

Устройство включает обсадную трубу, состоящую из испарителя 1, погруженного в грунт, и конденсатора 2, состоящего из конденсаторных зон А и В, вокруг конденсаторной зоны А смонтирована оболочка 3 с зазором, в котором расположен трубопровод 4, выполняющий роль испарителя и выполненный в виде трубки эллипсного сечения, плотно навитой на обсадную трубу, зазор в конденсаторной зоне А между трубопроводом 4 и оболочкой 3 заполнен теплоизоляцией 5. Устройство для аккумуляции холода содержит компрессорно-конденсаторный агрегат 6, состоящий из компрессора 7 с нагнетательным патрубком 8 и конденсатора 9, расположенный над конденсатором 2 на сплошном каркасе из светонепроницаемого материала, и соединенный нагнетательным трубопроводом 10 и отводящим трубопроводом 11 при помощи терморегулирующего вентиля 12 с помощью гермомуфт 13 с трубопроводом 4. Впускной трубопровод 14 расположен на всю длину обсадной трубы от нагнетательного патрубка 8 компрессора 7 компрессорно-конденсаторного агрегата 6 к испарителю 1 через зоны конденсации А и В конденсатора 2 и имеет вентиль 15. Выпускной трубопровод 16 с вентилем 17 и гермомуфтой 18 соединяет обсадную трубу с нагнетательным трубопроводом 10. Перед



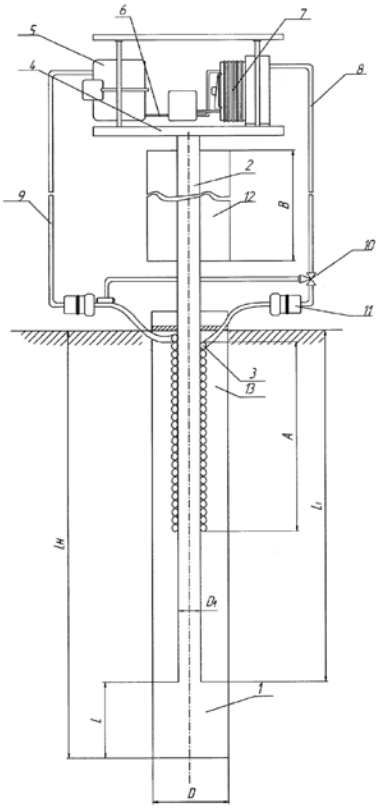
конденсатором 9 компрессорно-конденсаторного агрегата 6 установлен вентиль 19.

Устройство работает следующим образом.

С наступлением периода, когда среднесуточная температура наружного воздуха становится ниже 0°С, происходит охлаждение и замораживание грунта за счет циркуляции хладагента в испарителе обсадной трубы. Конденсация происходит в конденсаторной зоне В.

С наступлением периода, когда среднесуточная температура наружного воздуха становится выше 0°С, в обсадной трубе происходит повышение давления и циркуляция хладагента прекращается и включается компрессорно-конденсаторный агрегат 6. За счет циркуляции хладагента в компрессорно-конденсаторном агрегате 6 давление в обсадной трубе понижается. Хладагент из компрессорно-конденсаторного агрегата 6, расположенного над конденсатором 2, поступает в нагнетательный трубопровод 10, затем в конденсаторную зону А в трубопровод 4, выполненный в виде трубки эллипсного сечения, плотно навитой на конденсатор 2, где посредством теплообмена происходит конденсация хладагента, находящегося в конденсаторе 2, вокруг которого смонтирована оболочка 3 с зазором, а зазор между трубопроводом 4 и оболочкой 3 заполнен теплоизоляцией 5. Далее пары хладагента из трубопровода 4 поступают в отводящий трубопровод 11 и возвращаются в компрессорно-конденсаторный агрегат 6, где происходит их сжатие, конденсация, и через нагнетательный трубопровод 10 хладагент возвращается в конденсаторную зону А, и цикл повторяется.

Устройство для аккумуляции холода [28].



Устройство включает обсадную трубу, состоящую из испарителя 1, погруженного в грунт, и конденсатора 2, состоящую из конденсаторных зон А и В. Для обеспечения заморозки грунта на определенной глубине (не по всей длине) обсадной трубы, обсадная труба выполнена переходящим диаметром таким образом, что нижняя часть испарителя L выполнена диаметром D и расположена внизу обсадной трубы и входит непосредственно в контакт с грунтом, что позволяет вести дозированную заморозку грунта на нужной глубине, а оставшаяся часть испарителя L1, включая конденсаторные зоны А и В, выполнена диаметром D1, причем D>D1, а образовавшаяся разностью диаметров (D-D1) полость 13, заполнена воздухом, образуя воздушную прослойку, выполняющую роль теплоизоляции. В конденсаторной зоне А расположен трубопровод 3, выполняющий роль испарителя и выполненный в виде трубки эллипсного сечения, плотно навитой на обсадную трубу с диаметром D1. Устройство для аккумуляции холода содержит компрессорно-конденсаторный агрегат 4, состоящий из компрессора 5 с нагнетательным патрубком 6 и конденсатора 7, расположенный над конденсатором 2 на сплошном каркасе из светонепроницаемого материала и соединенный нагнетательным трубопроводом 8 и отводящим трубопроводом 9 при помощи терморегулирующего вентиля 10 с помощью гермомуфт 11 с трубопроводом 3.

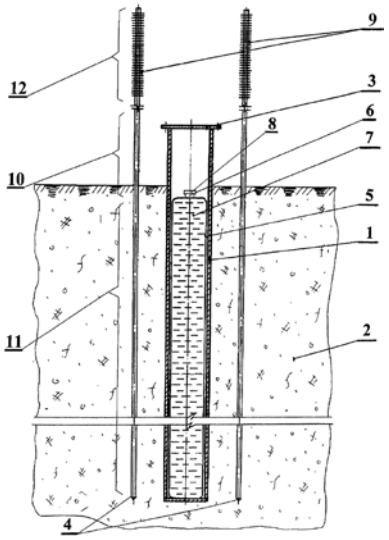
Устройство работает следующим образом.

С наступлением периода, когда среднесуточная температура наружного воздуха становится ниже 0°С, происходит охлаждение и замораживание грунта за счет циркуляции хладагента в испарителе обсадной трубы. Конденсация происходит в конденсаторной зоне В, конденсатор 2 имеет продольное наружное оребрение 12 для увеличения площади поверхности теплообмена. Хладагент кипит в испарителе 1, поднимается по обсадной трубе с диаметром D1 до конденсаторной зоны В, где конденсируется и в виде пленки стекает по стенкам этой же трубы в испаритель 1, далее цикл повторяется.

С наступлением периода, когда среднесуточная температура наружного воздуха становится выше 0°С, в обсадной трубе происходит повышение давления и циркуляция хладагента прекращается и включается компрессорно-конденсаторный агрегат 4.

Свайная опора для сооружений, возводимых на вечномерзлом грунте [29].

Охлаждаемая свайная опора, представленная на чертеже, включает в себя погруженный в грунт 2 металлический или железобетонный трубчатый ствол 1, закрытый снизу и снабженный в верхней части фланцем 3. Последний является опорной площадкой для установки элементов конструкции возводимого сооружения, например фермы линии электропередачи. Сбоку от трубчатого ствола 1 установлена, по крайней мере, одна гравитационная тепловая труба 4, являющаяся охлаждающим устройством сезонного действия. В случае когда возводимое сооружение устанавливается на нескольких свайных опорах, одна и та же тепловая труба, установленная между соседними свайными опорами, «обслуживает» обе эти опоры, так что количество тепловых труб, приходящихся в среднем на одну свайную опору, может оказаться не более одной.



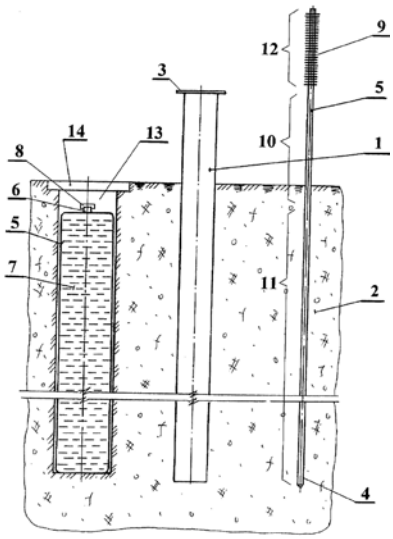
В трубчатом стволе 1 размещена герметичная эластичная емкость - сосуд 5, заполненный через заправочную горловину 6 водой 7. Горловина 6 герметизируется с помощью крышки 8. Перед установкой емкости 5 в трубчатый ствол 1 она может быть заключена в жесткий каркас (на чертеже не показан), который может быть выполнен в виде опалубки или металлической либо пластмассовой трубы. Емкость 5 благодаря эластичности ее материала (например, резины или пластмассы) принимает форму внутренней поверхности стенки трубчатого ствола 1 или согласованную с нею форму каркаса и предохраняется от разрыва при затвердевании воды 7.

Верхняя часть гравитационной тепловой трубы 4 имеет оребрение 9 и служит воздушным теплообменником и конденсатором для теплоносителя, заправленного в тепловую трубу 4. Нижняя часть тепловой трубы 4 находится в грунте и является зоной испарения 11. Тепло грунта воспринимается испарителем, переносится паром хладагента наверх в зону конденсации 12 через транспортную зону 10 и отдается окружающему воздуху, омывающему оребрение 9.

Предлагаемая свайная опора работает и используется следующим образом. В холодный период года тепловые трубы 4 перекачивают теплоту грунта в окружающий воздух, грунт 2 и вода 7 в емкости 5 охлаждаются и затвердевают. При этом скрытая теплота замерзания воды также переносится в воздух. Затем происходит дальнейшее охлаждение грунта и льда в емкости 5 с понижением температуры. В теплое время года тепловые трубы 4 сезонного действия не работают. Под действием внешних климатических факторов и теплоподвода от сооружения, в составе которого используется свайная опора, происходит отепление грунта и свайной опоры. Однако таяние льда в емкости 5, сопровождающееся поглощением большого количества поступающей извне теплоты, способствует увеличению продолжительности перехода грунта вокруг свайной опоры в незамороженное состояние.

Охлаждаемая свайная опора для сооружений, возводимых на вечномерзлом грунте [30].

Охлаждаемая свайная опора, представленная на чертеже, включает в себя погруженный в грунт 2 металлический или железобетонный ствол 1, закрытый снизу и снабженный в верхней части фланцем 3. Последний является опорной площадкой для установки элементов конструкции возводимого сооружения, например фермы линии электропередачи. Ствол 1 может быть как полым, так и монолитным. По бокам от ствола 1 установлены, по крайней мере, одна гравитационная тепловая труба 4, являющаяся охлаждающим устройством сезонного действия, и выполнена, по крайней мере, одна вертикальная скважина 13, закрытая крышкой 14.



В скважине 13 размещена герметичная эластичная емкость-сосуд 5, заполненный через заправочную горловину 6 водой 7. Горловина 6 герметизируется с помощью крышки 8. Перед установкой емкости 5 в скважину 13 она может быть заключена в жесткий футляр (на чертеже не показан), который может быть выполнен в виде опалубки или металлической либо пластмассовой трубы. Емкость 5 благодаря эластичности ее материала (например, резины или пластмассы) принимает форму внутренней поверхности стенки скважины 13 или согласованную с нею форму футляра и предохраняется от разрыва при замерзании воды 7.

Верхняя часть гравитационной тепловой трубы 4 имеет оребрение 9 и служит воздушным теплообменником и конденсатором для теплоносителя, заправленного в тепловую трубу 4. Нижняя часть тепловой трубы 4 находится в грунте и является зоной испарения 11. Тепло грунта воспринимается испарителем, переносится паром хладагента наверх в зону конденсации 12 через транспортную зону 10 и отдается окружающему воздуху, омывающему оребрение 4.

Предлагаемая свайная опора работает и используется следующим образом. В холодный период года тепловая труба 4 перекачивает теплоту грунта в окружающий воздух, грунт 2 и вода 7 в емкости 5 охлаждаются и затвердевают. При этом скрытая теплота затвердевания воды также переносится в воздух. Затем происходит дальнейшее охлаждение грунта и льда в емкости 5 с понижением температуры. В теплое время года тепловая труба 4 сезонного действия не работает.

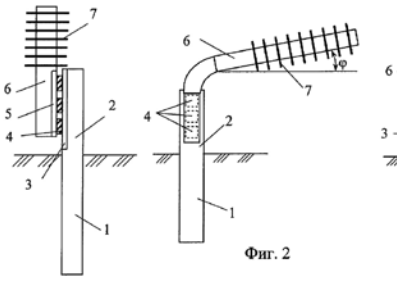
Устройство для стабилизации пластично-мерзлых грунтов с круглогодичным режимом работы [31].

Изобретение поясняется чертежами, где на фиг.1 изображено устройство с вертикально рас-

положенной зоной конденсации тепловой трубы, причем зона конденсации имеет ребристую поверхность для обеспечения воздушного охлаждения с помощью свободной конвекции; на фиг.2 изображено устройство с тепловой трубой, зона конденсации которой расположена под углом φ к горизонту; на фиг.3 изображено устройство с горизонтально расположенной зоной конденсации тепловой трубы, снабженной радиаторами, с установленными на них вентиляторами.

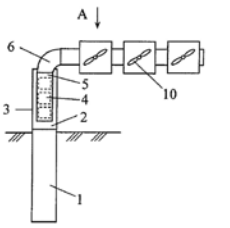
На фиг.1 изображено устройство для стабилизации пластично-мерзлых грунтов с круглогодичным режимом работы, содержащее подземную 1 и надземную 2 части трубчатого герметичного корпуса, заполненного хладагентом. Подземная часть 1 является испарителем, а надземная часть 2 - конденсатором. Конденсатор снабжен полкой 3, на которую устанавливаются холодной стороной термоэлектрические модули 4 в виде батареи элементов Пельтье. К горячей стороне термоэлектрических модулей подсоединяется полкой 5 зона испарения тепловой трубы 6, зона конденсации которой имеет ребра 7 и расположена вертикально, что соответствует значению угла φ, равному 90°.

На фиг.2 изображено устройство для стабилизации пластично-мерзлых грунтов с круглогодичным режимом работы, содержащее подземную 1 и надземную 2 части трубчатого герметичного корпуса, заполненного хладагентом. Подземная часть 1 является испарителем, а надземная часть 2 - конденсатором. Конденсатор снабжен полкой 3, на которую устанавливаются холодной стороной термоэлектрические модули 4 в виде батареи элементов Пельтье. К горячей стороне термоэлектрических модулей подсоединяется полкой 5 зона испарения тепловой трубы 6, зона конденсации которой имеет ребра 7 и расположена под углом φ к горизонтальной плоскости.

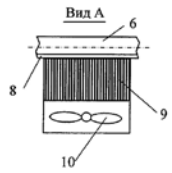


Фиг. 1

Фиг. 2



Фиг. 3



На фиг.3 изображено устройство для стабилизации пластично-мерзлых грунтов с круглогодичным режимом работы, содержащее подземную 1 и надземную 2 части трубчатого герметичного корпуса, заполненного хладагентом. Подземная часть 1 является испарителем, а надземная часть 2 - конденсатором. Конденсатор снабжен полкой 3, на которую устанавливаются холодной стороной термоэлектрические модули 4 в виде батареи элементов Пельтье. К горячей стороне термоэлектрических модулей подсоединяется полкой 5 зона испарения тепловой трубы 6, зона конденсации которой расположена горизонтально, что соответствует значению угла φ, равному 0°, и снабжена полкой 8, на которой расположены радиаторы 9, с установленными на них вентиляторами 10.

Устройство работает следующим образом.

В теплый период года, когда среднесуточная температура воздуха станет выше температуры грунта, включают термоэлектрические модули 4, и понижение температуры на поверхности полок 3 конденсатора 2 обеспечивает работу испарительно-конденсационного цикла хладагента и понижение температуры испарителя 1 и прилегающих к нему слоев грунта. Тепло, выделяющееся на горячей поверхности термоэлектрических модулей 4, передается из зоны испарения тепловой трубы 6 в зону конденсации тепловой трубы и с нее рассеивается в окружающую среду свободной конвекцией с ребер 7 (в первом варианте исполнения устройства) или с помощью вентиляторов 10, устанавливаемых на радиаторах 9 (во втором варианте исполнения устройства).

Система для температурной стабилизации основания сооружений на вечномерзлых грунтах [32].

Сущность заявляемого изобретения поясняется примером конкретного выполнения, и чертежами, где

-на фиг.1 схематично изображена система для температурной стабилизации основания сооружений на вечномерзлых грунтах;

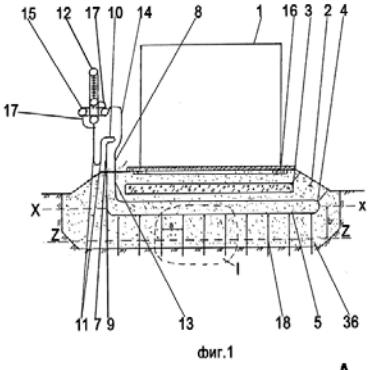
- на фиг.2 схематично изображен увеличенный узел I испаритель, выполненный в виде системы труб, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания, подводящий теплоноситель с вертикальными теплообменниками-испарителями;

- на фиг.3 - то же, разрез фиг.2 по А-А;

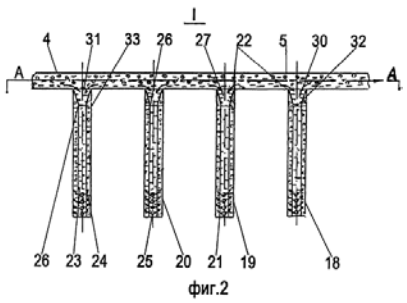
- на фиг.4 - испаритель, выполненный в виде системы труб, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания, в виде плоского змеевика;

- на фиг.5 - разрез фиг.4 по В-В;

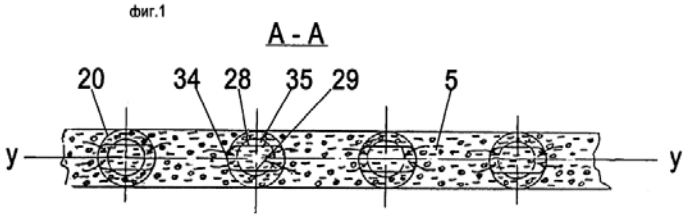
Система для температурной стабилизации основания сооружения 1 на вечномерзлых грунтах состоит из отсыпки грунта основания 2, в которой под слоем теплоизоляции 3, качестве которой используют экструзионный полистирол марки «URSA», расположен испаритель 4, который выполнен в виде системы труб 5, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2 в виде плоского змеевика 6 (или спирали Архимеда). Испаритель 4, выполненный в виде системы труб 5, связан с трубопроводами 7 и 8, соответственно, подводящих и отводящих теплоноситель и соединен своим подводящим концом 9 через гидрозатвор 10 и опуск-



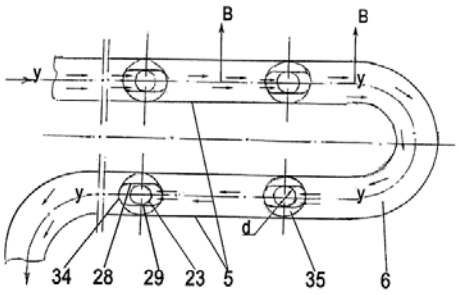
фиг.1



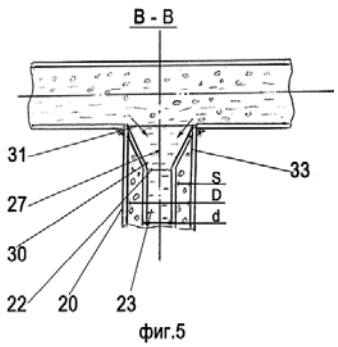
фиг.2



фиг.3



фиг.4



фиг.5

ные вертикальные трубы 11 подводящего трубопровода 7 с конденсатором воздушного охлаждения 12, а отводящим концом 13 через подъемную вертикальную трубу 14 отводящего трубопровода 8 - соединен с уравнительным сосудом 15. Сооружение 1 опирается на фундаментное кольцо 16. Конденсатор воздушного охлаждения 12 соединен при помощи верхней соединительной трубы 17 с уравнительным сосудом 15, который при помощи нижней соединительной трубы 17 связан с опускной вертикальной трубой 11. В отсыпке грунта основания 2 по всей ее глубине - расстоянию «в» от отметки осевой линии Х-Х заложения в горизонтальной плоскости - границы глубины залегания испарителя 4, который выполнен в виде системы труб 5, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2, и верхней границей залегания вечномерзлых грунтов «Z-Z», размещены в вертикальном направлении вертикальные теплообменники-испарители 18, выполненные по типу труба в трубе. Нижние концы 19 наружных труб 20 вертикальных теплообменников-испарителей 18 заглушены с помощью заглушек 21, а верхние концы 22 наружных труб 20 вертикальных теплообменников-испарителей 18 соединены с испарителем 4, который выполнен в виде системы труб 5, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2 в виде плоского змеевика 6. Внутри наружных труб 20 концентрично установлены циркуляционные внутренние трубы 23, выполненные из теплоизоляционного материала, в качестве которого используют венипласт-текст. Нижняя часть 24 циркуляционных внутренних труб 23 вертикальных теплообменников-испарителей 18 выполнена с перфорационными отверстиями 25, а верхняя часть 26 циркуляционных внутренних труб 23 вертикальных теплообменников-испарителей 18 выполнена в виде приемной воронки 27, уплощенной с двух сторон 28 и 29, вертикальными плоскостями, параллельными вертикальной плоскости, проходящей через ось У-У. Приемная воронка 27 представляет собой в разрезе вертикальной плоскостью по оси У-У равнобедренную трапецию 30, верхнее основание 31 которой равно внутреннему диаметру «D» наружной трубы 20, а нижнее основание 32 равнобедренной трапеции 30 равно диаметру «d» циркуляционных внутренних труб 23 вертикального теплообменника-испарителя 18. Циркуляционные внутренние трубы 23 вертикального теплообменника-испарителя 18, выполненные из теплоизоляционного материала, имеют гарантированный кольцевой зазор «s» с внутренней поверхностью 33 наружных труб 20. Циркуляционные внутренние трубы 23 обеспечивают подачу холодного конденсата теплоносителя к нижним концам 19 - в нижнюю часть наружных труб 20, благодаря гарантированному затеканию его в приемные воронки 27. Закругленные кромки 34 воронки 27, образованные прямолинейными сторонами 28 и 29 воронки 27, плотно без зазора входят вовнутрь наружной трубы 20, а прямолинейные стороны 28 и 29 воронки 27 с внутренней стенкой 33 наружной трубы 20 образуют зазоры 35, для беспрепятственного прохождения кипящего парожидкостного потока в испаритель 4, выполненный в виде системы труб 5, уложенных в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2 в виде змеевика 6. Высота каждого из вертикальных теплообменников-испарителей 18 учитывается из того, что она должна быть не менее, т.е. более расстояния «в» от отметки осевой линии Х-Х заложения в горизонтальной плоскости - границы глубины залегания испарителя 4, который выполнен в виде системы труб 5, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2 и верхней границей «Z-Z» залегания вечномерзлых грунтов. Расстояние «а» между вертикальными теплообменниками-испарителями 17 принималось расчетным путем, с учетом условий замораживания подстилающего грунта 36 за один зимний сезон.

Система для температурной стабилизации основания сооружений на вечномерзлых грунтах

работает следующим образом.

После монтажа и проверки на герметичность систему для температурной стабилизации основания сооружений на вечномерзлых грунтах заполняли теплоносителем - легкокипящей жидкостью, в частности аммиаком, в объеме, равном внутреннему объему всех вертикальных теплообменников-испарителей 18. При наступлении отрицательных температур наружного воздуха давление паров аммиака в объеме конденсатора воздушного охлаждения 12 становится ниже равновесного давления, соответствующего температуре кипения теплоносителя - аммиака в вертикальных теплообменниках-испарителях 18, т.к. в них температура аммиака соответствует температуре теплого грунта, т.е. она выше, чем в конденсаторе воздушного охлаждения 12 и за счет этого создается температурный напор для кипения аммиака в вертикальных теплообменниках-испарителях 18 и конденсации его паров в конденсаторе воздушного охлаждения 12. Пары кипящего аммиака в вертикальных теплообменниках-испарителях 18 устремляются непосредственно в испаритель 4, который выполнен в виде системы труб 5, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2, и под напором столба жидкого аммиака в гидрозатворе 10 и опускных трубах 11 движутся вместе с захваченными каплями жидкости по испарителю 4, который выполнен в виде системы труб 5, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2, а затем по подъемной вертикальной трубе 14 в уравнительный сосуд 15. В уравнительном сосуде 15 парожидкостная смесь разделяется на пар и жидкость. Пар из уравнительного сосуда 15 по верхней трубе 17 поступает в конденсатор воздушного охлаждения 12, откуда образующаяся в результате конденсации пара жидкость самотеком попадает в опускные трубы 11 и гидрозатвор 10 и, далее, по трубопроводу 7 теплоноситель поступает к подводящему концу 9 испарителя 4, который выполнен в виде системы труб 5, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2. В это же самое время отсепарированная в уравнительном сосуде 15 жидкость по нижней соединительной трубе 17 поступает также в опускные трубы 11 и, далее, по трубопроводу 7 теплоноситель поступает к подводящему концу 9 испарителя 4, который выполнен в виде системы труб 5, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2. Таким образом, жидкий аммиак, поступая в подводящий теплоноситель испаритель 4, который выполнен в виде системы труб 5, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2 и, далее, в вертикальные теплообменники-испарители 18, замыкает циркуляционный холодильный цикл, благодаря которому осуществляется перенос тепла от отсыпки грунта основания 2 к окружающему воздуху более низкой температуры, что позволяет снизить себестоимость температурной стабилизации оснований сооружений на вечномерзлых грунтах и тем самым повысить эксплуатационные качества предлагаемой системы, обеспечивающей замораживание подсыпки и подстилающего грунта, находящегося под ней до границы залегания мерзлоты с использованием ресурса естественного холода, что также позволяет надежно и экономически выгодно укрепить несущую способность фундамента основания. Эффективная работа вертикальных теплообменников-испарителей 18 согласно предлагаемому изобретению обеспечивается за счет соответствующего исполнения элементов каждого вертикального теплообменника-испарителя 18, поскольку процесс эффективного отвода тепла от охлаждаемого грунта может быть обеспечен лишь за счет снижения температуры легкокипящего теплоносителя по всей высоте теплообменника-испарителя 18, а снижение температуры теплоносителя вплоть до отрицательных по всей высоте вертикального теплообменника-испарителя 18 может быть обеспечено лишь за счет хорошего перемешивания восходящего кипящего потока теплоносителя в кольцевом зазоре «s» между внутренней поверхностью 33 наружных труб 20 и циркуляционными внутренними трубами 23 и доставкой нисходящего холодного потока конденсата теплоносителя из испарителя 4, который выполнен в виде системы труб 5, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2, в нижнюю часть 20 вертикального теплообменника-испарителя 18. Именно наличие в верхней части 26 циркуляционной внутренней трубы 23 в виде приемной воронки 27, уплощенной с двух сторон 28 и 29 вертикальными плоскостями, параллельными вертикальной плоскости, проходящей по оси У-У и представляющей собой в разрезе вертикальной плоскостью по оси У-У равнобедренную трапецию 30, верхнее основание 31 которой равно внутреннему диаметру «D» наружной трубы 20, а нижнее основание 32 равно диаметру «d» циркуляционной внутренней трубы 23, позволяет направить большую часть холодного конденсата в нижнюю часть вертикального теплообменника-испарителя 18 без перемешивания с теплым восходящим парожидкостным потоком в верхней части межтрубного пространства - кольцевого зазора «s» и, тем самым, существенно понизить температуру нижних слоев теплоносителя. Уплощенная с двух сторон 28 и 29 приемная воронка 27 направлена вдоль горизонтальной оси каждой трубы 5 испарителя 4, выполненного в виде системы труб 5, уложенных в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2 в виде змеевика 6. Закругленные кромки 34 воронки 27, образованные прямолинейными сторонами 28 и 29 воронки 27, плотно без зазора входящие вовнутрь наружной трубы 20, и прямолинейные стороны 28 и 29 воронки 27 с внутренней стенкой 33 наружной трубы 20, образующие зазоры 35 для беспрепятственного прохождения кипящего парожидкостного потока в испаритель 4, выполненный в виде системы труб 5, уложенных в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания

2, и обеспечивают надежную и эффективную температурную стабилизацию оснований сооружений на вечномерзлых грунтах за счет прохода конденсата теплоносителя в циркуляционную внутреннюю трубу 23 и выхода кипящего парожидкостного потока теплоносителя через зазоры 35. Таким образом, холодный конденсат сразу же без перемешивания затекает в воронку 27 и далее устремляется за счет сил гравитации по циркуляционной внутренней трубе 23 в ее нижнюю часть к перфорационным отверстиям 25, в то же время, в направлении зазора 35, образованного прямолинейными сторонами 28 и 29 воронки 27 с внутренней стенкой 33 наружной трубы 20, беспрепятственно проходит кипящий парожидкостный поток в горизонтальный, подводящий теплоноситель, испаритель 4, выполненный в виде системы труб 5, уложенных в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2, т.е. сливающийся холодный конденсат через перфорированные отверстия 25 в нижней части циркуляционной внутренней трубы 23 отдельными струями равномерно втекает в кольцевой зазор «s», способствуя тем самым равномерному снижению температуры теплоносителя по всей высоте вертикального испарителя, причем доставка более холодного конденсата к перфорационным отверстиям 25 циркуляционной трубы 23 обеспечивается за счет изготовления циркуляционной внутренней трубы из теплоизоляционного материала.

Система для температурной стабилизации основания сооружений на вечномерзлых грунтах [33].

На фиг.1 схематично изображена система для температурной стабилизации основания сооружений на вечномерзлых грунтах;

- на фиг.2 схематично изображен увеличенный узел I - уравнительный сосуд с патрубком опускных труб;

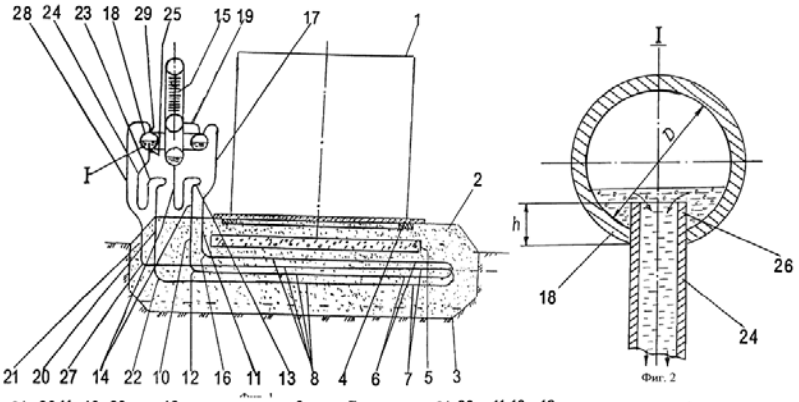
- на фиг.3 - испаритель, выполненный в виде системы труб, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания, в виде плоского змеевика;

- на фиг.4 - то же испаритель, выполненный в виде системы труб, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания, в виде спирали Архимеда.

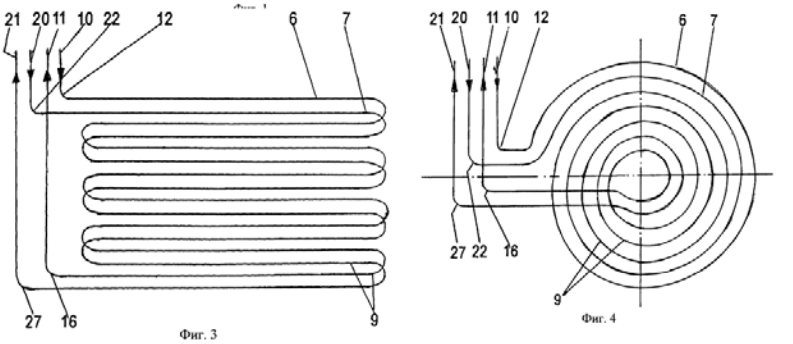
Система для температурной стабилизации основания сооружения 1 на вечномерзлых грунтах состоит из отсыпки грунта основания 2 из непросадочного при оттаивании материала, которая уложена в основании сооружения 1 на вечномерзлом грунте 3. Сооружение 1 опирается на фундаментное кольцо 4, под которым в непосредственной близости уложен слой эффективной теплоизоляции 5, в качестве которой используют экструзионный полистирол марки «URSA», под слоем которой расположены испарители 6 и 7, основной и дополнительный, соответственно каждый из которых выполнен в виде системы труб 8, уложенной в горизонтальной плоскости равномерно по всей площади отсыпки грунта основания 2 в виде плоского змеевика 9 (или спирали Архимеда) таким образом, что витки трубы одного испарителя находятся в промежутке между витками трубы другого испарителя. Форма укладки труб испарителей зависит от типа сооружения. Для прямоугольной формы сооружения в плане используется змеевиковая укладка, для цилиндрических сосудов - спиральная. Основной испаритель 6, выполненный в виде системы труб 8, связан с трубопроводами 10 и 11 соответственно подводящих и отводящих теплоноситель. Своим подводящим концом 12 через гидрозатвор 13 и опускные вертикальные трубы 14 подводящего трубопровода 10 основной испаритель 6 связан с конденсатором воздушного охлаждения 15, выполненным в виде аппарата воздушного охлаждения с естественным обдувом его оребренной части окружающим воздухом, а отводящим концом 16 через подъемную вертикальную трубу 17 отводящего трубопровода 11 основной испаритель 6 соединен с верхней точкой уравнительного сосуда 18, который связан при помощи верхней соединительной трубы 19 с конденсатором воздушного охлаждения 15. Дополнительный испаритель 7 соединен с системой трубопроводов 20 и 21 соответственно подводящих и отводящих теплоноситель. Своим подводящим концом 22 через гидрозатвор 23 дополнительный испаритель 7 соединен посредством опускных вертикальных труб 24 с нижней точкой 25 уравнительного сосуда 18, при этом приемный патрубок 26 опускной трубы 24 имеет высоту «h», равную 1/3 диаметра «D» уравнительного сосуда 18. Дополнительный испаритель 7 своим отводящим концом 27 посредством подъемной вертикальной трубы 28 отводящего трубопровода 21 связан с верхней точкой 29 уравнительного сосуда 18.

Система для температурной стабилизации основания сооружений на вечномерзлых грунтах работает следующим образом.

После монтажа и испытаний на герметичность из конденсатора воздушного охлаждения 15 сливается в основной испаритель 6 легкокипящий теплоноситель, например аммиак, в объеме, равном внутреннему объему труб основного испарителя 6. Так при общей длине трубопроводов 10 и 11 основного испарителя 6, равной 1000 м, и их внутреннем диаметре 32 мм количество аммиака в основном испарителе составит 334 кг. Работа системы осуществляется в конце осени и в зимнее время года, когда температура окружающего воздуха становится существенно ниже температуры отсыпки. В этом случае давление паров аммиака в конденсаторе воздушного охлаждения 15 становится ниже равновесного давления, соответствующего температуре кипения аммиака в трубах 8 основного испарителя 6. В результате этого теплоноситель-аммиак в основном испарителе 6 закипает и его пары с брызгами жидкости под напором столба жидкого аммиака в гидрозатворе 13



Фиг. 2



Фиг. 3 Фиг. 4

и подводящему теплоноситель трубопроводу 10 движутся по трубам основного испарителя 6 в отводящий теплоноситель трубопровод 11 и через вертикальную трубу 17 в виде парожидкостной смеси теплоноситель поступают далее в уравнительный сосуд 18, где смесь разделяется на жидкость и пар, который по трубопроводу 19 поступает в конденсатор воздушного охлаждения 15, откуда образующаяся в результате конденсации жидкость-конденсат по опускной трубе 14, через гидрозатвор 13 и подводящий трубопровод 10 самотеком подается в основной испаритель 6, замыкая, таким образом, циркуляционный холодильный цикл, благодаря которому осуществляется перенос тепла от подсыпки к окружающему воздуху. Унесенная паром жидкость до поры до времени накапливается в нижней части уравнительного сосуда 18. Включение в работу циркуляционного контура, содержащего основной испаритель 6 на начальных этапах замораживания грунта, сопровождается значительными тепловыми потоками от грунта в основной испаритель 6 и дополнительный испаритель 7, в результате чего в контуре наблюдаются существенные скорости циркуляции как жидкой, так и паровой фаз за счет большого процентного содержания паровой смеси. В результате этого в уравнительном сосуде 18 накапливается жидкий аммиак, и уровень его постепенно растет и достигает торца приемного патрубка 26 опускной трубы 24, находящейся в контуре дополнительного испарителя 7. При достижении уровня жидкости в уравнительном сосуде 18 торца входящего в уравнительный сосуд приемного патрубка 26 опускной трубы 24 возникает самотечное движение жидкого аммиака по опускной трубе 24, гидрозатвору 23 и подводящей трубе 20 в дополнительный испаритель 7. С этого момента в работу по охлаждению грунта включается дополнительный испаритель 7 по аналогии с работой основного испарителя 6. Включение в работу дополнительного испарителя способствует повышению эффективности замораживания основания сооружения, т.к. увеличивается теплосъем с единицы площади основания. Это является чрезвычайно важным для быстрого восстановления мерзлотного режима основания после летнего растепления. По мере захолаживания основания тепловой поток от грунта к испарителям 6 и 7 снижается, уменьшается скорость циркуляции потока теплоносителя в контурах, а значит, уменьшается и вынос жидкой фазы в уравнительный сосуд 18. В результате этого уровень жидкости в уравнительном сосуде 18 снижается и в определенный момент в переливной патрубок 26 опускной трубы 24 жидкий теплоноситель перестает поступать и циркуляция теплоносителя в дополнительном испарителе 7 прекращается, т.е. в работе остается только контур с основным испарителем 6. Таким образом постановка дополнительного испарительного контура параллельно основному позволяет получить дополнительный захолаживающий эффект без дополнительных затрат теплоносителя, т.к. дополнительный испарительный контур работает на «излишках» теплоносителя основного контура, которые образуются на начальной стадии захолаживания основания сооружения. Следует отметить, что работа дополнительного испарительного контура осуществляется в режиме автоматического саморегулирования - есть «излишки» теплоносителя, то контур работает, нет «излишек» теплоносителя - контур не работает.

Выводы

В работе проведен обзор и системный анализ устройств для термостабилизации грунтов. Результаты обзора показали высокую эффективность применения термостабилизаторов. Термостабилизаторы позволяют регулировать температуру грунтов. Так, например, можно понизились в 2—4 раза температуру грунта и обеспечить необходимую надежность фундаментов. Опыт показывает, что общий положительный эффект подтверждался практически полным отсутствием нештатных ситуаций по причине отказа фундаментов на большей части инженерных сооружений. Применение искусственного охлаждения грунтов оснований позволяет существенно снизить сроки строительства сооружения, а также металлоемкость фундаментов за счет уменьшения длины и количества свай. Экономическая эффективность новых фундаментов, в зависимости от типа сооружения составляет 10—30% по сравнению с традиционно применяемыми.

Список литературы

1. Патент №1149662, кл. 6 E 02 D 3/115. Устройство для охлаждения и замораживания грунта / В.П. Казаков. Заявл. 03.11.1982, №3507901/33. Опубл. 27.05.1996 Бюл. №15.

2. Патент №1674591, кл. 6 E 02 D 3/115. Воздушно-конвективная термосвая / Г.М. Долгих, Ю.Г. Ершов, К.Ф. Отт. Заявл. 23.10.1989, №4751573/33. Опубл. 20.11.95 Бюл. №32.

3. Патент №1558060, кл. 6 E 02 D 3/115. Термосвая / Г.М. Долгих, Г.П. Клюшин, В.М. Нелепченко. Заявл. 17.03.88, №4391719/33. Опубл. 10.12.95 Бюл. №34.

4. Патент №816213, кл. 6 E 02 D 3/115 / / E 02 D 17/18. Способ замораживания грунтовых сооружений, возводимых на вечномерзлых грунтах / А.А. Цернант. Заявл. 11.11.79, №2837687/33. Опубл. 27.03.96 Бюл. № 9.

5. Патент №1167918, кл. 6 E 02 D 3/115. Способ аккумуляции холода в грунте основания / С.И. Гапеев, В.С. Гапеев. Заявл. 23.01.90, №4805598/33. Опубл. 27.08.95 Бюл. № 24.

6. Патент №1759050, кл. 6 E 02 D 3/115. Устройство для аккумуляции холода в грунтах / В.В. Пассек, Н.А. Цуканов, Л.В. Гаврилова. Заявл. 31.01.84, №3698012/33. Опубл. 10.10.95 Бюл. № 28.

7. Патент №1759052, кл. 6 E 02 D 3/115. Устройство для охлаждения грунта / А.А. Коновалов. Заявл. 23.10.90, №4876944/33. Опубл. 10.10.96 Бюл. № 28.

8. Патент №2036271, кл. 6 E 02 D 3/115. Термосифон / В.К. Мауль. Заявл. 01.07.92, №5050807/33. Опубл. 27.05.95 Бюл. № 15.

9. Патент №2039860, кл. 6 E 02 D 3/115, 27/35. Устройство для охлаждения и противоэрозионной защиты от атмосферных осадков грунтового основания зданий / П. Н. Луговой, В. Е. Яковлев. Заявл. 08.01.92, №5020634/33. Опубл. 20.07.95 Бюл. № 20.

10. Патент №2039861, кл. 6 E 02 D 3/115. Способ аккумуляции холода в грунте / Ф.С. Попов. Заявл. 03.04.92, №5046792/33. Опубл. 20.07.95 Бюл. № 20.

11. Патент №2079604, кл. 6 E 02 D 3/115. Устройство для замораживания грунта / С. А. Чисник, Б. И. Кислов, А. Л. Лязгин, С. В. Остробородов, К. П. Шевцов, С. И. Занятин. Заявл. 18.04.95, №95106004/03. Опубл. 20.05.97 Бюл. № 14.

12. Патент №2083762, кл. 6 E 02 D 3/115. Устройство для охлаждения и замораживания грунта / С. А. Чисник, Б. И. Кислов, А. Л. Лязгин, С. В. Остробородов, К. П. Шевцов, К. А. Мешбанк. Заявл. 18.04.95, №95106005/03. Опубл. 10.07.97 Бюл. № 19.

13. Патент №2109878, кл. 6 E 02 D 3/115. Установка для замораживания грунта / В. Е. Финько. Заявл. 04.06.96, №96111196/03. Опубл. 27.04.98 Бюл. № 12.

14. Патент №2110647, кл. 6 E 02 D 3/115, 19/14. Устройство для охлаждения грунта / А.А. Цернант, Н.А. Ефремов, А.В. Соколов, Н.Г. Богданов. Заявл. 02.09.96, №96117826/03. Опубл. 10.05.98 Бюл. № 13.

15. Патент №2117096, кл. 6 E 02 D 3/115. Устройство для замораживания грунта / А.В. Горностаев, А.А. Колесов. Заявл. 25.04.97, №97107499/03. Опубл. 10.08.98 Бюл. № 22.

16. Патент №2145989, кл. 7 E 02 D 3/115. Устройство для аккумуляции холода в основании сооружений / А.В. Березин, А.Ф. Мельшанов, А.Г. Клемяшов, Р.М. Баясан, А.Г. Коротченко, В.А. Жигулев, М.С. Федоров. Заявл. 17.05.1999, №99110000/03. Опубл. 27.02.2000 Бюл. № 6.

17. Патент №2149240, кл. 7 E 02 D 3/115. Устройство для зонального азотного замораживания грунтов / В.Н. Александров, Ю.А. Филонов, В.А. Маслак, В.А. Марков, Ю.Ф. Герусов, Л.М. Барсуков, М.О. Райнус. Заявл. 24.06.1998, №98112957/03. Опубл. 20.05.2000 Бюл. № 14.

18. Патент №2164272, кл. 7 E 02 D 3/115. Термоустройство для охлаждения и замораживания грунта / Г.И. Шемелин, А.Л. Лязгин, Р.М. Баясан, С.В. Остробородов, К.П. Шевцов, Г.П. Пустовойт, О.И. Романовский. Заявл. 27.01.1998, №98101472/03. Опубл. 20.03.2001 Бюл. № 8.

19. Патент №2164273, кл. 7 E 02 D 3/115. Термоустройство для охлаждения и замораживания грунта / Г.И. Шемелин, А.Л. Лязгин, Р.М. Баясан, С.В. Остробородов, К.П. Шевцов, Г.П. Пустовойт, О.И. Романовский. Заявл. 27.01.1998, №98101536/03. Опубл. 20.03.2001 Бюл. № 8.

20. Патент №2164274, кл. 7 E 02 D 3/115. Устройство для охлаждения и замораживания грунта / Г.И. Шемелин, А.Л. Лязгин, Р.М. Баясан, С.В. Остробородов, К.П. Шевцов, Г.П. Пустовойт, А.Д. Лобанов. Заявл. 27.01.1998, №98101547/03. Опубл. 20.03.2001 Бюл. № 8.

21. Патент №2168584, кл. 7 E 02 D 3/115. Устройство для аккумуляции холода / А.А. Волков, А.Н. Кабаков, В.А. Максименко. Заявл. 26.07.1999, №99115938/03. Опубл. 10.06.2001 Бюл. № 16.

22. Патент №2231595, кл. 7 E 02 D 3/115. Стабилизатор для пластично-мерзлых грунтов с круглогодичным режимом работы / М.А. Минкин, В.И. Гвоздик, В.И. Мощенко, А.М. Стругов. Заявл. 01.10.2002, №2002125962/03. Опубл. 27.06.2004 Бюл. № 18.

23. Патент №2235827, кл. 7 E 02 D 3/115, E 21 D 1/12. Способ замораживания грунтов при строительстве подземных сооружений / М.Н. Шуплик, В.А. Плохих, К.П. Никифоров, В.Н. Киселев, В.Н. Борисенко. Заявл. 28.03.2003, №2003108431/03. Опубл. 10.09.2004 Бюл. № 25.

24. Патент №2256746, кл. 7 E 02 D 3/115. Способ охлаждения грунта и тепловая свая для его охлаждения / Г.И. Овечкин, В.В. Двирный, А.В. Леканов, В.И. Халиманович, А.В. Томчук, А.Г. Козлов, Г.Д. Кесельман, В.Ф. Шевердов, М.И. Синиченко, Н.Ф. Чикаров, С.П. Ермилов, В.В. Христич, В.Н. Смирных, С.А. Чернявский, В.А. Деревянко. Заявл. 15.09.2003, №2003127860/03. Опубл. 20.07.2005 Бюл. № 20.

25. Патент №2250302, кл. 7 E 02 D 3/115. Тепловая свая / Г.И. Овечкин, В.В. Двирный, А.В. Леканов, В.И. Халиманович, Г.Д. Кесельман, А.Г. Козлов, В.Ф. Шевердов, В.Г. Шелудько, В.Н. Смирных, В.В. Христич, М.И. Синиченко, Н.Ф. Чикаров, А.А. Логанов С.П. Ермилов, М.И. Соколов, С.А. Чернявский, В.А. Деревянко. Заявл. 24.07.2003,

№2003123552/03. Опубл. 20.04.2005 Бюл. № 11.

26. Патент №2263744, кл. 7 E 02 D 3/115. Устройство для глубинного замораживания грунта / А.В. Толошинов, В.П. Ягин, А.М. Цвик, И.А. Максимов. Заявл. 18.08.2003, №2003125379/03. Опубл. 10.11.2005 Бюл. № 31.

27. Патент №2286423, кл. E 02 D 3/115 (2006.01). Устройство для аккумуляции холода / В.Н. Лавринов, В.А. Максименко, Ф.А. Малышев, О.А. Ницевич, А.П. Янушенко, А.Н. Кабаков. Заявл. 28.02.2005, №2005105449/03. Опубл. 27.10.2006 Бюл. № 30.

28. Патент №2295002, кл. E 02 D 3/115 (2006.01). Устройство для аккумуляции холода / С.П. Шестаков, В.А. Максименко, Ф.А. Малышев, О.А. Ницевич, А.П. Янушенко. Заявл. 24.05.2005, №2005115811/03. Опубл. 10.03.2007 Бюл. № 7.

29. Патент №2384671, кл. E 02 D 3/115 (2006.01). Свайная опора для сооружений, возводимых на вечномерзлом грунте / А.И. Абросимов, В.А. Абросимова, М.Е. Васильева. Заявл. 11.02.2009, №2009104433/03. Опубл. 20.03.2010 Бюл. № 8.

30. Патент №2384672, кл. E 02 D 3/115 (2006.01). Охлаждаемая свайная опора для сооружений, возводимых на вечномерзлом грунте / А.И. Абросимов, В.А. Абросимова, М.Е. Васильева. Заявл. 11.02.2009, №2009104434/03. Опубл. 20.03.2010 Бюл. № 8.

31. Патент №2405889, кл. E 02 D 3/115 (2006.01). Устройство для стабилизации пластично-мерзлых грунтов с круглогодичным режимом работы / С.В. Герасимов, М.К. Герасимова, О.Ю. Штефанова, Ю.П. Штефанов. Заявл. 22.04.2009, №2009114953/03. Опубл. 10.12.2010 Бюл. № 34.

32. Патент №2415226, кл. E 02 D 3/115 (2006.01). Система для температурной стабилизации основания сооружений на вечномерзлых грунтах / Г.М. Долгих, Д.Г. Долгих, С.П. Велечев, С.Н.Окунев, В.Н. Феклистов. Заявл. 31.05.2010, №2010122118/03. Опубл. 27.03.2011 Бюл. № 9.

33. Патент №2416002, кл. E 02 D 3/115 (2006.01). Система для температурной стабилизации основания сооружений на вечномерзлых грунтах / Г.М. Долгих, Д.Г. Долгих, С.П. Велечев, С.Н.Окунев, В.Н. Феклистов. Заявл. 10.06.2010, №2010123749/03. Опубл. 10.04.2011 Бюл. № 10.

Part 2
Stability and reliability of buildings and engineering structures on Permafrost. Temperature regime of permafrost in the economic development of regions and climate fluctuations

Часть 2
Устойчивость и надежность зданий и инженерных сооружений на вечномерзлых грунтах. Температурный режим вечномерзлых грунтов при хозяйственном освоении регионов и колебаниях климата

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ГАЗПРОМЫСЛОВОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ПРИМЕРЕ ЗАПОЛЯРНОГО НГКМ

В.Н. Матковский, Е.А. Пульников, Д.В. Лукин, О.Г. Кистанов

ООО «Газпром добыча Ямбург» Филиал ИТЦ, Заполярное месторождение.
v_matkovskiy@ygd.gazprom.ru, e_pulnikov@ygd.gazprom.ru

Нормативной документацией по проектированию, а чаще в практике проектирования инженерных объектов на многолетнемерзлых грунтах не учитываются все особенности их строительства и эксплуатации в условиях Крайнего Севера. На основе опыта обустройства и эксплуатации Заполярного месторождения приведены примеры проблем, возникающих при формировании и развитии геотехнических систем, и пути их решения на стадии проектирования.

В ходе проведения геотехнического мониторинга на Заполярном месторождении зафиксирован ряд геокриологических процессов и явлений, развитие которых можно предотвратить, или минимизировать их негативное воздействие на устойчивость зданий и сооружения еще на этапе проектирования.

1. Деградация мерзлоты в основании сооружений из-за изменения условий теплообмена на поверхности, недоучет условий снегонакопления.

Как правило, при разработке генплана расположения инженерных сооружений на производственной площадке не учитывается их взаимосвязь в формировании благоприятных условий для снегонакопления. Обычно, значительная часть эстакад внутриплощадочных сетей проходит в 1-3 метрах от ограждения площадки. Такое взаиморасположение сооружений, непременно, влечет за собой обильное снегонакопление в основании эстакад. Мощность снежного покрова здесь может достигать 1,0-1,5 метра. Повышенное снегонакопление препятствует сезонному охлаждению грунтов и является катализатором процесса деградации мерзлоты и возможной потерей устойчивости фундамента (рис. 1). Исходя из геотемпературных наблюдений, на Заполярном месторождении процесс деградации мерзлоты активизируется при высоте снежного покрова 60-70 см. Проектом должны предусматриваться условия обеспечения расчетного температурного режима грунтов. Предлагаем, в проектах предусматривать расстояние между ограждением и сооружениями не менее 5,0 метров. Такое расстояние, во-первых, значительно понизит снегозаносимость грунтового основания, во-вторых, при необходимости, позволит выполнять механическим способом снегоуборочные работы на прилегающей к сооружению территории.

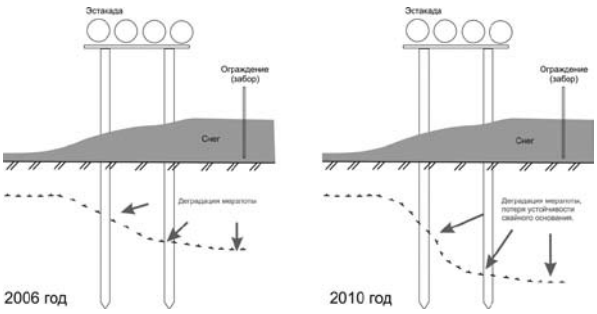


Рисунок 1 - Схема деградации мерзлоты из-за повышенного снегонакопления в основании сооружений.

2. Развитие негативных геокриологических процессов в теле насыпи площадки (формирование сезонных бугров пучения).

Гранулометрический состав пылеватых песков и неровности водоупорного рельефа стали главными факторами формирования локального или площадного защемления грунтовой воды в насыпи площадок инженерных комплексов. В результате сезонного промерзания таких участков нередко фиксируются пучинные формы рельефа в виде бугров и площадей пучения грунтов, сформированных по инъекционному типу. Высота бугра пучения может достигать 0,4-0,5 м, а диаметр до 6 м (фото 1, 2). Таким образом, пучинообразования могут привести к разрушению сооружений с близко расположенными к поверхности насыпи горизонтальными элементами конструкций нулевого цикла (фото 3, 4). Принятый в практике проектирования нормативный зазор между дневной поверхностью насыпи и ближайшим конструктивным элементом в 0,15 м, не гарантирует эксплуатационную надежность сооружения.





Фото 1, 2. Бугор пучения

По опыту эксплуатации Заполярного месторождения, расстояние между горизонтальным элементом конструк-





Фото 3, 4. Падение мачты из-за отрыва оголовков свай

ции фундамента и поверхностью грунтового основания должна составлять более 0,5 метра.

3. Развитие техногенного термокарста

Вызывает сомнение в правильности проектных решений, которые предусматривают эксплуатацию инженерных сооружений с тепловыделяющими элементами, заглубленными в грунт (КНС, дренажные емкости) при I принципе использования ВМГ в строительстве. Как показывает практика, эксплуатация таких сооружений всегда связана с рисками развития деградационных процессов в грунтовых основаниях (рис.2). На фото 5 приведен пример проявления техногенного термокарста в грунтовом основании и деформации конструкции одной из КНС.

При проектировании, в первую очередь, должны рассматриваться варианты размещения сооружений с тепловыделяющими элементами в надземном положении. Если реализация такого решения невозможно, то на основе результатов теплотехнических расчетов с обязательным учетом имеющегося опыта эксплуатации подобных сооружений, необходимо предусматривать дополнительные меры по обеспечению проектного температурного режима грунтов.

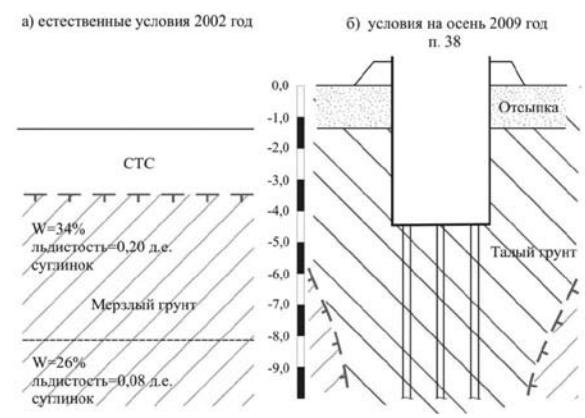


Рисунок 2 - Схема деградации мерзлоты из-за теплового влияния КНС.



Фото 5. Развитие техногенного термокарста в основании КНС. Осадка грунта на прилегающей территории.

4. Развитие негативных процессов внутри сваи.

Проектной документацией, при производстве свайных работ, как правило, предусматривается заполнение внутренней полости свай и лидерной скважины песчано-цементным раствором. Отдельными авторами разработок технологических схем строительства фундаментов упоминается, что при низких зимних температурах воздуха, в верхней части сваи и лидерной скважины промерзание песчано-цементного раствора опережает его схватывание, а это значит, что раствор приобретает функции пучинистого грунта. Ни в одном проекте свайных работ не прописывается регламент заполнения раствором внутренней полости свай в зависимости от времени года производства работ. На фото 6, 7, 8 отображены разрушения и деформации элементов фундаментов, вызванные силами пучения при промерзании песчано-цементного раствора внутри сваи в ограниченном, защемленном объеме. В ситуациях, показанных на фото, сила пучения превысила прочность конструкций надземной части свайных опор.



Фото 6. Отрыв балочной клети ростверка. Порт Ямбурга





Фото 7, 8. Развитие геокриологических процессов внутри сваи

5. Морозобойное растрескивание в основании сооружений.

На Заполярном месторождении в основании ЗПА в зимний период 2008/09г.г. произошло морозобойное растрескивание в насыпных грунтах значительных размеров с раскрытием трещин до 10 см и глубиной до 1 м вызывавших горизонтальную сдвижку ряда свай (фото 9, фото 10).

В естественных условиях грунтовые основания ЗПА были сложены талыми, преимущественно суглинистыми грунтами. Глинистый грунт перекрыт 2-2,5 метровым слоем насыпных пылеватых песков. Кровля мерзлоты находилась на глубине 5-8 м. Исходя из того что необходимо было промораживать большой объем талого основания проектом было предусмотрено обустройство основания большим количеством термостабилизаторов, как по осям свайного поля, так и между ними.

Это и послужило толчком для значительного охлаждения грунтов в зимний период 2008/09г.г., что является основным условием возникновения в грунте напряжений в результате его сжатия и началом развития морозобойного растрескивания

Очевидно, что расчет использования термостабилизаторов для усиления грунтового основания должен быть основан на определении их количественной достаточности с учетом условий теплообмена на поверхности основания. В условиях проветриваемого подполья, для решения вопроса по обеспечению несущей способности грунтов, по нашему мнению, было бы достаточно ограничиться установкой термостабилизаторов около несущих свай.





Фото 9, 10. Морозобойное растрескивание и связанные с ним деформации свайного основания

6. Содержание зарезервированных под строительство территорий

На стадии обустройства газового комплекса после отсыпки инженерных площадок под строительство очень часто из-за различных технологических потребностей или обстоятельств данные территории консервируются на несколько лет. Так на примере Заполярного месторождения данными территориями являются будущие площадки под ДКС.

По нашему мнению, для извлечения максимальной пользы от периода консервации отведенных площадей, было бы целесообразно в проектной документации предусматривать регламент по содержанию таких территорий на период их простоя, а именно в зимний период производить уборку снежного покрова. Это позволит естественным путем т.е. малозатратными средствами повысит несущую способность грунтов к началу строительства, а так же снизить потребность в усиленной термостабилизации грунтов оснований, что позволит исключить развитие таких негативных процессов как морозобойное растрескивание в основании сооружений.

В целом все описанные выше геокриологические процессы и явления уже привели к снижению эксплуатационной надежности сооружений или к аварийному состоянию. По нашему мнению разработка и применение технических решений направленных на предотвращение данных проблем на стадии проектирования является целесообразным и экономически выгодным.

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ГРАНИЦ ПРОТАИВАНИЯ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ДВУХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Я.Б. Горелик, С.Н. Романюк

Институт Криосферы Земли СО РАН, г. Тюмень, gorelik@ikz.ru

Разработан метод численного решения трехмерной задачи Стефана, описывающей динамику температурного поля и границы промерзания-протаивания пород в зоне действия двух вертикально расположенных скважин. Приводятся примеры результатов расчета. Показано, что картина динамики температурного поля и форма области промерзания-протаивания существенно нестационарны. Это делает невозможным применение квазистационарных методов при прогнозе теплового состояния пород вблизи скважин.

Введение

Данная работа - проведение численного расчета динамики теплового взаимодействия двух скважин расположенных вертикально при наличии вечной мерзлоты. Годовыми колебаниями колебаниями температуры можно пренебречь. Взаимное расположение таково, что на динамику температурного поля существенно влияет температурное поля соседней скважины среднегодовая температура на поверхности грунта

Такие задачи весьма актуальны в плане проектирования и эксплуатации скважин при освоении месторождений газа.

При эксплуатации скважин в условиях вечной мерзлоты приходится производить расчеты температурного поля в прилегающей области, в том числе с учетом движения фронта таяния-замерзания. На температурное поле в породе вокруг скважины существенное влияние оказывает температурное поле соседней скважины, а так-же положение фронта таяния связанное с среднегодовой температурой поверхности. Все это не позволяло широко использовать приближенные квазистационарные методы расчета динамики температурного поля. Литература по этому вопросу крайне бедна. Быстрый прогресс вычислительной техники в плане мощностей вынуждает постоянно обновлять способы расчета, по новому и более точно считать даже уже решенные задачи.

В данной работе произведен расчет (сроком на 50 лет) температурного поля и динамики фронта таяния в области вблизи куста из 2 скважин в случае среды с неоднородными теплофизическими свойствами.

При этом основными критериями выступают величины- Температура флюида протекающего по скважинам, Радиус скважин, Свойства изоляции скважин, Среднегодовая температуры поверхности а также зависимость теплофизических характеристик среды от глубины.

Рассматриваемая в данной работе задача о промерзании пород вблизи скважин включает изучение совместного вклада всех этих параметров в этот процесс. Этот момент особенно важен для решения общей задачи о взаимодействии скважин с другими инженерными сооружениями, активно влияющими на температурное поле в породе.

Постановка задачи и методика исследований

Рассмотрим полуограниченный сверху массив грунта с двумя вертикально расположенными цилиндрическими полостями заданного радиуса. Расстояние между вертикальными осями полостей предполагается заданным. В реальности полости соответствуют действующим скважинам. Перенос тепла от движущегося в скважине флюида в породу осуществляется только за счет теплопроводности и сопровождается фазовыми переходами содержащейся в порах воды. Фазовые переходы сосредоточены на фронте нулевой толщины. При смыкании таликов от отдельных скважин форма области протаивания имеет двумерное очертание. Рассматриваемую двухфазную задачу Стефана возможно описать одним уравнением типа теплопроводности для всей области расчета [Самарский и др., 2003]. Для этого вводится понятие удельной энтальпия.

$$H(T)=\begin{cases} L_f + C_t \cdot T \\ C_m \cdot T \quad если \quad T<0 \end{cases} \qquad (1)$$

Обратное выражение для температуры

$$T(H)=\begin{cases} \dfrac{H-L_f}{C_t} & если \quad H>L_f \\ 0 & если \quad 0\le H\le L_f \\ \dfrac{H}{C_m} & если \quad T<0 \end{cases} \qquad \rho \cdot \frac{\partial H(x,y,z,t)}{\partial t} = grad\left[\lambda(T)\cdot\nabla T(x,y,z,t)\right] \qquad (2) \qquad (3)$$

где x, y, z – пространственные координаты, м;

t – время, с;

T – температура грунта,

H – удельная энтальпия грунта Дж/кг ; °C;
ρ – плотность грунта, кг/м3;
C – удельная теплоемкость грунта, Дж/(кг•град);
λ – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м•град);
L_f – теплота фазовых переходов грунта с учетом удельного содержания воды, Дж/кг.
При этом температура фазового перехода предполагается $T_f = 0$.
Теплота фазовых переходов зависит от влажности грунта:

$$L_0 = L_0^0 \frac{w_{tot} - w_w}{1 + w_{tot}} \quad (4)$$

где к^0 = 3,34·105 Дж/кг –удельная теплота фазового перехода «лед-вода»;
w_{tot} – суммарная влажность мерзлой породы, д. ед.;
w_w – влажность за счет незамерзшей воды, д. ед.
В нашей задаче принято w_{tot} .

Задача Стефана, записанная в виде (3), не требует отдельных уравнений теплопроводности для талой и мерзлой зон, как и особого уравнения баланса тепла на их границе. Нелинейная зависимость энтальпии от температуры учитывает выделение или поглощение тепла при фазовом переходе. В соответствии с этим, граница раздела фаз определяется по нулевой изотерме температурного поля. Начальным условием является невозмущенное температурное поле массива: $T(x, y, z,0) = T_p(z)$

Граничные условия задаются условиями теплообмена на внешних границах расчетной области и температурами на внешней поверхности труб. Причем граница расчетной области от источников тепла определяется малостью теплового влияния источников на выбранном расстоянии за весь расчетный период. Это удаление подбирается из условия где a- температуропроводность грунта; t – расчетный период; R – расстояние границы от источника (а также от повергности грунта). При этом температура на внешних боковых границах расчетной области принимается равным температуре грунта на данной глубине Tg(z). Данная температура определяется решением вспомогательной одномерной задачи распределения температуры по глубине в грунте. На верхней поверхности задается температура (среднегодовая) Tp.

Граничные условия на внешней стенке каждой скважины определяется исходя из конструкции по формулам стационарной теплопередачи через цилиндрические стенки [Исаченко и др., 1969] с использованием выражения для стационарного температурного поля отдельной скважины [Горелик и др., 1983].

Уравнение (3) с соответствующими граничными и начальными условиями решалось с помощью численных методов. Пространственная область расчета разбивается прямоугольной сеткой на конечное число объемов. Оси труб располагаются в центре некоторых из них, поэтому необходимо перенести граничные условия со стенок труб на грани этих объемов.

Новые граничные условия определяются, исходя из равенства тепловых потоков к соседнему контрольному объему от цилиндрической трубы с температурой стенки Tc и от прямоугольного объема с температурой Tгр. [Горелик, Сысоев, Шабаров, 2008]:

Такой подход устанавливает линейную зависимость между разностями температур

$T_{гр} - T_1 = \gamma \cdot (T_c - T_1)$

Отсюда, выражение для $T_{гр}$ в каждый момент времени определяется через T_c и T_1, которые берутся с предыдущего временного слоя.

Ввидутогочтотемпературноеполевокругкаждойизтрубуженеобладаетаксиальнойсимметрией выражение для T1 выбираем в виде $T_1 = 0.25 \cdot (T(i_0 + 1, j_0, k) + T(i_0 - 1, j_0, k) + T(i_0, j_0 + 1, k) + T(i_0, j_0 - 1, k))$ то есть среднему от всех четырех ближайших соседей.

В результате получаем соотношение

$$T_{гр} = T_1 + \gamma \cdot (T_c - T_1) \quad (5)$$

Разностный аналог уравнения (3) записан в стандартном виде [Самарский, 1979]:

$$\rho \frac{H_{ijp}^{k+1} - H_{ijp}^k}{\Delta\tau} = \lambda_{i+\frac{1}{2}jp} \frac{T_{i+1jp}^k - T_{ijp}^k}{\Delta x^2} - \lambda_{i-\frac{1}{2}jp} \frac{T_{ijp}^k - T_{i-1jp}^k}{\Delta x^2} + \lambda_{ij+\frac{1}{2}p} \frac{T_{ij+1p}^k - T_{ijp}^k}{\Delta x^2} -$$
$$- \lambda_{ij-\frac{1}{2}p} \frac{T_{ijp}^k - T_{ij-1p}^k}{\Delta x^2} + \lambda_{ijp+\frac{1}{2}} \frac{T_{ijp+1}^k - T_{ij}^k}{\Delta x_2} - \lambda_{ijp-\frac{1}{2}} \frac{T_{ijp}^k - T_{ijp-1}^k}{\Delta x^2} \quad (6)$$

где i, j, p – индексы, относящиеся к контрольному объему по осям x, y, z и соответственно;
ΔV – объем, м3;
Δt– шаг по времени,
с; Δx – расстояние между соседними температурными узлами по соответствующим осям координат, м; индексы «± 1/2» относятся к противоположным граням контрольного объема.

Нами выбрана явная схема. Шаг по координате Δx=0.5м. Шаг по времени выбран исходя из условия устойчивости (в нашем случае $a \cdot \Delta t / \Delta x^2 = 0.08$). Шаг по координатам выбран постоянный.

Конечно-разностная схема (7) является консервативной. Коэффициенты λ на новом шаге по времени берутся с предыдущего временного слоя.

Энтальпия на новом временном шаге находится из последовательного решения систем урав-

нений (6). Температура на новом временном шаге находится из соотношения (2).

Результаты расчета и их обсуждение

Ниже приводится примеры расчета температурного поля для двух вертикально расположенных скважин. Скважины расположены так, что находятся в зоне действия своих соседей а также в зоне действия поверхности обусловленного среднегодовой температурой (Рис. 1).

Средняя температура на поверхности грунта взята T_0 = -4°C, Температура на нижней и боковых поверхностях массива в любой момент времени взята в виде Tg(z). Теплофизические параметры грунта следующие: $\lambda_т$= 1,4 Вт/(м·град.); $\lambda_м$ = 1,8 Вт/(м·град.); $C_{тал}$= 1660 Дж/(кг·град); $C_{мер}$ = 1180 Дж/(кг·град); w_w = 0; ρ = 1800 кг/м^3. Содержание воды в породе меняется линейно по глубине w_{tot} (z)= 0,2+0,2*z/50.

Скважины находятся на расстоянии 20 м друг от друга. Радиус скважины 0,3 м. Температура стенки скважины T2=30 град. Глубина расчетной области 50м.

Расчетная область имеет размеры 50м х 50м х 50м. Стволы скважин расположены в центре расчетной области. Время счета на компьютере составило около 48 часов.

Результаты расчета динамики температурного поля приведены на Рис. 2,3,4,5.

Изотермы температурного поля приведены в 3 плоскостях. Графики изотерм приведены в момент времени соответствующие 30 лет.

Показано взаимное влияние скважин на температурное поле и форму фронта таяния (нулевая изотерма).

В данной работе при расчете использована явная схема для которой выполняются точные законы сохранения, что важно для очень длительных по времени расчетов (до 50 лет). Устойчивость метода обеспечивается выбором соответствующего шага по времени. В работе более точно определено условие для мощности фиктивного источника расположенного в узлах сетки на оси скважины (6). Это особенно актуально для случаев когда температурное поле вокруг источников не обладает аксиальной симметрией.

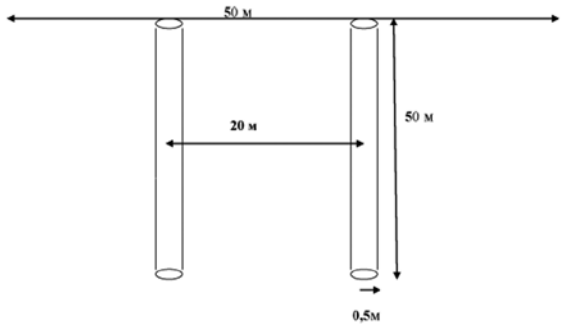


Рисунок 1 – Вертикальные скважины

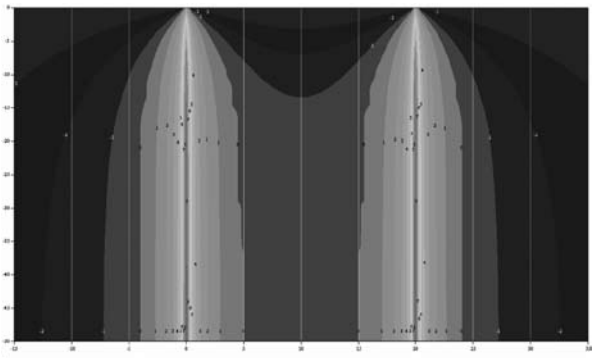


Рисунок 2 - Температурное поле в зоне действия двух скважин. Время с момента пуска в эксплуатацию - 30 лет. Линии уровня в сечении проходящем через обе скважины. Зона таяния соответствует изотерме T=0.

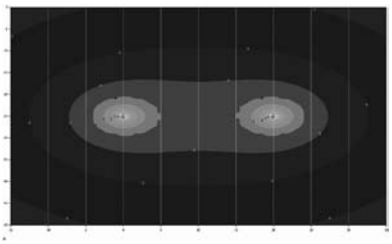


Рисунок 3 - Температурное поле в зоне действия двух скважин. Время – 30 лет Линии уровня в горизонтальном сечении, проходящем на грубине 50 метров перпендикулярно оси скважин.

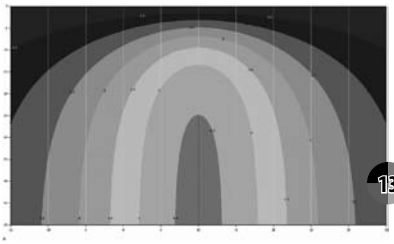


Рисунок 4 - Температурное поле в зоне действия двух скважин. Время – 30 лет Линии уровня в вертикальном сечении, проходящем перпендикулярно середине отрезка, соединяющего устья двух скважин.

Список литературы

1. Горелик Я.Б., Каверина Т.В. Теплоизоляция скважин в северных районах // Нефтепромысловое строительство. М., ВНИИОЭНГ, 1983, № 7, с. 2-3.

2. Горелик Я.Б., Дзик М.И. Тепловое взаимодействие куста добывающих скважин с вечномерзлыми грунтами // Изв. АН СССР, Сер. Энергетика и транспорт. 1990, т. 36, с. 143 – 152.

3. Ермилов О.М., Дегтярев Б.В., Курчиков А.Р. Сооружение и эксплуатация газовых скважин в районах Крайнего Севера. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2003, 222 с.

4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., Энергия, 1969, 424 с.

5. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М., Наука, 1977, 456 с.

6. Медведский Р.И. Строительство и эксплуатация скважин на нефть и газ в вечномерзлых породах. М., Недра,1987,230 с.

7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., Энергоатомиздат, 1984, 152 с.

8. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М., Едиториал УРСС, 2003, 784 с.

9. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М., Атомиздат, 1979, 215 с.

10. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. М., Недра, 1965, 236 с.

11. Я.Б. Горелик, А.Б Шабаров, Ю.С. Сысоев Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОСИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАГЛУБЛЕННОГО ТРУБОПРОВОДА С МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ

А. Б. Шабаров, Г.В. Бахмат, П. Ю. Михайлов, А.А. Вакулин, И.А.Суровцев

ФГБОУ ВПО "Тюменский государственный университет", e-mail: kaf_mms@utmn.ru

В статье представлены конструкция стенда, позволяющая проводить экспериментальные исследования теплосилового взаимодействия заглубленного трубопровода с мерзлым грунтом, а также результаты исследований, проведенных на стенде.

На протяжении многих лет разные исследователи пытались понять сложное поведение подземных трубопроводов в результате морозного пучения грунта. В попытке понять это сложное явление, нужно использовать расчетные методы или проводить экспериментальные исследования по теплосиловому взаимодействию заглубленных трубопроводов и грунта. В настоящее время разработан ряд расчетных методов и компьютерных программ [1-4 и др.], позволяющих проводить прогнозирование процессов теплового и силового взаимодействий заглубленного трубопровода с мерзлыми и талыми грунтами. Для проверки адекватности расчетных методов необходимо проведение расчетно-экспериментальных исследований. Основная проблема заключается в отсутствии необходимого объема достоверных экспериментальных данных. На реально действующих объектах не всегда удается получить необходимый объем данных. Решить данную проблему можно проведением экспериментальных исследований на специально сконструированном стенде. По вопросу экспериментальных исследований взаимодействия заглубленного трубопровода и грунта уже существует ряд работ, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки [5-8].

В Тюменском государственном университете на кафедре «Механики многофазных систем» создан автоматизированный стенд «Исследование мерзлых грунтов применительно к объектам нефтегазового и строительного комплекса», позволяющий экспериментально исследовать нестационарные процессы теплового и силового взаимодействий заглубленного модельного трубопровода с окружающими его талыми и мерзлыми грунтами.

Общая схема установки

Установка состоит из следующих основных узлов и элементов: морозильной камеры, металлического лотка, системы охлаждения модельного трубопровода и автоматизированной системы мониторинга температуры, давлений в грунте, вертикального перемещения трубопровода. Общий вид установки представлен на рисунке1.

В морозильной камере располагается лоток. Расположение лотка внутри морозильной камеры представлено на рисунке 1. В лотке установлена труба внешним диаметром 22 мм именуемая в дальнейшем модельным трубопроводом. Модельный трубопровод гидравлически соединен с системой охлаждения теплоносителя, что обеспечивает охлаждение стенок трубы.

Моделирование теплового режима работы, исследуемого трубопровода осуществляется с помощью специально разработанной циркуляционной терморегулирующей системы. Система состоит из электронагревателя проточного типа мощностью 1 кВт, терморегулятора, радиатора типа «вода-воздух», электрического насоса, расширительного бака, системы кранов, соединительных шлангов. Концы модельного трубопровода жестко прикреплены к торцевым стенкам лотка. Система терморегулирования позволяет задавать температуру теплоносителя в диапазоне от -25 до 80 градусов цельсия.

Измерительно-регистрирующая аппаратура стенда представлена набором первичных преобразователей: температуры, вертикального перемещения трубопровода, грунтового давления, деформации трубопровода; вторичных преобразователей - трех аналогово-цифровых преобразователей; влагомера диэлькометрического типа и персонального компьютера оснащенного необходимым программным обеспечением.

Описание конструкции морозильной камеры

Морозильная камера представляет собой параллелепипед (рисунок 1), размерами 2250х1600х2000 мм, толщина стенок составляет 100 мм. Стенки камеры изготовлены из пенополистирольных плит, которые герметично стыкуются друг с другом. Доступ во внутренне пространство камеры осуществляется через дверь размерами 950х2000. Дверь оснащена ручкой со встроенным замком. Дверь герметично закрывается. Для охлаждения внутреннего объема камеры используется съемная моноблочную холодильную машину мощностью 2.2 кВт, которая вмонтирована в лицевую панель. Вынужденная циркуляция воздуха в камере объемом 5 м3 создается электрическим вентилятором, что обеспечивает равномерное распределение температуры внутри камеры.

Описание конструкции лотка

Лоток представляет собой параллелепипед размерами 1200х600х1000 мм (рисунок 1), изго-

товленный из листовой стали марки, толщина листовой стали 3 мм. Конструкция лотка разборная. Боковые стенки и дно лотка соединяются между собой болтовыми соединениями. Внутренние и наружные поверхности лотка обработаны грунтовкой марки ГФ-1 для предотвращения коррозионных процессов возникающие при контакте влажного грунта с черновой сталью. Боковые стенки лотка армированы угловым профилем (32 угловым профилем, ГОСТ) для предотвращения возможных деформаций возникающих при пучении грунта. Боковые стенки лотка заизолированы пенопластом толщиной 50мм, для предотвращения теплового потока через боковую стенку. Поверхность теплоизоляционного слоя обработана гидрозащитным покрытием предотвращающим проникновение влаги.

Описание системы охлаждения

Система охлаждения модельного трубопровода состоит из следующих основных элементов: радиатора, стальной трубы, электронасоса, расширительного бачка. Все элементы системы соединены между собой гибким резиновым шлангом. Схема и общий вид системы нагрева представлены на рисунке 2. Система представляет собой замкнутый цикл.

Система работает следующим образом: Насос подает теплоноситель на вход радиатора, где он охлаждается, затем теплоноситель поступает в модельный трубопровод, где происходит отбор тепла от грунта. Потом теплоноситель поступает на вход электронасоса и процесс повторяется снова. Расширительный бак служит для заполнения системы. В системе предусмотрен воздухоотводчик для избавление от возможных воздушных пробок.

Описание автоматизированной системы мониторинга температуры в грунте

Автоматизированная система мониторинга температуры в грунте состоит из: персонального компьютера, адаптера однопроводной сети, подключенного к компьютеру через COM порт, блока питания и 60 цифровых датчиков температуры.

В качестве датчиков температуры используют цифровой термометр DS18B20 с программируемым разрешением, от 9 до 12–bit, которое может сохраняться в EEPROM памяти прибора. DS18B20 обменивается данными по 1-Wire шине и при этом может быть как единственным устройством на линии так и работать в группе. Все процессы на шине управляются центральным микропроцессором. Датчик DS18B20 - наиболее совершенный из широко известного семейства DS18X2X, выпускавшихся ранее под маркой Dallas Semiconductor. В отличие от функциональных аналогов DS1820 и DS18S20 он перед началом измерения позволяет задать необходимую относительную точность преобразования температуры из следующего ряда значений: 0,5; 0,25; 0,125 и 0,0625°C, при этом время измерения равно соответственно 93,75; 187,5; 375 и 750 мс. Технические характеристики: диапазон измерений от -55 °C до 125 °C; в диапазоне от -10 °C до 85 °C, абсолютная погрешность не превышает ±0,5°C; DS18S20 допускает напряжение питания от +3 до +5,5 В; в режиме ожидания потребляемый ток близок к нулю (менее 1мкА), а во втором преобразовании температуры он равен примерно 1 мА; процесс преобразования длится максимум 750 мс; DS18B20 может питаться напряжением линии данных (“parasite power”), при отсутствии внешнего источника напряжения; при использовании термометра необходимо учитывать, что корпус DS18S20 сделан из материала с относительно плохой теплопроводностью.

Для работы с датчиками DS18B20 на персональном компьютере используется программа Temp.Keeper. С помощью программы осуществляется мониторинг и сохранение показаний температуры. В программы предусмотрена возможность задать временной интервал, через которое будут опрашиваться все подключенные датчики температуры. Полученную информацию о значениях температуры программа сохраняет в текстовом файле с указанием времени опроса датчиков. Расположение датчиков изображено на рисунке 5.

Описание системы мониторинга вертикального перемещения трубопровода

Система мониторинга вертикального перемещения трубопровода состоит из: персонального компьютера, блока питания, 3 индикаторов перемещения часового типа, 3 видеокамер, подключенных к компьютеру через COM порт. Расположение индикаторов в лотке изображено на рисунках 3 и 6. Индикаторы с перемещением измерительного стержня параллельно шкале предназначены для относительных и абсолютных измерений линейных размеров и контроля отклонений от заданной геометрической формы, а также взаимного расположения поверхностей. Измерительный стержень - зубчатая рейка, перемещаясь, поворачивает триб, который жестко связан с зубчатым колесом и вращается с ним на одной оси. Колесо находится в зацеплении с трибом, на оси которого установлена соточная стрелка. Зубчатое колесо, на оси которого неподвижно посажена втулка с волоском, находится в зацеплении с трибом. Колесо, находясь под действием волоска, заставляет всю передачу работать на одной стороне профиля зуба, вследствие чего устраняется мертвый ход. На оси колеса установлена стрелка - указатель числа оборотов соточной стрелки. Измерительное усилие создается пружиной. Видеокамеры используются для фиксации показаний индикаторов перемещения с помощью установленной на компьютере программы DVR. Полученный видеоматериал программа сохраняет на жестком диске.

Описание системы мониторинга давлений в грунте

Система мониторинга давлений в грунте состоит из: персонального компьютера, блока питания, 5 датчиков малых давлений PS-A/B/C/D, аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) подключенных к компьютеру через USB порт. В этих датчиках используются фольговые малогабаритные

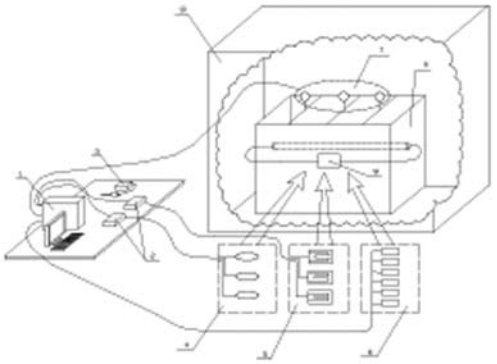


Рисунок 1 - Принципиальная схема стенда: 1- персональный компьютер; 2- устройства аналого-цифрового преобразования; 3- измеритель влажности грунта ВИМС-2; 4- преобразователи грунтового давления; 5- тензометрические преобразователи; 6- цифровые датчики температуры DS18B20; 7- преобразователи вертикального смещения трубопровода; 8- модельный трубопровод; 9- лоток; 10- холодильная камера.

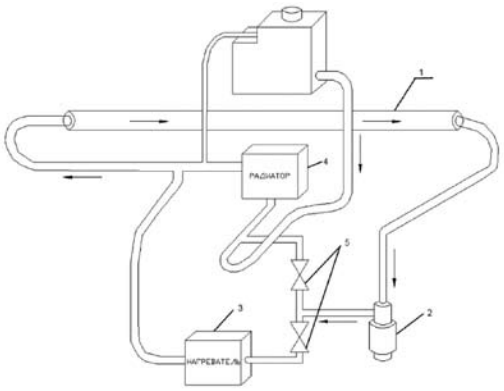


Рисунок 2 - Система терморегулирования трубопровода. 1 – исследуемая труба; 2 - циркуляционный насос; 3 – проточный нагреватель; 4 – радиатор охлаждения; 5 – кран шаровый.

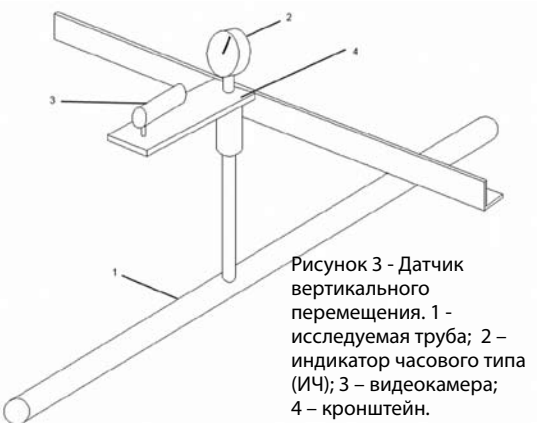


Рисунок 3 - Датчик вертикального перемещения. 1 - исследуемая труба; 2 – индикатор часового типа (ИЧ); 3 – видеокамера; 4 – кронштейн.

тензорезисторы, заключенные в миниатюрный тонкий корпус. Не оказывают воздействия на рабочие среды. Температурный диапазон:–20+70 °С .Расположение датчиков давления в лотке изображено на рисунке 6. Показания давлений по каждому датчику выводятся с помощью программы ZetLab. Фиксация этих показаний производится с помощью программы захвата изображения, эта программа фиксирует показания через интервал времени, который задается пользователем, и сохраняет их на жесткий диск.

Методика проведения эксперимента

В предварительно подготовленный лоток производиться засыпка грунтового материала. Схема засыпки грунтового материала представлена на рисунке 4. На расстоянии 350 мм от левой боковой поверхности на высоту 550 мм от дна лотка засыпан песчаник, на расстоянии 600 мм засыпана глина на высоту 550 мм. Оставшееся пространство засыпано также песчаником на высоту 550 мм. Граница раздела песчаник-глина вертикальная и плоская.

В грунтовый материал устанавливается 54 датчика температуры DS18B20. Схема расположения датчиков в грунте представлена на рисунке 5. 27 датчиков температуры установлено в песке (в глине идентично) в плоскости перпендикулярной основании лотка. Под трубой устанавливаются датчики давления: 3 штуки в глине и по 1 в песок с каждой стороны. На специально подготовленных и установленных на лотке уголках крепятся индикаторы перемещения трубопровода, к каждому индикатору устанавливается миниатюрная видеокамера.

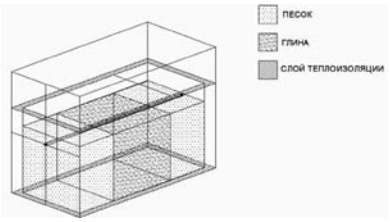


Рисунок 4 - Расположение грунта в лотке.

Настраивается автоматизированный комплекс мониторинга за температурами и давлениями в грунте, а также за вертикальными перемещениями трубопровода.

Производиться увлажнение грунтового материала. Для этого проделываются следующие действия: в лоток с грунтом заливается вода, после 24 часов с помощью прибора для измерения влажности ВИМС-2 замеряется влажность и при необходимости добавляется вода.

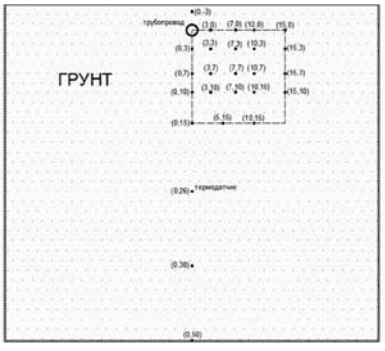


Рисунок 5 - Расположение датчиков температуры в грунте и их обозначения.

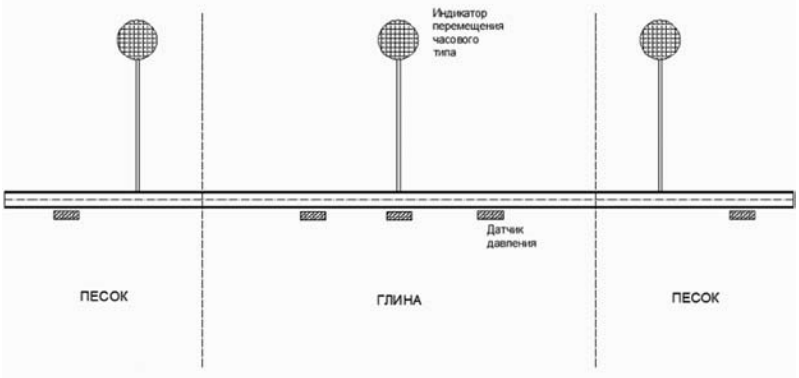


Рисунок 6 - Расположение датчиков давления и индикаторов перемещения в грунте.

Отладка системы охлаждения модельного трубопровода. Для этого необходимо произвести следующие работы: заполнить систему антифризом, подключить электрические разъемы, устранить воздушные пробки в гидравлической системе, проверить работоспособность электронасоса, установить датчики температуры DS18B20 на входе, в центре и на выходе из модельного трубопровода.

Ход эксперимента

Запуск морозильной камеры с предварительно установленной температурой охлаждения -15 °С. Запуск системы охлаждения трубопровода для более быстрой проморозки грунта. По мере охлаждения грунтового массива производиться периодический мониторинг показаний всех датчиков. Процесс полного промораживания грунта в среднем занимает 5 суток. После 5 суток работы эксперимент прекращается, оборудование отключается.

Результаты эксперимента

На описанном стенде было проведено экспериментальное исследование теплосилового взаимодействия «холодного» трубопровода с промерзающим грунтом (глина), температура воздуха в холодильной камере поддерживалась на уровне -14 градусов. Температура перекачиваемого продукта представлена на рис 7. Охлаждение трубопровода проводилось не постоянно (в ночное время охлаждение отключалось), поэтому для описания зависимости T(t) будем аппроксимировать кривую, разбив её на 14 участков. Температура воздуха в холодильной камере. Кривая, описывающая зависимость температуры в холодильной камере от времени (получена из эксперимента) представлена на рис. 8.

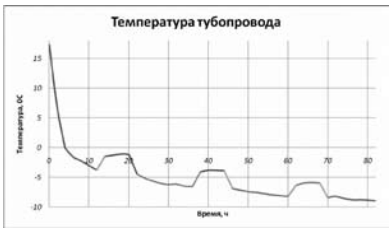
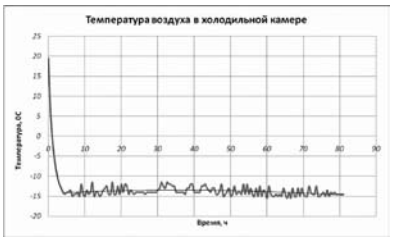


Рисунок 7 - Температура трубопровода.

Рисунок 8 - Температура воздуха в холодильной камере.



Аппроксимация зависимости T(t) для воздуха в холодильной камере проводилась двумя уравнениями для двух участков кривой соответственно:

$$T = 0{,}1923t^4 - 2{,}378t^3 + 116535t^2 - 28{,}766t + 19{,}299 \qquad 0 \le t \le 4{,}5$$

$$T = -0{,}0006t^2 + 0{,}0458t - 14{,}308 \qquad 4{,}5 \le t \le 80$$

Где t — время в часах, а T- температура в градусах цельсия. Датчики установленные на глубине 15 см нижу уровня центра трубы показывали температуры с разницей в десятые доли градуса, поэтому аппроксимация проводилась по кривой, построенной по средним значениям среди всех датчиков (рис.9). Аппроксимация проводилась двумя уравнениями для двух участков кривой:

$$T = 0{,}0019t^3 - 0{,}0688t^2 + 0{,}1221t + 16{,}967 \qquad 0 \le t \le 20$$

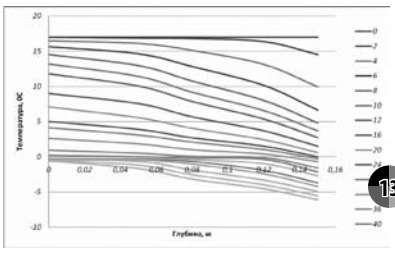
$$T = -0{,}0001t^3 + 0{,}0208t^2 - 1{,}2629t + 24{,}878 \qquad 20 \le t \le 80$$

Температура правой грани рассматриваемой области (задается также по показаниям температурных датчиков). Аппроксимация данной грани наиболее сложная, так как температура зависит не только от времени, но также и от глубины расположения датчика. Следовательно, для аппроксимации необходимы уравнения плоскостей. Методика: а) Зная зависимости температуры от глубины заложения датчика для разных моментов времени, построим их (рис.10).



Рисунок 9 - Показания датчиков температуры, установленных на глубине 15 см ниже уровня центра трубы.

Рисунок 10 - Зависимости температуры от глубины заложения датчика для разных моментов времени



Аппроксимация всех этих зависимостей дает 20 уравнений. Допуская, что изменение температуры на одной глубине в промежутке между соседними кривыми идет линейно, запишем формулу (рассматриваются две соседние кривые с моментами времени t_1 и t_2) откуда:

$$k = \frac{T(x,t_1) - T(x,t_2)}{t_1 - t_2} \qquad b = T(x,t_1) - \frac{T(x,t_1) - T(x,t_2)}{t_1 - t_2} t_1$$

тогда:
$$T(x,t) = \frac{T(x,t_1) - T(x,t_2)}{t_1 - t_2} t + T(x,t_1) - \frac{T(x,t_1) - T(x,t_2)}{t_1 - t_2} t_1$$

или:
$$T(x,t) = \frac{T(x,t_1) - T(x,t_2)}{t_1 - t_2}(t - t_1) + T(x,t_1)$$

Используя эту формулу, мы получаем 20 уравнений плоскостей описывающих температуру в зависимости от времени и глубины, то есть граничное условие для правой грани рассматриваемой области. Температурные поля, полученные во время эксперимента, строились с помощью программного продукта Sigma Plot, по данным датчиков температуры, расположение которых показано на рисунке 5. Отдельно строились температурные поля в глине и песке. Ниже на рисунке 12 приведены данные температурного поля вначале эксперимента и через 10 часов, а на рисунке 13приведены данные температурного поля через 50 и через 80 часов. Шкала температур для глины и песка (слева указана глина, а справа песок) имеет вид (температуры указаны в градусах Цельсия), показанный на рисунке 11. Из приведенных выше полей температур видно, что песок промораживается гораздо быстрее, что хорошо согласуется с теорией. Из эксперимента также были получены данные по вертикальному смещению трубопровода, показанные на рисунке 14.



Рисунок 11 - Шкала температур.

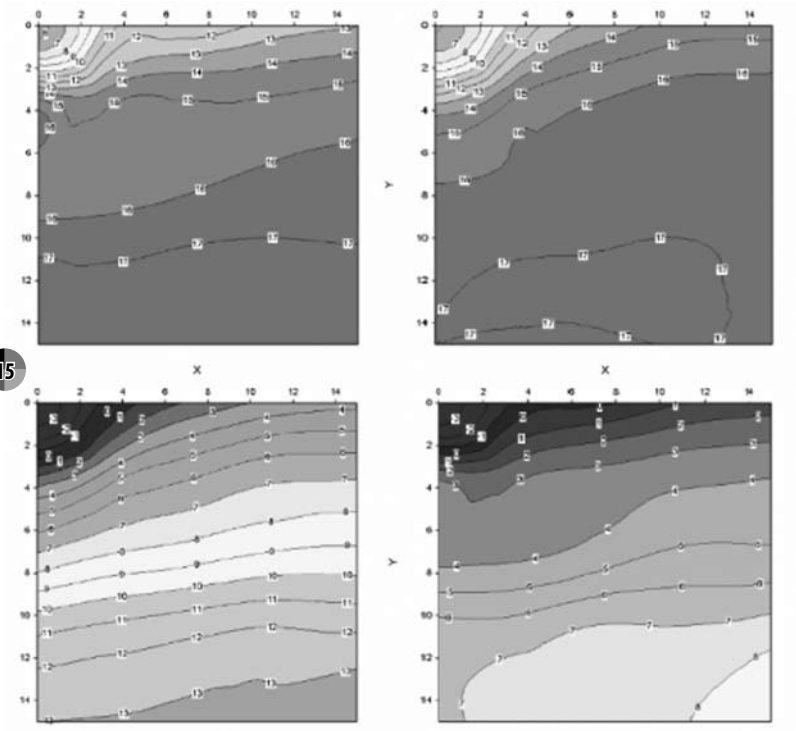


Рисунок 12 - Температурные поля для глины (слева) и песка (справа) вначале эксперимента и через 10 часов.

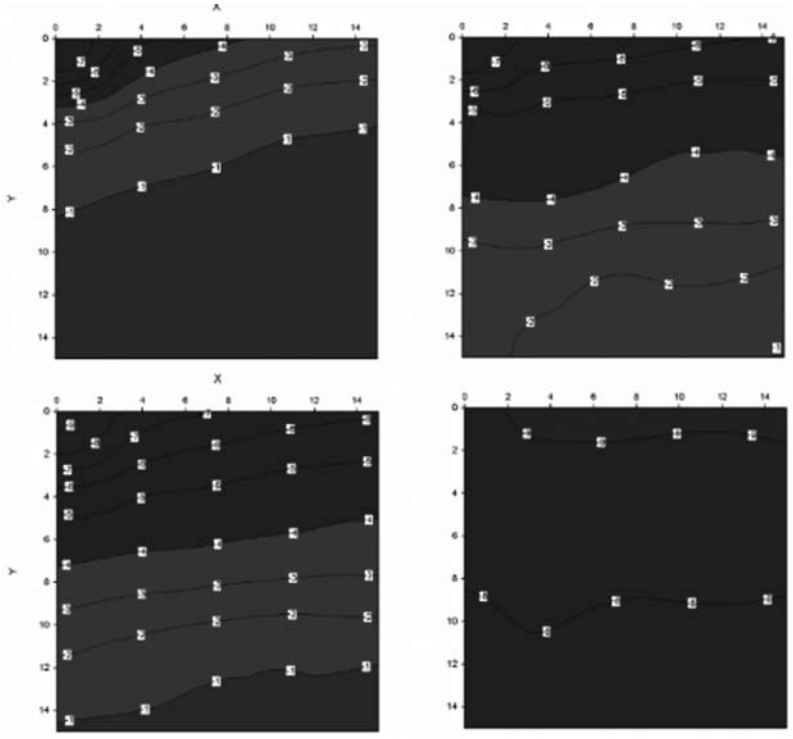


Рисунок 13 - Температурные поля для глины (слева) и песка (справа) через 50 и 80 часов.``

Основные выводы могут быть сведены к следующему:

Создан новый автоматизированный стенд, позволяющий проводить экспериментальные исследования теплового и силового взаимодействий модельного трубопровода подземной прокладки с окружающими его мерзлыми и талыми грунтами.

Стенд позволяет проводить измерение нестационарных полей температуры, влажности и льдистости, высотного положения и деформации трубопровода, а также давления в грунте.

Разработанный стенд, система измерений и методика обработки результатов позволяют проводить исследования влияния температуры окружающей среды, температуры теплоносителя в трубопроводе, виде и влажности грунтов, на параметры теплового и силового взаимодействий грунтов с инженерными конструкциями.

Проведено экспериментальное исследование теплового взаимодействия «холодного» трубопровода с промерзающим грунтом.

Ведутся работы по усовершенствованию установки.

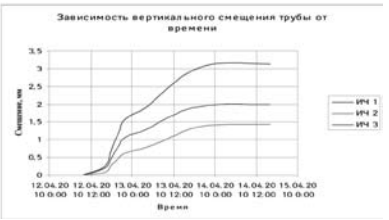


Рисунок 14 - Вертикальное смещение трубопровода.

Список литературы

1.Шабаров А.Б., Михайлов П.Ю., Пульдас Л.А., Вакулин А.А. Физико-математическое моделирование полей температуры и льдистости в мерзлых грунтах вокруг заглубленного трубопровода // Вестник ТюмГУ. №6. 2010. С. 14-19.

2. GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alberta, Canada, www.geo-slope.com . Pipeline Freezing Analysis. 2006.

3. Jianfeng Xu, Ph.D., Basel Abdalla, Ph.D. PERMAFROST THAWING-PIPELINE INTERACTION ADVANCED FINITE ELEMENT MODEL// OMAE2009-79554.

4.Горковенко Александр Иванович. Основы теории расчета пространственного положения подземного трубопровода под влиянием сезонных процессов : дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.19 Тюмень, 2006 305 с.

5. A.P.S. Selvadurai, J. Hu, I. Konuk. Computational modelling of frost heave induced soil–pipeline interaction // Cold Regions Science and Technology №29. 1999. P 229–257.

6. Choobbasti A. J. Modeling of the Uplift Response of Buried Pipelines // Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 14, No. Bund. M, 2009.

7. Song W.-K. Thermal transfer analysis of a freezing soil medium with an embedded pipeline // J. Cold Reg. Engrg. ASCE, 2006, P. 20-36.

8. Smith M.W. Observations and significance of internal pressures in freezing soil // Geotechnical Science Laboratories Department of Geography, Carleton University. Ottawa, Ontario, 1990. P. 75-81.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОУ ДЛЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ И ПОМЕЩЕНИЙ

А.Ф. Сажин

ООО «АндИ», oooandi@bk.ru

В данной работе произведен теплотехнический расчет для различных конструкций основания зданий и сооружений эксплуатируемых в районах распространения ВМГ. Выявлено наиболее энергоэффективное техническое решение по способу строительства оснований фундамента на ВМГ.

В 2009 году президентом РФ Медведевым Д.А. был подписан федеральный закон ФЗ-№261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», а также и другие правовые акты и законы которые предписывают вводить энергосберегающие технологии и мероприятия повышающие энергоэффективность. Наибольшее потребление энергоресурсов идет на поддержание температурного режима зданий и сооружений, таких как промышленного: теплые цеха, гаражи, компрессорные станции, резервуары и т.д., а также гражданского назначения: жилые дома, школы больницы, аэропорты и другие. Так для районов со среднегодовой температурой 0 0С или ниже этот вопрос имеет наиболее актуальное значение так как помимо поддержания теплового режима здания необходимо предотвратить размораживание вечномерзлых грунтов (ВМГ). Как правило в районах распространения ВМГ для поддержание температурного режима зданий и сооружений необходимы большие энергозатраты. Так как ВМГ находятся на территории Росийской Федерации необходимо соблюдать законы и закон ФЗ-№261 входит в их число. Таким образом существует ряд вопросов по разработке технических решений направленных на понижение энергозатрат и повышению энергоэффективности. Согласно ФЗ-№261 РФ потребление энергоресурсов должно к 2015 году сокращено на 15%.

Тепловые потери зданий и сооружений складываются из теплопотерь через чердачного перекрытия, наружных стен и подвального перекрытия. Тепловые потери через чердачное перекрытие и наружные стены сокрушается за счет увеличения толщины слоя или материала теплоизоляции. Тепловой поток через подвальные перекрытия напрямую или косвенно могут повлиять на температурный режим грунтов оснований. Существуют два типа технических решения I и II принцип. Реализация I принципа заключается в использовании проветриваемых подполий. Основным недостатком данного принципа является растепление грунтов основания за счет теплопроводности материала свай и так же существует вероятность техногенных вмешательств, что недопустимо, так как приводит к уменьшению несущей способности. II принцип разделяется на 2 вида: первый заключается в разморозке грунтов если позволяют геологические условия, второй вид - заморозка или поддерживание грунтов оснований в мерзлом состоянии.

Исследование энергоэффективности зданий и сооружений в регионах распространения ВМГ с учетом изложенного выше является актуальной задачей. Для исследования необходимо выявить самые энергоэффективные методы строительств оснований зданий и сооружений на основе теплотехнических расчетов.

Наиболее распространен методами строительства фундаментов на ВМГ это свайное основание. Так же используется метод льдогрунтовых плит созданных или поддерживаемых системами ТСГ в мерзлом состоянии. Системы ТСГ можно разделить на две группы естественно действующие (СОУ) и принудительные с потреблением электроэнергии. К естественно действующим относятся: термосифоны (жидкостной или парожидкостной), система ГЕТ (горизонтальная естественно действующая трубчатая система), система ВЕТ (вертикально естественно действующая трубчатая система) . Системы с принудительным охлаждением не рассматриваются так как они работают потребляя электроэнергию, а значит энерго не эффективны. Последующий расчет будет направлен на определение того какой метод строительства оснований фундаментов наиболее энергоэффективен.

Для расчетов был выбран проект двух этажного жилого дома в г. Салехард, план первого этажа показан на рисунке 1. Ширина здания 8,4 м, длинна 20,15 м, температуру воздуха внутри помещения принимаем согласно [3], tв=20 °С, для лестничной клетки tв=16 °С. Температура наружного воздуха принимается в соответствии с [4]:

$$t_н = \frac{t_1 + t_5}{2} = \frac{-46 - 42}{2} = -44\ ^0C \qquad (1)$$

где t_1 - температура наиболее холодных суток °С обеспеченностью 0,92 (Таблица 1[1]), t_5 - температура наиболее холодной пятидневки °С обеспеченностью 0,92 (Таблица 1[1]). Продолжительность отопительного периода для г.Салехарда составляет $z_{от.пер.}$ = 292 сут. со средней температурой отопительного периода $t_{от.пер}$=-11,4 °С[1]. Среднегодовая температура вечномерзлых грунтов (ВМГ) составляет $t_{вмг}$ = -5°С, средняя глубина сезонного оттаивания грунтов составляет $h_{сог} \leq 2$ м[1].

По плану рисунок 1. находим площадь пола во всех комнатах

Проводим теплотехнический расчет термического сопротивления теплопередачи и определяем минимальную толщину теплоизоляционного слоя. Определяем градус сутки отопительного периода (ГСОП):

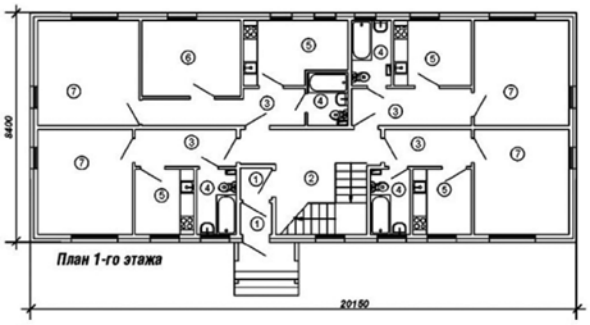


Рисунок 1 - План первого этажа

$$ГСОП = \left(t_в - t_{от.пер.}\right) z_{от.пер.} = (20-(-11{,}4)) \cdot 292 = 9169$$

После этого вычисляем приведенное энергетическое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, соответствующее высоким теплозащитным свойствам Rотрэн. для подвального перекрытия с помощью [4] путем интерполяции, получаем $R_o^{тр}$эн.= 6,03 м^2 °С/ Вт после этого вычисляем требуемое термическое сопротивление теплопередаче R0тр по [4]

$$R_0^{тр} = 0{,}6 \cdot \frac{\left(t_в - t_н\right)}{\Delta t^н \cdot \alpha_в} \qquad (3)$$

где $\Delta t^н$ - нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, °С[4], α - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения, Вт/(м$^{2°}$·С)[4]

При вычисление получаем $R_o^{тр} < R_o^{тр}{}_{эн}$ и для дальнейших расчетов используем $R_o^{тр}{}_{эн}$. Определяем минимальную толщину расчетного слоя тепловой изоляции из условия равенства $R_{пд} = R_o^{тр}{}_{эн}$:

$$R_{пд} = R_в + R_1 + \ldots + R_x + \ldots + R_n + R_н = \frac{1}{\alpha_в} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \ldots + \frac{\delta_x}{\lambda_x} + \ldots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_н} \qquad (4)$$

где R_1,...,R_n – сопротивления теплопередаче отдельных слоев ограждения, м$^{2°}$·С/Вт; Rx – сопротивление теплопередаче расчетного слоя, м2°·С/Вт; Rв, Rн – термическое сопротивление теплопереходу от воздуха помещения к внутренней поверхности ограждения и от внешней поверхности к наружному воздуху, м$^{2°}$·С/Вт; λ_1,..., λ_n – толщина отдельных слоев, м; δ_1,..., δ_n – коэффициенты теплопроводности материалов конструктивных слоев ограждения, Вт/(м$^{2°}$·С); $\alpha_н$ - коэффициент теплоотдачи внешней поверхности ограждения, Вт/(м$^{2°}$·С)

Из выражения (4) определяется толщина основного расчетного слоя δ_x, то есть

$$\delta_x = \left[R_{o\ эн.}^{тр} - \left(\frac{1}{\alpha_в} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \ldots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_н} \right) \right] \cdot \lambda_x \qquad (5)$$

Подвальное перекрытие состоит из следующих слоев: ЖБ плита λ_1 =1,98, Вт/(м·°С) толщиной δ_1 =0,22 м; Утеплителя пенополиуретан λх=0,04 Вт/(м·°С) толщиной δ_x; деревянное напольное покрытие λ_2=0,16, Вт/(м·°С) толщиной δ_2=0,04 м, получаем:

$$\delta_x = \left[6{,}03 - \left(\frac{1}{8{,}7} + \frac{0{,}22}{1{,}98} + \frac{0{,}04}{0{,}16} + \frac{1}{27} \right) \right] \cdot 0{,}04 = 0{,}24 м \qquad (6)$$

Получившуюся толщину округляем до числа кратного 5 в большую сторону[4] получаем δ_x=0,25 м, Определяем фактическое термическое сопротивлении подвального перекрытия $R^{ф}_{пд}$

$$R_{пд}^{ф} = \frac{1}{8{,}7} + \frac{0{,}22}{1{,}98} + \frac{0{,}25}{0{,}04} + \frac{0{,}04}{0{,}16} + \frac{1}{27} = 6{,}76 м^{20} С / Вт \qquad (7)$$

Определяем коэффициент теплопередачи k, Вт/(м^2·°С), то есть

$$k = \frac{1}{R_{пд}^{ф}} = \frac{1}{6{,}76} = 0{,}148 \text{ Вт/(м2}^{2\,0}\text{C)} \qquad (8)$$

Теперь составляем расчет тепловых потерь через подвальное перекрытие и заносим результаты в таблицу №1. Основные теплопотери Q (Вт) определяются из выражения

$$Q = F \cdot k \cdot (t_в - t_н) \cdot n \qquad (9)$$

Таблица 1 - Таблица основных теплопотерь через подвальное перекрытие.

Основные теплопотери через подвальное перекрытие									
Комната	Вид ОК	$t_в$, °С	Тип помещения	размеры, м		Площадь, м^2	k, Вт/м^2 °С	$(t_в-t_н)$*n, °С	Теплопотери Q, Вт
				а	б				
кв 1, комнат	Подвал	20	УК	3,8	3,4	12,92	0,148	38,4	73,36
кв 1, кухня	Подвал	18	КХ	3,8	2	7,6	0,148	37,2	41,80
кв 1, ванная	Подвал	18	ВН	1,5	3,8	5,7	0,148	37,2	31,35
Кв 2, зал	Подвал	20	УК	3,6	3,8	13,68	0,148	38,4	77,67
кв 2, спальня	Подвал	18	РК	3,4	3,8	12,92	0,148	37,2	71,07
кв 2, кухня	Подвал	18	КХ	3,7	3,8	14,06	0,148	37,2	77,34
кв 3, кухня	Подвал	18	КХ	4,3	3,8	16,34	0,148	37,2	89,88
кв 3, комната	Подвал	20	УК	3,8	3,6	13,68	0,148	38,4	77,67
кв 4, комната	Подвал	20	УК	3,8	3,6	13,68	0,148	38,4	77,67
кв 4, кухня	Подвал	18	КХ	2	3,8	7,6	0,148	37,2	41,80
кв 4, ванная	Подвал	18	ВН	1,5	3,8	5,7	0,148	37,2	31,35
Лестничная клетка	Подвал	16	ЛК	3,8	4,6	17,48	0,148	36	93,05
								Q, Вт	**784,02**

где k – коэффициент теплопередачи ограждения, Вт/(м^2·°С); F – расчетная площадь, м^2; $t_н$ – расчетная температура наружного воздуха, °С; n – поправочный коэффициент (для подвала n=0,6)

На рисисунке 2 показано строение основания фундамента здания с использованием системы ТСГ. Данная конструкция позволяет использовать часть грунта и утеплителя под ним как дополнительное термическое сопротивление теплопередачи и уменьшить

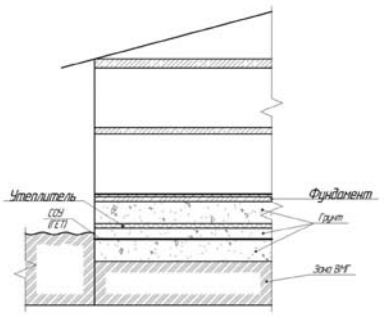


Рисунок 2 - Строение фундамента и основания при использование системы ГЕТ

перепад температур $\Delta t = (t_в - t_н)$ так как температура на глубине принимает значение 0°С.

Градус сутки отопительного периода остается таким же что и в (2) путем интерполяции, получаем $R_o^{тр}{}_{эн.}$= 6,03 м²°С/Вт, после вычисляем требуемое термическое сопротивление теплопередачи $R_o^{тр}$ (3) и сравниваем с $R_o^{тр}{}_{эн.}$ получаем $R_o^{тр} < R_o^{тр}{}_{эн.}$, для дальнейших расчетов выбираем $R_o^{тр}{}_{эн.}$.

Пол по грунту состоит из следующих слоев: деревянное напольное покрытие λ_1=0,16, Вт/(м·°С) толщиной δ_1=0,04 м; утеплителя пенополиуретан λ_2=0,04, Вт/(м·°С) толщиной δ_2=0,1 м (минимальное значение которое можно использовать для утепления[4]); ЖБ плита λ_3=1,98, Вт/(м·°С) толщиной δ_3=0,22 м; грунт талый λ_4=1,91, Вт/(м·°С) толщиной δ_4=1 м; Утеплитель пеноплекс λ_5=0,03, Вт/(м·°С) толщиной δ_5, м. Данную толщину утеплителя мы определим из двух условий, что фактическое термическое сопротивление $R^{Ф}_{ndII} \geq R_0^{тр}{}_{эн}$ и на границе теплового баланса t=0°С, т.е. тепловые потоки со стороны пола и со стороны СОУ должны быть равны по модулю $|q_{пг}| = |q_{СОУ}|$

Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} R^{ф}_{пдII} \geq R_0^{тр}{}_{эн} \\ q_{пг} = k_{II} \cdot (t_в - 0) = k_{II} \cdot t_в \\ q_{СОУ} = k_{СОУ} \cdot (0 - t_{СОУ}) = -k_{СОУ} \cdot t_{СОУ} \end{cases} \quad (10)$$

где k_{II} - коэффициент теплопередачи со стороны пола;

$k_{СОУ}$ - коэффициент теплопередачи со стороны СОУ;

$t_{СОУ}$ - температура грунта граничащего с СОУ, для расчетов принимаемой -10 0С;

$t_в$ - расчетная температура внутри помещения, 0С.

Распишем коэффициенты k_{II} и $k_{СОУ}$ через искомую величину δ_3, получим:

$$\begin{cases} k_{II} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{\alpha_в} + \dfrac{\delta_1}{\lambda_1} + \dfrac{\delta_2}{\lambda_2} + \dfrac{\delta_3}{\lambda_3} + \dfrac{\delta_4}{\lambda_4} + \dfrac{\delta_5}{\lambda_5}} \\ k_{СОУ} = \dfrac{1}{\dfrac{\delta_6}{\lambda_4} + \dfrac{\delta - \delta_5}{\lambda_5}} \end{cases} \quad (11)$$

где δ - общая толщина утеплителя, для данного расчета принимаемую 200 мм.

с учетом условия $|q_{пг}| = |q_{СОУ}|$ и уравнений 10 и 11 получим равенство:

$$\left| \frac{t_в}{\dfrac{1}{\alpha_в} + \dfrac{\delta_1}{\lambda_1} + \dfrac{\delta_2}{\lambda_2} + \dfrac{\delta_3}{\lambda_3} + \dfrac{\delta_4}{\lambda_4} + \dfrac{\delta_5}{\lambda_5}} \right| = \left| - \frac{t_{СОУ}}{\dfrac{\delta_6}{\lambda_4} + \dfrac{\delta - \delta_5}{\lambda_5}} \right| \quad (12)$$

из этого равенства выражаем искомую переменную δ_5 равную:

$$\delta_5 = \frac{\delta + \lambda_5 \cdot \left(\dfrac{\delta_6}{\lambda_4} - \left(\dfrac{1}{\alpha_в} + \dfrac{\delta_1}{\lambda_1} + \dfrac{\delta_2}{\lambda_2} + \dfrac{\delta_3}{\lambda_3} + \dfrac{\delta_4}{\lambda_4} \right) \cdot \dfrac{|-t_{СОУ}|}{t_в} \right)}{1 + \dfrac{|-t_{СОУ}|}{t_в}} \quad (13)$$

подставляем в уравнения 13 все известные значения, получаем δ_5 ≈0,1 м

Определяем фактическое термическое сопротивлении $R^{ф}_{пдII}$:

$$R^{ф}_{пдII} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,22}{1,98} + \frac{0,1}{0,04} + \frac{0,04}{0,16} + \frac{1}{1,91} + \frac{0,1}{0,03} = 6,95 \text{ м}^2\text{°С / Вт} \quad (14)$$

проверяем соблюдения условия - условие соблюдается, вычисляем коэффициент теплопередачи k_{II}:

$$k_{II} = \frac{1}{R^{ф}_{пдII}} = \frac{1}{6,95} = 0,144 \text{ Вт/(м}^2\text{°С)} \quad (15)$$

Теперь составляем расчет тепловых потерь и заносим результаты в таблицу №2.

Для визуального отображения расчета построим эпюры температур для каждого из расчетных случаев на рисунке 3.

На рисунке 3б видно что площать эпюры под зданием значительно меньше чем на рисунке 3а, так же перепад температур значительно меньше, что в совокупности приводит к уменьшению удельного теплового потока q и сокращению общих теплопотери через подвальное перекрытие Q.

Также на рисунке 4 показано изменение общих теплопотерь при использование различных оснований для фундамента. За максимальное значение (100%) были взяты теплопотери через подвальное перекрытие при использовании свайного снования фундамента Q=784 Вт (5,5 Вт/м²).

Диаграмма расположенная на рисунке 4 показывает, теплопотери при использовании систем

Таблица 2 - Таблица основных теплопотерь через подвальное перекрытие.

Комната	Вид ОК	$t_в$, °С	тип помещения	размеры, м		Площадь, м²	k, Вт/м²°С	$(t_в-t_н)*n$, °С	Теплопотери Q, Вт
				а	б				
кв 1, комнат	Подвал	20	УК	3,8	3,4	12,92	0,144	12	22,30
кв 1, кухня	Подвал	18	КХ	3,8	2	7,6	0,144	10,8	11,81
кв 1, ванная	Подвал	18	ВН	1,5	3,8	5,7	0,144	10,8	8,85
Кв 2, зал	Подвал	20	УК	3,6	3,8	13,68	0,144	12	23,61
кв 2, спальня	Подвал	18	РК	3,4	3,8	12,92	0,144	10,8	20,07
кв 2, кухня	Подвал	18	КХ	3,7	3,8	14,06	0,144	10,8	21,84
кв 3, кухня	Подвал	18	КХ	4,3	3,8	16,34	0,144	10,8	25,38
кв 3, комната	Подвал	20	УК	3,8	3,6	13,68	0,144	12	23,61
кв 4, комната	Подвал	20	УК	3,8	3,6	13,68	0,144	12	23,61
кв 4, кухня	Подвал	18	КХ	2	3,8	7,6	0,144	10,8	11,81
кв 4, ванная	Подвал	18	ВН	1,5	3,8	5,7	0,144	10,8	8,85
Лестничная клетка	Подвал	16	ЛК	3,8	4,6	17,48	0,144	9,6	24,14
								Q, Вт	225,90

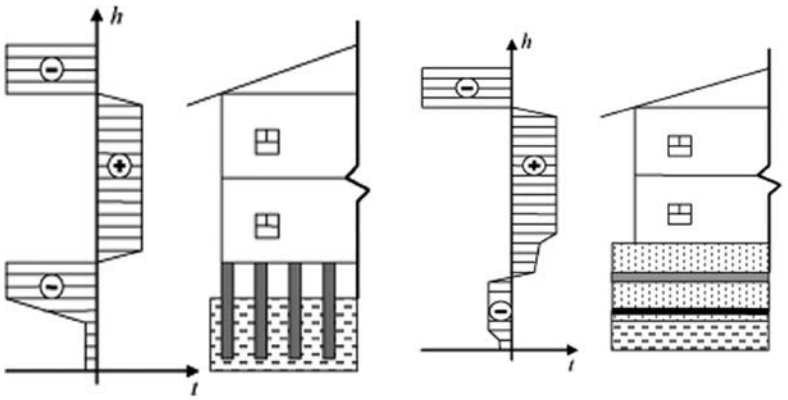


Рисунок 3 - Эпюра температур а - свайное основание, б - полы по грунту.

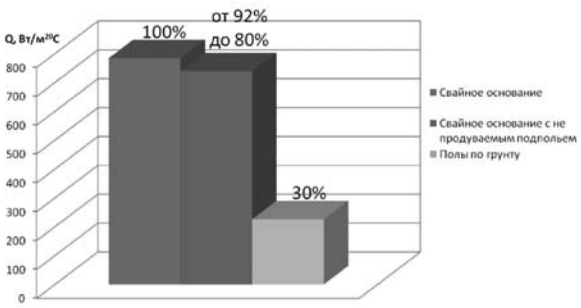


Рисунок 4 - Диаграмма общих теплопотерь для различных оснований фундаментов.

ТСГ, типа СОУ (система ГЕТ), уменьшаются с 784 Вт до 225,9 Вт. Сокращение до 70% тепловой энергии теряемой на подвальное перекрытие позволяет внести корректировки в использование энергоресурсов. Так в год можно сэкономить до 26,7 кВт/м²год или 3,7 МВт/год.

Таким образом применение систем СОУ позволяет не только поддерживать тепловой режим грунтов оснований но и так же появляется возможность снизать энергозатраты до 7% от общих теплопотерь. Что составляет половину требуемых 15% по федеральному закону ФЗ-№261. ФЗ-261 обязывает снизить энергопотребление на 15% к 2015 году по 3% в год.

Список литературы

1. СНиП 23-01-99*, Строительная климатология.
2. СНиП 2.02.04-88, Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
3. ГОСТ 12.1.005-88 , Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
4. СНиП 23-03-2003, Тепловая зашита зданий
5. Федеральный закон ФЗ-№261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»

ВОПРОСЫ КАЧЕСТВА, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СЕЗОННО-ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ (СОУ)

А.Н. Евженко, С.В. Плеханов, А.В. Гольцов

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

В докладе сформулированы задачи для обеспечения качества СОУ. Приведены примеры, иллюстрирующие эффективность внедрения инновационных технологий и современного оборудования на качество продукции. Все вопросы качества рассмотрены применительно для производства СОУ в ООО НПО «Фундаментстройаркос».

НПО «Фундаментстройаркос» является предприятием, использующим новейшие технологии производства, в основе которых находятся передовые научно-технические разработки. Основной выпускаемой продукцией нашего предприятия являются сезонно-охлаждающие устройства (СОУ).

В настоящее время разработаны четыре основных вида сезонно-действующих охлаждающих устройств, сокращенно СОУ:

Первый вид СОУ – Горизонтальная естественно-действующая трубчатая система («ГЕТ»).

Второй вид СОУ – Вертикальная естественно-действующая трубчатая система («ВЕТ»).

Третий вид СОУ – Индивидуальные термостабилизаторы.

Четвертый вид - Глубинные СОУ.

Все системы используются на Крайнем Севере для замораживания талых и охлаждения пластично-мерзлых грунтов оснований при строительстве новых и реконструкции существующих сооружений промышленного и жилищно-гражданского назначения, сохранения мерзлоты в процессе эксплуатации зданий и сооружений, расположенных в зоне развития вечной мерзлоты.

Качество СОУ, создаваемых НПО «Фундаментстройаркос», эффективность их работы, обеспечиваются:

• наличием производственных мощностей (площади, оборудование, инженерные сети), обеспечивающих выполнение производственных планов;

• точностью и надежностью применяемого технологического оборудования;

• внедрением новых технологий, совершенствованием применяющихся в производстве технологических процессов;

• постоянной модернизацией отдельных участков производства, с целью минимизировать влияние «человеческого фактора» на технологию производства продукции;

• расширенным пооперационным контролем и компьютерным контролем в процессе производства деталей СОУ;

• изготовлением и применением оборудования собственного производства с использованием оригинального, разработанного на «Фундаментстройаркосе» программного обеспечения;

• собственными разработками специализированных программных пакетов для измерений и пооперационного контроля, и созданием на их базе уникальных контрольных и измерительных приборов;

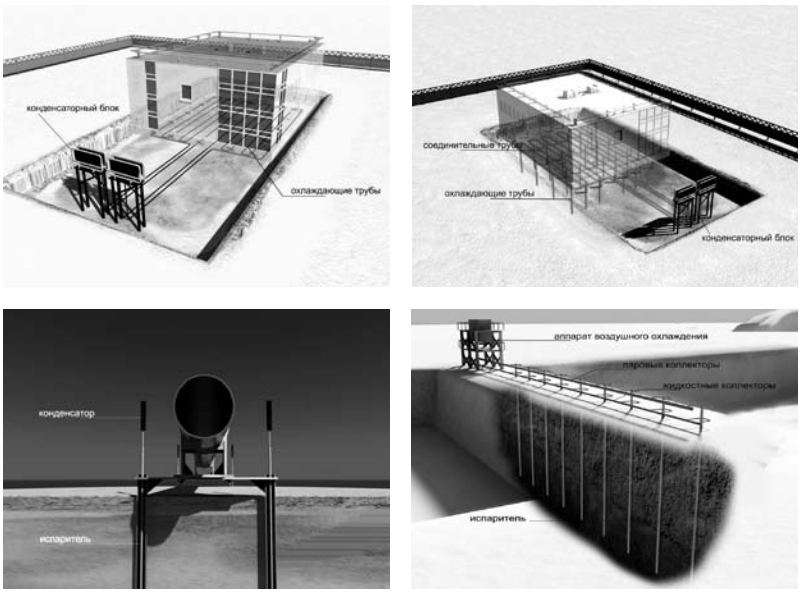


Рисунок 1 – Выпускаемая продукция

• развитой компьютерной инфраструктурой, позволяющей ведение компьютерного контроля с быстрой передачей данных по локальной сети;

• квалификацией персонала предприятия, правильной организацией производства;

• обучением и повышением квалификации по отдельным видам профессий (оператор автоматических сварочных установок, оператор- заправщик хладагента), так как нет учебных заведений, способных обучить данным профессиям с учетом специфики «Фундаментстройаркоса» и применяемых у нас технологий!

Все вышеуказанные факторы, как правило, взаимосвязаны и неотделимы один от



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

Система добровольной сертификации систем менеджмента «Регистр систем менеджмента»

ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА ТЮМЕНСКОГО НЕКОММЕРЧЕСКОГО ФОНДА СЕРТИФИКАЦИИ

Россия, 625026, г.Тюмень, ул.Одесская, 52а

№ РОСС RU.0001.13ФК10

№ 01746

СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

НАСТОЯЩИЙ СЕРТИФИКАТ УДОСТОВЕРЯЕТ:

система менеджмента качества применительно к проектированию, разработке, изготовлению, монтажу и сервисному обслуживанию систем температурной стабилизации основной группы, применяемых для замораживания и температурной стабилизации мерзлых грунтов оснований зданий и сооружений, инженерных изысканиям, проектированию фундаментов, устройству буронабивных свай, строительству зданий и сооружений I и II уровней ответственности промышленного и жилищно-гражданского назначения

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ

ГОСТ Р ИСО 9001-2008 (ИСО 9001:2008)

Регистрационный № РОСС RU.ФК10.К00026

Дата регистрации 07.10.2010 Срок действия до 02.10.2011

Руководитель органа по сертификации интегрированных систем менеджмента Т.Н. Чуманова

Председатель комиссии Е.А. Шешукова

Рисунок 2 - Сертификат соответствия требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2008

другого. И для того, чтобы связать эти факторы в единое целое, на предприятии в 2007 году внедрена система менеджмента качества (СМК), соответствующая требованиям стандартов качества ИСО серии 9000.

Система менеджмента качества выполняет такие задачи как:

- ориентирует сотрудников на качество;
- систематизирует документооборот;
- распределяет полномочия и ответственность, регулирует взаимодействие между подразделениями;
- вырабатывает единые требования к оформлению документации (инструкциям, регламентам, положениям, правилам и др.)

Важнейшей составляющей всей системы качества является качество продукции. Качественная продукция не может быть произведена без качественной работы всех структурных подразделений, таких как: конструкторский отдел; производственный комплекс; отдел технического контроля и др. **Здесь важно отметить, что ответственность за качество выпускаемой продукции лежит на всех работниках предприятия, вне зависимости от занимаемой должности**.

При этом ОТК, являющийся независимым органом, выполняет важные контрольные функции, для выявления сбоев в работе системы.

Для обеспечения выполнения требований к качеству составных частей и комплектующих систем термостабилизации, индивидуальных СОУ, последовательно выполняются контрольные операции:

- входной контроль;
- пооперационный контроль исполнителем 100%;
- пооперационный контроль ОТК;
- испытание;
- окончательная приемка перед укладкой в упаковку;
- контроль упаковки.

Все поступающие материалы и комплектующие, использующиеся в производстве СОУ, подвергаются входному контролю. Не допускается приобретение материалов и комплектующих без документа о качестве.

Кроме того, при выполнении операций входного контроля производятся:

- как визуально – измерительный контроль, с проверкой на соответствие материалов и комплектующих требованиям нормативной документации;

- так и проведение периодических испытаний с целью подтверждения качества материалов после их запуска в производство (например, праймер, труба алюминиевая для элементов оребрения).

В процессе производства изделий СОУ контроль качества выполняется исполнителями и сотрудниками ОТК, при этом ведутся следующие документы, подтверждающие качество выполненных работ:

- акт пооперационного контроля;
- акт освидетельствования скрытых работ;
- акт контроля опрессовки изделий;
- акт заправки СОУ весовым методом и проверки на утечку хладагента;
- акт контроля производства вентилей;
- акт испытания на прочность, плотность, герметичность и вакуумирование;
- журналы сварочных работ, заправки, сварки;
- заключение по проверке качества сварных соединений;
- исполнительная схема сварных соединений и др.



Если не уделять серьезного внимания качеству, потребуются значительные средства на исправление дефектов. Гораздо больший эффект будет достигнут путем проведения мероприятий по предотвращению дефектов. На нашем предприятии работает система, при которой обнаруженный дефект, брак, анализируется, выявляются причины его возникновения, принимаются меры по недопущению аналогичных несоответствий в дальнейшем. Таким образом, появилась возможность управлять качеством. Поэтому основной задачей по обеспечению выпуска качественной продукции является кроме выявления брака, его предупреждение.

На графике мы можем проследить динамику выявленных несоответствий в период с 2007г. по настоящее время.



Рисунок 3 - Выявленные несоответствия в период с 2007г. по 2011г.

На предприятии существует и действует лаборатория неразрушающего контроля (ЛНК) и механических испытаний. Лаборатория НК НПО «Фундаментстройаркос» укомплектована необходимым оборудованием, а квалифицированные работники обеспечивают объективный контроль качества. Особенностью квалификации персонала лаборатории является владение одним работником разными методами контроля качества и совмещение разных должностных обязанностей. Имеются документы подтверждающие соответствие «Правилам аттестации ЛНК»:

• санитарно-эпидемиологическое заключение;

• лицензия на осуществление деятельности;

• свидетельство об аттестации.

Производственный комплекс играет важную роль в обеспечении выпуска качественной продукции. **Основная функция производственного комплекса ООО НПО «Фундаментстройаркос» - качественное изготовление и упаковка составных частей и комплектующих сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ).**

По состоянию на IV квартал 2011 г., в производственном комплексе применяются следующие технологии:

• автоматическая заправка индивидуальных СОУ хладагентом с компьютерным контролем;

• холодная прокатка биметаллических труб – производство элементов оребрения;

• нанесение антикоррозионного цинкового покрытия - газотермическое электродуговое напыление (электродуговая металлизация);

• дробеструйная очистка и нанесение защитного покрытия;

• вальцевая гибка листовых заготовок;

• плазменная резка трубных заготовок;

• лазерная резка и гибка листовых материалов на оборудовании с числовым программным управлением;

• автоматическая сварка стальных труб вращающейся дугой в магнитном поле, с компьютерным контролем процесса.

Подробней остановимся на автоматической сварке.

Преимущества сварки вращающейся дугой (СВД) заключается в следующем:

• высокая производительность (продолжительность сварки до 15 сек);

• равнопрочность сварного шва и тела трубы;

• минимальная высота наружного и внутреннего грата;

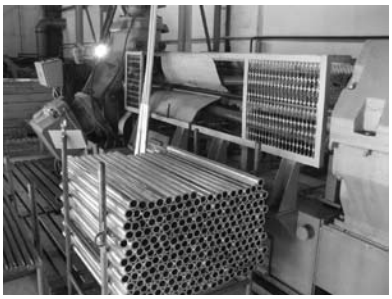
• абсолютная герметичность сварного соединения;

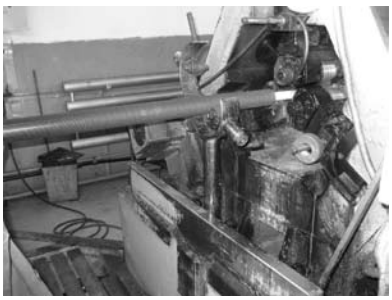
• отсутствие необходимости неразрушающего контроля сварных швов;

• высокая степень автоматизации.

Компьютерный контроль параметров сварки при изготовлении термостабилизаторов выполняется в объеме 100%, при этом обеспечивается абсолютная герметичность и прочность сварного стыка. После сварки каждого сварного шва на мониторе компьютера автоматически выводятся данные о сваренном







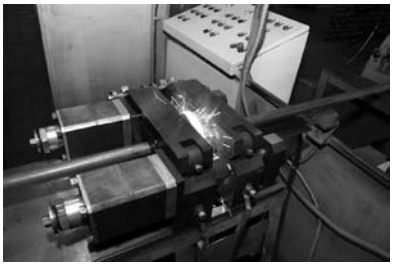










стыке.

Происходит считывание всех измеряемых величин, которые представлены в виде графиков и диаграмм: тока, напряжения сварки, напряжения трех фаз и давления. Также на мониторе отображается заключение о годности или негодности стыка. Если шов соответствует установленным параметрам, то в окне выводится строка «ШОВ № ГОДЕН» со значениями параметров. Если же шов не прошел по параметрам, то окно принимает красный цвет, и выводится информация: по каким причинам произошел сбой. Результаты сварки сохраняются в виде таблиц и графиков.

Наряду с компьютерным контролем осуществляется визуально-измерительный контроль (ВИК). Кроме компьютерного и визуально-измерительного контроля производится испытание на механическую прочность. Из числа изготовленных изделий сотрудники ОТК выбирают методом случайной выборки сварные стыки для проведения механических испытаний. Испытания проводят в лаборатории механических испытаний на разрыв и изгиб.

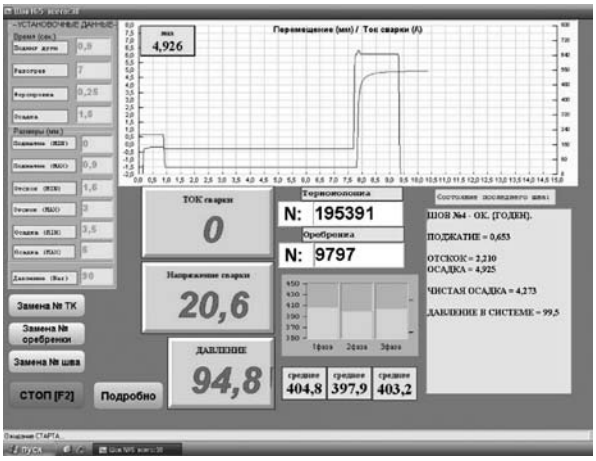


Рисунок 12 - Данные сварного шва на мониторе компьютера

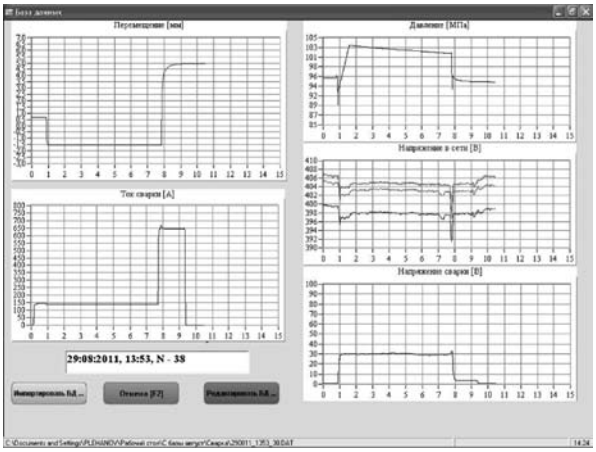


Рисунок 13 - Графические данные сварного шва

«Фундаментстройаркос» последовательно и в комплексе проводит внутреннюю политику повышения качества, и будет уместно привести еще ряд выборочных примеров.

В декабре 2007 г., в производственном корпусе Новаторов 12 осуществлен переход от выполнения операций изготовления термостабилизаторов на отдельных рабочих местах - к упорядоченному производству с пооперационным компьютерным контролем сварки и заправки хладагентом. Смонтирована и запущена в эксплуатацию производственная линия изготовления и заправки термостабилизаторов.

В июле 2009 г. на базе №2 (Матмассы) введена в эксплуатацию полуавтоматическая линия нанесения защитного цинкового покрытия.

Внедрение технологии газотермического электродугового напыления позволило при изготовлении труб охлаждающих (ТО) и труб охлаждающих вертикальных (ТОВ):

- не только исключить операции обезжиривания, грунтовки и покраски вручную,

- но и значительно улучшить качество защитного покрытия, повысить культуру производства, и, через определенное время – производительность труда.

Одновременно часть соединительных деталей СОУ была переведена на технологию «ручной металлизации».

С 2010 г. начат выпуск конденсаторов и те-



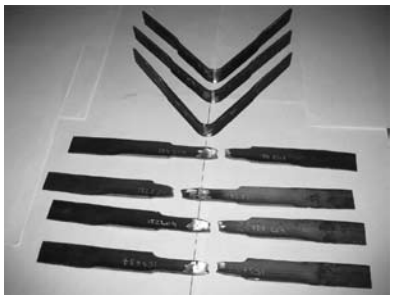


Рисунок 14 - Образцы для механических испытаний



Рисунок 15 - Производственная линия изготовления и заправки термостабилизаторов

плоотдающих элементов с защитным цинковым покрытием.

Впоследствии:

- в октябре 2010 г. для снижения расхода цинка при нанесении покрытия применено сопло оригинальной конструкции (разработчик Одношивкин В.В., МЭС Фундаментстройаркос), в результате получено качественное покрытие с более равномерной толщиной, чем на сопле завода – изготовителя;

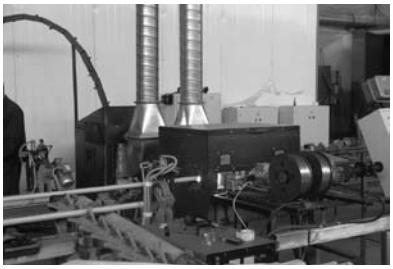




Рисунок 16 - Полуавтоматическая линия нанесения защитного цинкового покрытия

- в июле-августе 2011г. с целью повышения производительности по оцинкованным корпусам (для ПУ№1) реконструирована система вентиляции и увеличена мощность линии по дробеструйной очистке и металлизации.

А в производственном корпусе (Новаторов 12) произведена модернизация линии по производству термостабилизаторов - добавлены дополнительные участки струйной очистки и металлизации сварных стыков.

Результат данных мероприятий – производство полностью оцинкованных индивидуальных СОУ, аналогов которым нет в РФ.



Рисунок 17 - Металлизация деталей и соединительных элементов СОУ



Рисунок 18 - Производство конденсаторов и теплоотдающих элементов с защитным цинковым покрытием

В январе 2010г. смонтирована и запущена полуавтоматическая установка заправки с компьютерным контролем, а в июле 2010 она была полностью реконструирована с **достижением полной автоматизации** цикла.



Рисунок 19 - Полуавтоматическая установка заправки с компьютерным контролем



Рисунок 20 - Климатическая камера для испытаний термостабилизаторов

Результат - полное исключение вмешательства оператора в процесс заправки, операции, выполняемые вручную, минимизированы и не позволяют изменить параметры процесса заправки при выполнении цикла по программе.



Рисунок 21 - Оборудование для вальцевой гибки листов толщиной до 16 мм

Дополнительно не только ужесточены требования к проведению пооперационных контрольных операций, но и увеличено их количество, например, дополнительная проверка наличия хладагента по уровню.

Особенно важным этапом в производстве индивидуальных СОУ стало введение в технологию производства термостабилизаторов испытаний на работоспособность.

Ежесменное проведение испытаний позволило еще на этапе производства оценивать последующую эффективность работы термостабилизаторов, которые ранее можно было сделать только после монтажа СОУ. Развитием этого важнейшего направления

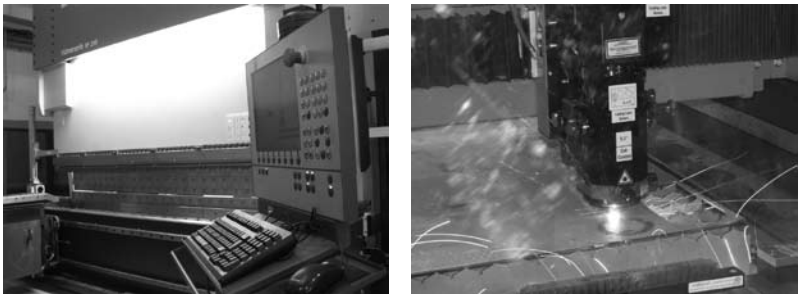


Рисунок 22 - Установка лазерной резки листов толщиной до 20мм и 250-тонный листогибочный пресс



Рисунок 23 - Производство инструмента для холодной прокатки оребрения, а также узлов и деталей для сварочных установок АСУ ГМ

работы стало проектирование, строительство и применение специализированных холодильных камер, в которых измерения и сохранение данных производится через специальное программное обеспечение.

Результаты, получаемые при контроле и испытаниях на этапе производства, согласуются с успешной работой СОУ на объектах, что подтверждается данными, полученными при помощи тепловизоров.

Следует отметить, что, с 2010 г. параллельно реконструируется и заправка углекислотных термостабилизаторов, использующаяся в составе линии на Новаторов 12.

Кроме того, во II квартале 2010 г. испытано и введено в эксплуатацию оборудование для хранения, очистки и перекачки жидкой двуокиси углерода, что позволило уйти от использования CO2 в состоянии поставки. В настоящее время углекислотные термостабилизаторы заправляются углекислотой, прошедшей дополнительную 4-х кратную очистку от примесей высококипящей фракции (вода) и низкокипящей фракции (смесь N_2, O_2, H_2S).

В июне-июле 2010 г. осуществлен ввод в эксплуатацию первой очереди цеха струйной очистки и покраски на ПБ№1. Ранее, длительное время зачистка блоков перед грунтовкой являлась одним из самых трудоемких процессов, т.к. производилась шлифмашинками вручную. Значительный расход шлифовальных кругов никак не удешевлял себестоимость продукции.

Совмещение дробеструйной очистки с грунтовкой блоков в 2 слоя на ПБ№1 позволило повысить производительность труда в 1,5 раза и улучшить условия труда рабочих. В настоящее время мощности по дробеструйной очистке и покраске на ПБ№1 **утроены**, в связи с производственной необходимостью.

2011 г. – важный этап в плане общего и специализированного развития металлообработки на «Фундаментстройаркосе». Приобретено технологическое оборудование для вальцевой гибки листов толщиной до 16 мм.

В период с марта по май 2011г. смонтирована и введена в эксплуатацию установка лазерной резки листов толщиной до 20мм включительно и 250 тонный листогибочный пресс.

Данное оборудование сразу же было задействовано в производстве деталей для конденсаторных блоков и ускорителей циркуляции. При этом был достигнут тройной положительный эффект:

- снижение трудоемкости – из техпроцесса исключаются операции: рубка (газовая резка), разметка, сверление, фрезерование, слесарная (зачистка);
- повышение производительности труда – например, комплект деталей для 30 блоков и 30 ускорителей из листов толщиной 5 и 10мм изготавливается за 4 смены;
- оптимизация конструкции – применение листовой гибки по 3-м точкам позволило изменить конструкцию опор, с исключением предварительной сварки деталей опор между собой.

Причем расходы на основные и вспомогательные материалы, необходимые для лазерной резки и гибки по 3-м точкам, несущественно влияют на себестоимость изделия в связи с вышеуказанными преимуществами.

Создано собственное инструментальное производство, с использованием токарного, фрезерного, плоско - и круглошлифовальных станков, технологии шлифования внутренних поверхностей. Введено в действие отделение термической обработки.

С апреля 2011 г.:

- организовано собственное производство инструмента для холодной прокатки оребрения (ранее – заказывали на стороне с переменным качеством)

- организовано собственное производство узлов и деталей для сварочных установок АСУ ГМ.

С 2012 г. запланировано изготовление серийно выпускаемых деталей для СОУ обработкой резанием с использованием универсального высокопроизводительного оборудования с ЧПУ. В декабре 2011 – январе 2012 запланирован ввод в эксплуатацию двухшпиндельного токарно-револьверного станка с ЧПУ фирмы МАЗАК, Япония.

Ожидаемый эффект:

- снижение машинного времени обработки деталей в 1,5-2 раза,
- исключение 3-х дополнительных операций и 2-х перемещений, имеющих место сейчас;
- повышение культуры производства.

Нельзя не упомянуть о важности правильной организации производства, которая напрямую влияет на качество продукции. Структура производственного комплекса адаптирована под цели и задачи «Фундаментстройаркоса», постоянно усовершенствуется и во многом имеет особую специфику. Наглядным примером является наличие производственных баз, которые, в тесном взаимодействии с производственными участками, обеспечивают жизнедеятельность производственных участков, инженерных сетей на вверенных территориях, а в случае ПБ№2 – еще и отгрузку систем и СОУ во все направления и практически – всеми видами транспорта.

В заключение хочу подчеркнуть – в модернизацию производства вложены и вкладываются немалые средства. Но «Фундаментстройаркос» сознательно идет на это для обеспечения 100% качества выпускаемых изделий, чтобы гарантировать заявленные технические характеристики и потребительские свойства на весь период эксплуатации объектов.

«Фундаментстройаркос» очень хорошо понимает и осознает всю ответственность перед Заказчиками при исполнении своих договорных обязательств!

ДИНАМИЧЕСКИЕ СМЕЩЕНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ПОЛЕЙ РАЗВИТИЯ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БЕСТЯХСКОЙ ТЕРРАСЫ РЕКИ ЛЕНА

Достовалов В. Б., Королев А. А.

ОАО «Проекттрансстрой», г. Москва, e-mail: pts@ptst.ru

В материалах описано своеобразие и уникальность некоторых поверхностных процессов, выявленных в результате дешифрирования аэрофотосъемочных и космоматериалов на правом берегу Лены при проведении инженерно-геологических изысканий под железнодорожное строительство. Указывается значимость и опасность этих процессов при хозяйственном освоении территории.

Повышенный интерес к современным процессам, развитым в пределах распространения среднечетвертичных отложений реки Лена, вполне закономерен, так как приход строящейся железной дороги к Якутскому правобережью р. Лены становятся естественным импульсом для развития дорожной сети и, следовательно, основой для хозяйственного освоения огромных восточных территорий. Кроме того, здесь же становится естественным строительство порта и перевалочной базы для расширенной транспортировки грузов вниз по Лене. Названные причины неминуемо потребуют самого пристального изучения инженерно-геологической обстановки на правом берегу Лены, т.е. области распространения аллювиальных отложений Бестяхской террасы.

Среднечетвертичные аллювиальные отложения Бехтяхской террасы хорошо изучены, они представлены очень однообразной толщей мелкозернистых песков редкими линзами супесей и суглинков общей мощностью до 60 м, почти повсеместно, залегающих на среднекембрийских известняках и доломитах устьботомской свиты. В основании аллювиальных отложений зафиксированы гравийно-галечниковые грунты [5, 6].

Для данной территории характерно сплошное распространение много¬летне¬мерзлых грунтов за исключением сквозного подруслового талика Лены. Глубина залегания подошвы слоя мерзлых пород составляет в абсолютном выражении минус 200 м, причем эта глубина промерзания с очень небольшими отклонениями вне зависимости от высоты дневной поверхности выдерживается на весьма значительной площади.

Таким образом, исходя из того, что определяющим фактором глубины промерзания на данной территории является глубинное тепловое поле Земли, правомерно предположить, что холодный период (период промерзания) был весьма значительным по времени, что, в свою очередь, исключило возможность влияния рельефа на глубину промерзания [7].

В разное время разными авторами было высказано мнение, что наличие обширного межмерзлотного талика в пределах распространения аллювиальных отложений Бестяхской и отчасти Тюнголюнской террас реки Лена вызвано кратковременной, с геологической точки зрения, «климатической оттепелью», вызвавшей дифференцированное оттаивание земной поверхности на различную глубину. Очевидно, что глубина протаивания во время «климатической оттепели» определялась абсолютными отметками (высотой) рельефа, теплоемкостью и проницаемостью слагающих данный участок грунтов, микроклиматом каждой точки данной территории.

Последующее похолодание вызвало новый этап промерзания поверхности, в результате чего «новая» мерзлота, на большей части территории, слилась с более древней, а межмерзлотный талик в пределах средних террас Лены является остаточным явлением на площадях наибольшего предыдущего протаивания (минимальные высотные отметки, максимальная проницаемость грунтов, незначительная теплоемкость).

Анализ материалов космических съемок [10] подтвердил правомерность этой точки зрения. Более того, результаты дешифрирования выявили, что период «климатической оттепели» характеризовался большим количеством атмосферных осадков, резко усиливших денудационные процессы (рисунок 1) и переуглубление долин малых рек притоков Лены.



Рисунок 1 – «Отпрепарированные» в результате эрозии атмосферными осадками склоны средней крутизны (р. Алдан)

По завершению «климатической оттепели» снижение количества атмосферных осадков, по-видимому, происходило с некоторым отставанием от снижения среднегодовых температур, следствием чего явилось образование грунтов «ледового комплекса» и аналогичных по льдонасыщенности подсклоновых отложений левобережья Лены.

Описываемая территория, как известно, обладает повышенной сейсмичностью и характеризуется разнонаправленными движениями блоков земной коры, что в свою очередь вызвало образование обширных зон дробления, подъемов, опусканий и перекосов блоков зем-



Рисунок 2 – Выход напорных подмерзлотных вод под телом наледи (Булуус, фото Андриянова А.И.)

ной коры относительно друг друга. Зоны дробления явились коллектором померзлотных вод, наличие которых обусловлено региональным водоупором, повсеместно развитой толщей многолетнемерзлых пород.

В то же время зоны дробления и особенно их «узлы» в местах пересечения крупных активных разломов создали зоны проницаемости с постоянно действующими восходящими потоками подмерзлотных напорных грунтовых вод, которые, собственно, и обусловили возникновение «памятников природы» – уникальных природных комплексов, расположенных вблизи полосы варьирования проектируемой железной дороги Беркакит – Томмот – Якутск. Именно источники напорных подмерзлотных вод обусловили возникновения таких «памятников природы», как Булуус, Улухан-Тарынг, Ерюю и других. Причем практически у всех «памятников природы» отмечены гриффонообразные выходы подземных вод, пространственно разобщенных с межмерзлотным таликом (рисунок 2). Особенно интересны зафиксированные на космическом снимке выходы напорных подмерзлотных вод, непосредственно в русло Лены в районе Нижнего Бестяха, возможного места строительства перевалочного речного порта (рисунок 3).

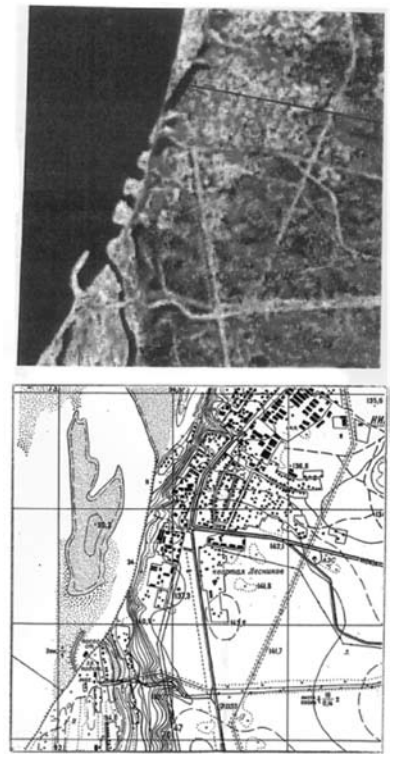


Рисунок 3 – Космоснимок и топокарта правого берега р. Лены в районе пос. Ниж. Бестях (песчаная коса периодически размывается вертикальными потоками подмерзлотных вод)

Здесь береговые песчаные косы на границе Бестяхской террасы и сквозного талика под руслом Лены периодически размываются восходящими потоками подмерзлотных напорных вод с образованием своеобразных «котлов». Эти «котлы» исчезают (заполняются песком) при каждом сколько-нибудь значительном подъеме воды Лене.

Все вышеописанное – наличие межмерзлотного талика, обильная его подпитка напорными подмерзлотными водами, современные движения блоков земной коры, повышенная сейсмичность территории, прорезание межмерзлотного талика, при пересечении толщи отложений Бестяхского комплекса долинами малых рек, создает условия для интенсивного выноса песков межмерзлотного талика с образованием пустот в межмерзлотном слое с последующим их обрушением. Весьма часто наблюдаются участки деградации склонов долин малых рек с оседанием блоков, нарушением сплошности дернового покрова и с разрушением инженерных сооружений (рисунок 4). Высокодебитные, сосредоточенные выходы межмерзлотных вод с интенсивным выносом талых грунтов, приводят к образованию своеобразных эрозионных цирков, часто с образованием ежегодно повторяющихся наледей (в том числе Булуус и Ерюю).

Совершенно новым для авторов явилось обнаружение своеобразного «плоского оползня» – смещения массива аллювиальных песков Бестяхского комплекса, представляющего собой фрагмент верхней мерзлой толщи, расположенного над межмерзлотным таликом общей площадью в 36 гектаров и массой не менее десяти миллионов тонн (рисунок 5, 6). По-видимому, в непосредственной близости от закартированного сместившегося массива находятся еще два, но с меньшей площадью и меньшей амплитудой сдвига. Кроме того «доказуемость» их движения менее очевидна.

Описываемый, сместившийся блок мерзлых аллювиальных песков Бестяхского комплекса, находится на левом берегу Лютенки в 4,5 км юго-восточнее моста АЯМ через Лютенку. Его площадь составляет около 36 га, мощность сместившегося пласта не менее 15 метров, максимальная амплитуда сдвига 50-60 м. Как отчетливо видно на приведенной аэрофотосхеме, мерзлый блок среднечетвертичных песков Бестяхской террасы надвинут на современные аллювиальные отложения русловой фации. Слева (южная сторона) уверенно дешифрируется расширяющаяся трещина отрыва с обнажением зеркала скольжения – поверхности нижней мерзлой толщи, а справа – шлейф выдавившихся из-под сместившегося блока песков, представляющих собой своеобразную «смазку», в настоящее время промерзших и предположительно льдистых. Для авторов оказалось невозможным определить генетический тип этих отложений, несмотря на то, что их происхождение вполне очевидно: выдавливание насыщенных водой песков в результате смещения подвижного блока. В результате движения подвижного блока на переднем его фасе возникло большое количество ду-



Рисунок 4 – Разрушение склона Бестяхской террасы в результате суффозионного выноса песков межмерзлотного талика в долину р. Менда (фото Дайковского С.В.)

гообразных трещин отрыва с образованием мелких оползневых тел, смещающихся в сторону реки. Сам массив так же подвергся интенсивному растрескиванию, но это растрескивание, по-видимому, в настоящее время «залечено» из-за смерзания противоположенных сторон трещин.

Очевидно, что подобные смещения значительных по объему и массе песочных блоков возможны только при одновременном наличии нескольких природных факторов.

Во-первых, подвижный блок должен представлять собой нечто единое, связанное. В нашем случае это цементация аллювиальных песков результате их промерзания.

Во-вторых, подстилающий слой должен быть разобщенным, допускающим движение. Здесь этим требованиям отвечают талые пески межмерзлотного талика.

В-третьих, необходима определенная «смазка» слоя скольжения. У нас это обводненность песков межмерзлотного талика.

В-четвертых, необходим хотя бы минимальный наклон поверхности скольжения для появления сдвиговой составляющей силы тяжести. Очевидно, что в результате современных тектонических движений такой наклон произошёл.



Рисунок 5 – Аэрофотосхема фрагмента р. Лютенга со сместившимся блоком мерзлых аллювиальных песков (верхняя мерзлая толща) Бестяхской террасы

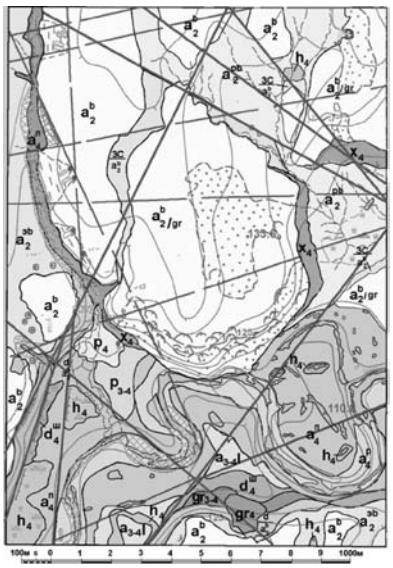


Рисунок 6 – Карта поверхностных процессов и явлений участка пересечения Бестяхской террасы долиной р. Лютенга

В-пятых, необходимо наличие свободного пространства, места для смещения скользящего блока. В результате размыва поверхности Бестяхской террасы с уничтожением верхнего мерзлого горизонта в современной долине Лютенки такое свободное для смещения пространство образовалось.

В-шестых, для начала движения был необходим своеобразный импульс – достаточно малое по силе землетрясение. Для данной территории подобные «встряхивания» являются обычным явлением.

Совмещение всех вышеперечисленных природных факторов во времени и пространстве как раз и привело к произошедшему – смещению значительного блока мерзлых аллювиальных песков. Но такое «совмещение» факторов вполне вероятно при пересечении Бестяхской террасы долинами рек Менды, Таммы, и в какой-то степени Мылы, что существенно осложняет инженерно-геологическую обстановку на рассматриваемом перспективном «плацдарме» для хозяйственного освоения Южной Якутии.

В заключение необходимо подчеркнуть, что авторы данного материала абсолютно не исключают возможность другого сценария геологического развития описываемой территории, хотя и считают его маловероятным. Основной же задачей данной работы является усилить интерес к правобережью Лены на подходах к Якутску, показать сложность развития и высокую интенсивность современного геологического развития территории, подчеркнуть потенциальную опасность её инженерно-геологических условий, показать необходимость их углубленного изучения при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации любых инженерных сооружений и проведение инженерно-геокриологического мониторинга строящейся железнодорожной магистрали.

Список литературы

1. Арэ Ф. Э. Механизм развития и деградации наледи Улахан-Тарынг / Наледи Сибири. – М.: Наука, 1969.
2. Бойцов А. В. Подземные воды Бестяхской террасы реки Лена: вопросы экологии и практического применения / Институт мерзлотоведения СО РАН. Материалы выездного совещания. – 2005.
3. Босиков Н. П., Васильев И. С., Федоров А. Н. Мерзлотные ландшафты зоны освоения Лено-Алданского междуречья / Институт мерзлотоведения СО АН СССР. – Якутск, 1985.
4. Геокриология СССР. Том «Средняя Сибирь» – М.: Недра, 1989.
5. Государственная геологическая карта РФ. 1:200 000 Р-52-ХХП «Якутскгеологтия», 1993.
6. Геологическая карта 1:200 000 вдоль трассы проектируемой железнодорожной линии участок Том-

мот - Якутск, Ленская геологическая экспедиция ПГО «Якутскгеология», 1983.

7. Достовалов В.Б., Королёв А.А. «Сохранность памятников природы Якутии при строительстве и эксплуатации железной дороги Тында-Якутск». Журнал «Инженерные изыскания» №11, Москва, 2009.

8. Колесников А. Б., Федоров А. А., Шепелев В. В. Особенность нарушенного режима подземных вод в районе источника Булуус (Центральная Якутия) / Материалы третьей конференции геокриологов России 1-3 июня 2005 года. Т. 2. Часть 3. – Изд-во МГУ. – 2005.

9. Материалы выездного совещания об окончательном положении трассы железной дороги Томмот - Кердем в районе памятника «Булуус». Покровск, 8 июня 2005.

10. Материалы космо- и аэрофотосъемок различных видов и масштабов 1980- 2006 гг.

11. Отчет НИР «Прогноз воздействия проектируемого измененного положения АЯМ в районе Качикатцы на источник Булуус методами геофизика». РАН СО ИГДС. – Якутск, 1995.

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ГРАНИЦ ПРОМЕРЗАНИЯ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ОДИНОЧНОГО ТРУБОПРОВОДА С ХОЛОДНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Я.Б. Горелик, С.Н. Романюк

Институт Криосферы Земли СО РАН, г. Тюмень, gorelik@ikz.ru

Разработан метод численного решения двумерной задачи Стефана, описывающей динамику температурного поля и границы промерзания-протаивания пород в зоне действия одного трубопровода близко расположенного от поверхности с отрицательной температурой газа. Приводятся примеры результатов расчета. Показано, что картина динамики температурного поля и форма области промерзания-протаивания существенно нестационарны, ввиду близости трубы от поверхности и сильного влияния годовых колебаний температуры.

Введение

Данная задача - проведение численного расчета динамики теплового взаимодействия одного трубопровода с породой, в том числе при наличии естественного движущегося фронта таяния-замерзания обусловленного годовыми колебаниями температуры. Продуктопроводы расположены горизонтально. Глубина залегания такова, что на динамику температурного поля в окрестностях трубы существенно влияет годовые колебания температуры на близко расположенной поверхности

Такие задачи весьма актуальны в плане проектирования газопроводов при освоении месторождений газа.

Как правило газопроводы располагаются достаточно близко от поверхности. На температурное поле в породе вокруг трубы существенное влияние оказывает положение фронта таяния связанное с сезонными колебаниями температуры. Все это не позволяло широко использовать приближенные квазистационарные методы расчета динамики температурного поля. Литература по этому вопросу крайне бедна. Быстрый прогресс вычислительной техники в плане мощностей вынуждает постоянно обновлять способы расчета, по новому и более точно считать даже уже решенные задачи. Данная задача позволяет получить условия при которых фронт замерзания перестает смыкаться с естественным фронтом таяния-замерзания и не образует при этом связанной области. При этом основными критериями выступают величины- Температура газа, Радиус трубы, Свойства изоляции трубы, Глубина расположения трубы, амплитуда сезонных колебаний температуры (а также средняя температура)

Рассматриваемая в данной работе задача о промерзании пород вблизи трубы газопровода включает изучение совместного вклада всех этих параметров в этот процесс. Этот момент особенно важен для решении общей задачи о взаимодействии трубы газопровода с другими инженерными сооружениями активно влияющими на температурное поле в породе.

Постановка задачи и методика исследований

Рассмотрим полуограниченный сверху массив грунта с одной горизонтально расположенной цилиндрической полостью заданного радиуса. Глубина расположения оси полостей предполагается заданным. В реальности полости соответствуют действующему трубопроводу. Перенос тепла от трубопровода в породу осуществляется только за счет теплопроводности и сопровождается фазовыми переходами содержащейся в порах воды. Фазовые переходы сосредоточены на фронте нулевой толщины. При смыкании таликов от отдельных скважин форма области протаивания имеет двумерное очертание. Рассматриваемую двухфазную задачу Стефана возможно описать одним уравнением типа теплопроводности для всей области расчета [Самарский и др., 2003]. Для этого вводится понятие удельной энтальпия.

$$H(T)=\begin{cases} L_f + C_t \cdot T \\ C_m \cdot T \quad если \quad T<0 \end{cases} \qquad (1)$$

Обратное выражение для температуры

$$T(H)=\begin{cases} \dfrac{H-L_f}{C_t} \quad если \quad H>L_f \\ 0 \quad если \quad 0\le H\le L_f \\ \dfrac{H}{C_m} \quad если \quad T<0 \end{cases} \qquad (2)$$

$$\rho\cdot\frac{\partial H(x,y,z,t)}{\partial t} = grad\left[\lambda(T)\cdot\nabla T(x,y,z,t)\right] \qquad (3)$$

где x, y, z – пространственные координаты, м;

t – время, с;

T – температура грунта,

H – удельная энтальпия грунта Дж/кг ; °C;
ρ – плотность грунта, кг/м^3;
C – удельная теплоемкость грунта, Дж/(кг•град);
λ – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м•град);
L_f – теплота фазовых переходов грунта с учетом удельного содержания воды, Дж/кг.
При этом температура фазового перехода предполагается $T_f = 0$.
Теплота фазовых переходов зависит от влажности грунта: $L_0 = L_0^0(w_{tot} - w_w)/(1 + w_{tot})$
где $L^0 = 3{,}34 \cdot 105$ Дж/кг –удельная теплота фазового перехода «лед-вода»; w_{tot} – суммарная влажность мерзлой породы, д. ед.; w_w – влажность за счет незамерзшей воды, д. ед.

Задача Стефана, записанная в виде (3), не требует отдельных уравнений теплопроводности для талой и мерзлой зон, как и особого уравнения баланса тепла на их границе. Нелинейная зависимость энтальпии от температуры учитывает выделение или поглощение тепла при фазовом переходе. В соответствии с этим, фазовая граница определяется на температурном поле по изотерме фазового перехода. Начальным условием является невозмущенное температурное поле массива: $T(x,y,z,0) = T_g(z)$

Граничные условия задаются условиями теплообмена на внешних границах расчетной области и температурами на внешней поверхности трубы. Причем граница расчетной области от источников тепла определяется малостью теплового влияния источников на выбранном расстоянии за весь расчетный период. Это удаление подбирается из условия $R > \sqrt{a \cdot t}$ где а- температуропроводность грунта; t – расчетный период; R – расстояние границы от источника (а также от повергности грунта). При этом температура на внешних боковых границах расчетной области принимается равным температуре грунта на данной глубине Tg(z,t). Данная температура определяется решением вспомогательной одномерной задачи распределения температуры по глубине в грунте.

На верхней поверхности задается температура Tp(t) в виде простейшем виде

$$T_p(t) = T_0 + \delta T \cdot \sin(\Omega \cdot t) \qquad (4)$$

Граничные условия на внешней стенке каждой трубы определяется исходя из конструкции по формулам стационарной теплопередачи через цилиндрические стенки [Исаченко и др., 1969] с использованием выражения для стационарного температурного поля отдельной скважины [Горелик и др., 1983].

Уравнение (3) с соответствующими граничными и начальными условиями решалось с помощью численных методов. Пространственная область расчета разбивается прямоугольной сеткой на конечное число объемов. Ось трубы располагаются в центре некоторых из них, поэтому необходимо перенести граничные условия со стенок трубы на грани этих объемов.

Новые граничные условия определяются, исходя из равенства тепловых потоков к соседнему контрольному объему от цилиндрической трубы с температурой стенки Tc и от прямоугольного объема с температурой $T_{гр}$ [Горелик, Сысоев, Шабаров, 2008]:

Такой подход устанавливает линейную зависимость между разностями температур

$T_{гр} - T_1 = \gamma \cdot (T_c - T_1)$ Отсюда, выражение для Tгр в каждый момент времени определяется через Tc и T1, которые берутся с предыдущего временного слоя.

Ввиду того что температурное поле вокруг трубы уже не обладает аксиальной симметрией выражение для T1 выбираем в виде $T_1 = 0.25 \cdot (T(i_0+1, j_0) + T(i_0-1, j_0) + T(i_0, j_0+1) + T(i_0, j_0-1))$ то есть среднему от всех четырех ближайших соседей. В результате получаем соотношение

$$T_{гр} - T_1 = \gamma \cdot (T_c - T_1) \qquad (5)$$

Разностный аналог уравнения (1) записан в стандартном виде [Самарский, 1979]:

$$\rho \frac{H_{ij}^{k+1} - H_{ij}^{k}}{\Delta\tau} = \frac{1}{\Delta x}\left(\lambda_{i+\frac{1}{2}j} \frac{T_{i+1j}^{k} - T_{ij}^{k}}{\Delta x} - \lambda_{i-\frac{1}{2}j} \frac{T_{ij}^{k} - T_{i-1j}^{k}}{\Delta x}\right) + \frac{1}{\Delta x}\left(\lambda_{ij+\frac{1}{2}} \frac{T_{ij+1}^{k} - T_{ij}^{k}}{\Delta x} - \lambda_{ij-\frac{1}{2}} \frac{T_{ij}^{k} - T_{ij-1}^{k}}{\Delta x}\right), \qquad (6)$$

где i, j – индексы, относящиеся к контрольному объему по осям x, y и соответственно;
ΔV – объем, м^2;
Δt – шаг по времени, с;
Δx – расстояние между соседними температурными узлами по соответствующим осям координат, м; индексы «± 1/2» относятся к противоположным граням контрольного объема.

Нами выбрана явная схема. Шаг по времени выбран исходя из условия устойчивости (в нашем случае $\frac{a \cdot \Delta t}{\Delta x^2} = 0.08$). Шаг по координатам выбран постоянный.

Конечно-разностная схема (6) является консервативной. Коэффициенты λ на новом шаге по времени берутся с предыдущего временного слоя.

Энтальпия на новом временном шаге находится из последовательного решения систем уравнений (6). Температура на новом временном шаге находится из соотношения (2).

Результаты расчета и их обсуждение

Ниже приводится примеры расчета температурного поля для одной горизонтально расположенной трубы. Труба расположена так, что находится в зоне действия подвижного фронта таяния-замерзания обусловленного годовыми колебаниями температуры (Рис. 1).

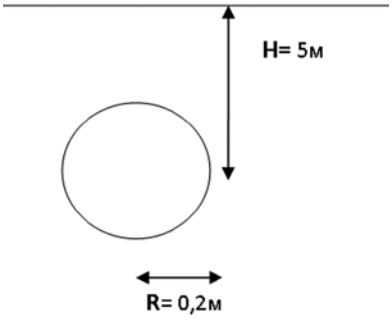


Рисунок 1 – Горизонтально расположенная труба

Начальная температура грунта взята из решения вспомога-

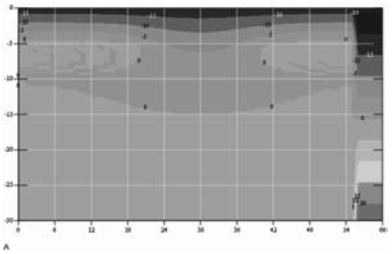


Рисунок 2 - Температурное поле вокруг одиночного трубопровода с отрицательной температурой теплоносителя через 26 месяцев после пуска в эксплуатацию/. Температура поверхности Тр= -26 град

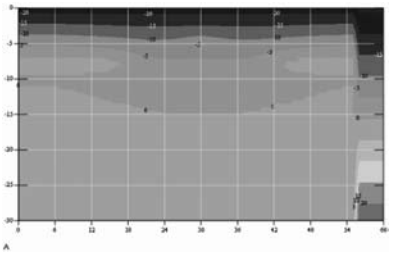


Рисунок 3 - Температурное поле вокруг одиночного трубопровода с отрицательной температурой теплоносителя через 27 месяцев после пуска в эксплуатацию/. Температура поверхности Тр= -22град

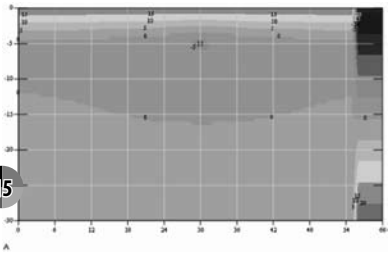


Рисунок 4 - Температурное поле вокруг одиночного трубопровода с отрицательной температурой теплоносителя через 32 месяцев после пуска в эксплуатацию/. Температура поверхности Тр= 20град

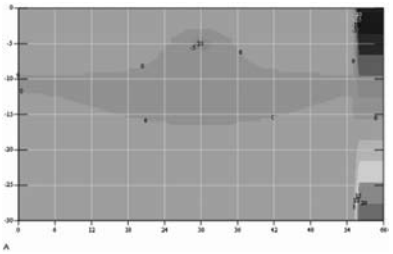


Рисунок 5 - Температурное поле вокруг одиночного трубопровода с отрицательной температурой теплоносителя через 36 месяцев после пуска в эксплуатацию/. Температура поверхности Тр=1,5рад

тельной задачи распространения температурного поля от поверхности грунта вглубь.

Средняя температура на поверхности грунта взята Т0 = 1°С, амплитуда сезонных колебаний δ=25 °С. Температура на нижней и боковых поверхностях массива в любой момент времени взята в виде Tg(t,z) где Tg – решение вспомогательной задачи о динамике температурного поля обусловленного годовыми колебаниями температуры.

Теплофизические параметры грунта следующие: λт= 1,4 Вт/(м ·град.); λм = 1,8 Вт/(м · град.); $С_{тал}$ = 1660 Дж/(кг·град); $С_{мер}$ = 1180 Дж/(кг·град); w_{tot} = 0,3; w_w=0; ρ = 1800 кг/м^3.

Ось одиночной трубы находится на глубине 5м и располагается посредине области. Размеры расчетной области были приняты следующими: 20 м – по горизонтали,(ось Ох); 20 м – по вертикали(ось Оу). Шаг по координате Δх=0.1м. Соответственно расчетный массив представляет из себя сетку 200 х 200.

Температура стенки трубы выбрана Тс=-5. Радиус трубы R=0,2 м

Время счета на компьютере составило около 8 часов.

Результаты расчета примера, представленные на рисунках 2-5, показывают:

1) Для исходно талых грунтов основания с близкой к 00 С начальной температурой (около +10 С) и при достаточно низкой температуре теплоносителя (- 50 С) уже в первые годы после пуска трубы в эксплуатацию на уровне ее заложения (в горизонтальном направлении) образуется протяженный слой мерзлого грунта, сохраняющийся даже в летнее время (Рис. 5);

2) В начале холодных периодов и в их продолжении сезонно-мерзлый слой грунта, нарастающий с его поверхности, сливается с мерзлым окаймлением трубопровода (Рис. 2, 3), что должно вызывать их совместные деформации, результатом которых может быть выталкивание трубы на поверхность грунта спустя определенное число циклов сезонного промерзания –протаивания [Горелик Я.Б. О методах расчета деформаций инженерных конструкций, вызванных пучением промерзающего слоя // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 50 - 62.]. Этот процесс более опасен для неглубокого заложения трубопровода и повышенной температуры грунтов основания (в силу более коротких крыльев мерзлого грунта на Рис. 5, оказывающих сопротивление выдергивающим нагрузкам).

Список литературы

1. Горелик Я.Б., Каверина Т.В. Теплоизоляция скважин в северных районах / Нефтепромысловое строительство. М., ВНИИОЭНГ, 1983, № 7, с. 2-3.

2. Горелик Я.Б., Дзик М.И. Тепловое взаимодействие куста добывающих скважин с вечномерзлыми грунтами // Изв. АН СССР, Сер. Энергетика и транспорт. 1990, т. 36, с. 143 – 152.

3. Ермилов О.М., Дегтярев Б.В., Курчиков А.Р. Сооружение и эксплуатация газовых скважин в районах Крайнего Севера. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2003, 222 с.

4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., Энергия, 1969, 424 с.

5. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М., Наука, 1977, 456 с.

6. Медведский Р.И. Строительство и эксплуатация скважин на нефть и газ в вечномерзлых породах. М., Недра,1987,230 с.

7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., Энергоатомиздат, 1984, 152 с.

8. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М., Едиториал УРСС, 2003, 784 с.

9. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М., Атомиздат, 1979, 215 с.

10. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. М., Недра, 1965, 236 с.

11. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск, Наука, 1967, 197 с.

12. Eskilson P., Claesson J. Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes // Numer. Heat Transfer, Vol. 13, no. 2, pp. 149–165, 1988.

13. Я.Б. Горелик, А.Б Шабаров*, Ю.С. Сысоев Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬСТВА СИСТЕМ ТСГ ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

В.А. Барышников, Л.А. Ведров, С.Н. Стрижков, С.П. Вельчев

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru, smu@npo-fsa.ru

В данной статье рассматривается повышение качества строительства систем ТСГ за счет модернизации средств производства, применения современных материалов, совершенствования технологий и методов контроля качества работ.

Монтаж систем температурной стабилизации является высокотехнологичной скрытой работой, от которой зависит надежность эксплуатации оснований сооружения. Именно поэтому ООО НПО «Фундаментстройаркос» постоянно стремится к повышению качества монтажа систем температурной стабилизации, а так же совершенствует методы контроля качества работ.



Рисунок 1 - Основные направления контроля качества строительства систем ТСГ.

1.Применение современных материалов

Одним из основных конкурентных преимуществ ООО НПО «Фундаментстройаркос» является изготовление на производственных мощностях предприятия и профессиональный монтаж силами собственного СМУ систем температурной стабилизации. Упрощенно система температурной стабилизации состоит из надземной (конденсаторной) и подземной (испарительной) частей. Надземная часть каждой системы состоит из конденсаторного блока, ускорителя циркуляции, и труб обвязки и соединения с подземной частью. Подземная часть представляет из себя трубную систему и служит для перемещения хладагента и теплообмена с грунтом.

Первые системы термостабилизации грунтов, смонтированные еще ТОО НВФ «Аркос» в в начале 90-х г. были выполнены из полиэтиленовых труб марки ПНД 32 Т по ГОСТ 18599-83. Первые системы «ГЕТ» были, во многом конструктивно несовершенны. Сварные стыки полиэтиленовых трубопроводов не позволяли в полной мере контролировать качество соединения на этапе производства работ. Конструкция самой системы имела большое количество соединений охлаждающих труб с конденсаторной частью, что существенно повышало вероятность нарушения герметичности системы. К тому же полиэтиленовая труба не могла противостоять сколько либо существенному физическому воздействию (например, ручного инструмента). Также полиэтиленовые трубы не удобны в монтаже при низких температурах. В дальнейшем системы термостабилизации грунтов оснований были модернизированы, и испарительная часть систем стала производиться из стальных труб.

Применение стальных труб обеспечило:

- Лучшую теплопроводность через стенку трубы;

-Увеличенную проводимость тепла по окружности трубы от не смоченной хладагентом поверхности к смоченной. По исследованиям для стальных труб диаметром 32 х 4 мм при смачивании 10 % поверхности трубы температура на противоположной от смачивания точке трубы повышается всего на 2…3 % в зависимости от величины теплового потока.

- Более высокую механическую прочность.

При этом переход на стальные трубы сопровождался изменением принципа сборки систем. Ранее изготовление плетей труб и подготовка их к сварочным работам производились на объекте. В настоящий момент система термостабилизации грунта, поставляемая на объект, представляет собой набор частей и узлов высокой заводской готовности, которые, подобно конструктору, собираются на площадке и свариваются при помощи автоматической сварки дугой вращающейся в магнитном поле. На поставляемые элементы в заводских условиях нанесен гидроизоляционный слой, торцы подготовлены под сварку, установлены пластиковые заглушки препятствующие загрязнению и попаданию влаги во внутренние полости частей и узлов.

Оцинкование труб подземной части систем ТСГ.

В 2010 г. ООО НПО «Фундаментстройаркос» отказалось от использования в системах «ГЕТ» оклеечной гидроизоляции (праймер + ПВХ) в пользу нанесения цинкового покрытия методом электродуговой металлизации.

Процесс металлизации проводится в заводских условиях и состоит из операций абразивно-струйной обработки (применяется дробь) и непосредственно напыления цинкового покрытия.

Предварительное обезжиривание и дробеструйная обработка существенно повышают адгезионные свойства металлизированного покрытия. Нанесенное на металл цинковое покрытие образует плотный слой продуктов коррозии, становится непроницаемым для влаги, а доступ кислорода к основному металлу полностью прекращается. Немаловажным фактором считают протекторные свойства металлизированных покрытий, а именно использование процесса катодной защиты от коррозии металла. При контакте защищаемого металла с электрохимически активным цинком возникает короткозамкнутый гальванический элемент, ток которого полностью нейтрализует коррозию металла основы. Поврежденное место на покрытии за счет гальванического эффекта затягивается ионами цинка, предохраняя основной материал. Этот способ защиты эффективно препятствует не только равномерной, но и различным видам локальной коррозии: питтинговой, язвенной и т. д. Подробнее с данным вопросом можно ознакомиться в статье Хабибулина Р.Х. «Качественный эксперимент по моделированию коррозионного воздействия на антикоррозионные покрытия» (Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов крайнего севера»).



Рисунок 2 - Оцинкованные трубы систем ТСГ



Рисунок 3 - Трубы систем ТСГ оцинкованы и замаркированы, установлены транспортировочные заглушки. Изделия подготовлены к отправке на объект.

Контроль качества поэтапного процесса нанесения металлизированного покрытия включает в себя:

-Входной контроль поверхности изделий поступающих на участок оцинкования труб;

- Контроль обезжиривания поверхности;

-Изоляция мест исключающих нанесение покрытия (резьбы, места под производство сварки автоматической установкой);

-Дробеструйная обработка. Контроль степени очистки и шероховатости поверхности.

-Газотермическое электродуговое напыление защитного слоя цинка. Визуально- измерительный контроль качества поверхности, измерение толщины покрытия, контроль прочности сцепления с основным металлом.

Одним из несомненных преимуществ применения металлизационных покрытий в системах ТСГ является высокая теплопроводимость, что в свою очередь увеличивает эффективность работы системы термостабилизации грунтов.

Толщина наносимого защитного слоя цинка составляет 200-300мкм, что является высоким значением в области металлизации и позволяет обеспечить сохраняемость стальных труб в грунте на срок свыше 50 лет. Таким образом коррозионная стойкость подземной части систем ТСГ обеспечивает функционирование и сохранность систем на протяжении всего жизненного цикла объектов. Это является важным параметром, так как системы термостабилизации грунтов, в основном, применяются при строительстве ответственных сооружений нефтегазовой отрасли.

Применение современных гидроизоляционных материалов

Применение современных металлизированных покрытий поставило вопрос о нанесении защитного покрытия сварных стыков в условиях строительной площадки. Сварные стыки выполненные установкой автоматической сваркой дугой вращающейся в магнитном поле являются неповоротными и их металлизация портативными аппаратами затруднена. Поэтому в условиях строительной площадки изоляция сварных стыков выполняется комбинированным способом: составом для холодного цинкования «Химгранд-ЦПС» и современной защитной термоусаживающейся лентой ТЕРМА-СТ.

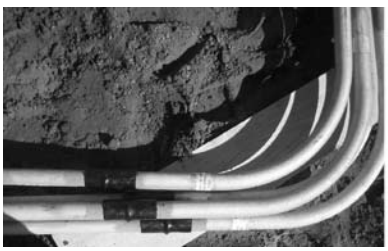


Рисунок 4 - Зона сварного стыка покрыта составом для холодного цинкования и защитной термоусаживающейся лентой «Терма-СТ». Этап: узловая сборка малогабаритных элементов систем ТСГ.

Аналогично с цинковым покрытием нанесенным электродуговым и газопламенным способами состав для холодного цинкования «Химгранд-ЦПС» обладает так называемым протекторным действием. Лента ТЕРМА-СТ представляет собой двухслойный изоляционный материал, состоящий из термосветостабилизированной электронно-химически сшитой полиэтиленовой основы и термоплавкого адгезионного слоя. Такой комбинированный способ защиты сварных стыков обеспечивает стойкость к коррозии аналогичную металлизированному покрытию и увеличивает срок службы систем термостабилизации грунта.

2. Модернизация оборудования и инструмента

Модернизация сварочно-монтажного оборудования.

Применение стальных труб поставило вопрос перед специалистами ООО НПО «Фундаментстройаркос» о надежном, герметичном и технологичном соединении элементов подземной части систем ТСГ.

В первое время для сварки металлических труб использовали ручную дуговую сварку и электрогазопламенную сварку. Электрогазопламенная сварка производилась аппаратом «АЛПЛАЗ-2,2». Рабочим веществом аппарата служил ацетон или водно-спиртовый раствор. Выходящий из сопла газо-плазменный факел имел температуру 8000 ºС и восстановительный характер среды. Сварочные швы получались качественными и надежными, но сам аппарат оказался не достаточно приспособленным к работе в жестких северных условиях. Использование ручной дуговой сварки также не нашло широкого применения в связи с большой трудоемкостью, высокими требованиями к квалификации сварщиков и необходимости в рентгенографическом контроле 100% стыков.



Рисунок 5 - Головка сварочной установки МД-102, предназначенной для сварки труб Ø20-60мм дугой вращающейся в магнитном поле.

В качестве наиболее оптимального вида сварки специалисты «Фундаментстройаркос» остановились на сварке дугой, вращающейся в магнитном поле (СВД). Такая установка была найдена в НИИ сварки имени Патона Украинской академии наук и приобретена ООО НПО «Фундаментстройаркос». Это функциональная модель для сварки трубных деталей и труб Ø от 20 до 42мм методом СВД под названием МД-101П.



Рисунок 6 - Головка сварочной установки МД-115, предназначенной для сварки труб Ø38мм дугой вращающейся в магнитном поле в полевых условиях.

Данная установка в дальнейшем являлась прообразом более совершенных модификаций моделей автоматических сварочных устройств данного типа. Через год инженерами НПО «ФСА» был приобретен следующий прототип – МД-102, применяемый для сварки труб диаметром от 20 до 60 мм. Также изменение диаметра свариваемых труб производится за счет сменного набора вкладышей.

Существенным отличием от первой модели – наличие исполнительных механизмов на основе гидроцилиндров, выполняющих функции осадки и зажатия труб.

В связи с тем, что автоматическая сварка труб СВД показала исключительно хорошие результаты в цеховых условиях, было решено изготовить передвижную установку такого типа. В 3 квартале 1999 года НИИ сварки имени Патона Украинской академии наук в адрес НПО «ФСА» была поставлена первая полевая сварочная установка..



Рисунок 7 - Полностью укомплектованная ПСМУ, с возможностью перемещения сварочной головки до 50 м, смонтирована на шасси автомобиля повышенной проходимости типа УАЗ. Хаканджинское м/р.

В апреле 2000 г сварочная головка МД-115 была смонтирована на автомобиле повышенной проходимости УАЗ-3962.

Установка ПСМУ-1 содержит в своем составе сварочную головку массой 25 кг для труб диаметром до 38 мм, которая может удаляться от автомобиля на расстояние до 50 м (передача команд между операторами установки и сварочной головки осуществлялась посредством радиосвязи).

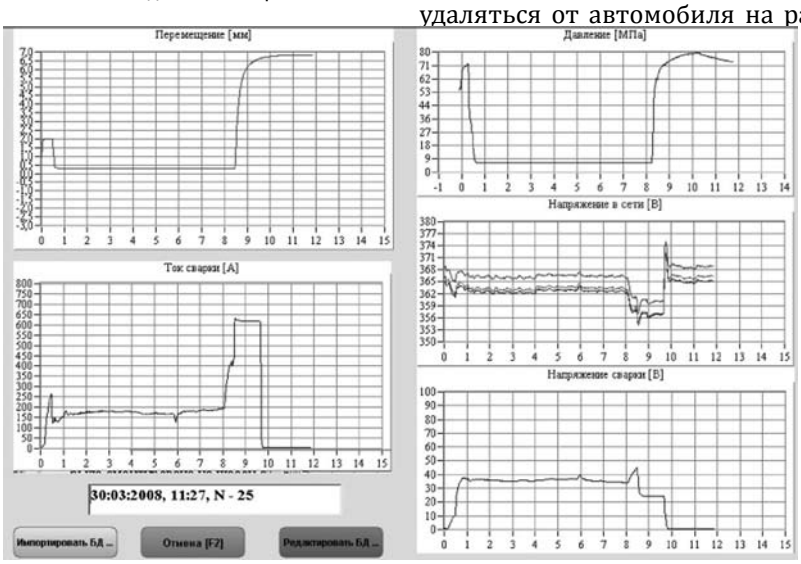


Рисунок 8 - Графики компьютерного контроля параметров сварки дугой вращающейся в магнитном поле.

Суть сварки дугой вращающейся в магнитном поле заключается в том, что по программе, устанавливаемой на блоке управления, должны пройти четыре стадии сварки: зажигание дуги, разогрев торцов труб дугой, вращающейся в магнитном поле, форсировка увеличением тока сварки в 3,5...4 раза для «выбивания» шлаков и ударное сжатие торцов труб с выдержкой под током.

Все эти стадии должны строго соответствовать задан-

ным параметрам по величине и проходить в установленной временной последовательности. Все эти стадии должны строго соответствовать заданным параметрам по величине и проходить в установленной временной последовательности. При этом не должно быть проскальзывания труб в зажимном устройстве. Часто, однако, случается, особенно в полевых условиях, что электропитание не стабильно. Кроме того, не исключено проскальзывание труб или не прошла форсировка, что также случалось из-за каких-либо сбоев в электронике. Компьютерный контроль фиксирует все эти отклонения, сравнивает с заданными значениями и выдает результат «годен» или «не годен» с графической и табличной распечаткой режимов и результатов сварки по каждому шву. Установка компьютерного контроля в своем составе содержит датчики (перемещений труб относительно друг друга, межфазного напряжения сети, тока и напряжения сварочной дуги); специальный восьмиканальный прибор Spider 8, принимающий и обрабатывающий сигналы со всех датчиков, ноутбук, соединенный с прибором; блоки питания. Прибор и компьютер с блоками питания и соединительными проводами умещаются в обычном кейсе и легко транспортируются оператором на любую стройплощадку, оснащенную полевой автоматической сваркой.

Определяющими характеристиками режима сварки являются ток разогрева и ток форсировки, выполненные в установленные временные интервалы, отсутствие проскальзывания труб. Результатом сварки является абсолютное перемещение труб в процессе образования валика сварного шва. Вначале, при отсутствии компьютерного контроля результат сварки контролировали величиной валика и механическим испытанием образцов. При этом не было сведений о фактически произошедшем режиме. Компьютерный контроль позволяет гарантировать качество сварного соединения без механических испытаний образцов. Слежение за процессом сварки ведется по 5 графикам, отражающимся в режиме реального времени: ток дуги, напряжение на дуге, дифференциальное различие межфазного напряжения питающей сети 380В, физическое перемещение и давление в системе. При этом автоматически выдается на экран монитора оператора заключение о годности сварного шва, по основным параметрам сварочного процесса.

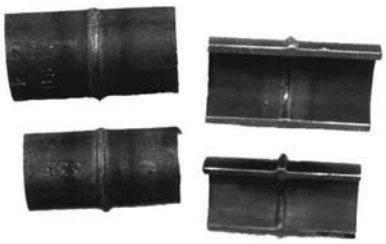


Рисунок 9 - Сварное соединение выполненное установкой полевой автоматической сварки. Нижний стык выполнен без фасок, верхний – с фасками на внутренней кромке.

На рисунке 9 показан внешний вид сварного соединения трубы 33,7 х 3,5 мм. Нижний стык выполнен с прямыми кромками без фасок, верхний – с фасками оптимальных размеров на внутренней кромке. По результатам экспериментов выяснено, что в технологиях производства систем «ГЕТ», «ВЕТ» и термостабилизаторов внутренний грат практически не отражается на качестве их работы. Использование фасок позволяет уменьшить внутренний грат до величин, приемлемых в других технологиях.

За период с 2001 по 2010 год был создан целый ряд передвижных сварочных установок. ПСМУ были изготовлены в различном исполнении:

-на базе автомобиля. УАЗ-3962 или ГАЗ-66

-на базе блок-бокса

-на базе прицепа-фургона

Параллельно с созданием новых установок производилась постоянная модернизация существующих. Одними из наиболее существенных изменений стали:

- переход на новую элементную базу;
- исполнение прибора «Spider» в несъёмном варианте (в пульте оператора);
- обновление пультов оператора, модернизация исполнительных механизмов;
- переход на более современные источники питания.
- Внедрение и модернизация датчиков и программных комплексов компьютерного контроля параметров сварки.

Наличие полевых установок автоматической сварки труб позволило унифицировать состав поставляемых изделий заводской готовности. Применение электротруборезов, трубогибов и полевых установок для автоматической сварки труб позволили быстро и качественно из металлических труб монтировать системы любой конфигурации. Практически исключен брак сварных стыков испарительной части систем «ВЕТ» и «ГЕТ» благодаря применению компьютерного контроля параметров сварки. Повышение качества монтажа систем обеспечило увеличение надежности их действия.

Отдельно следует выделить сокращение времени требуемого для монтажа систем термостабилизации грунтов.

Таблица 1 - Усредненное время монтажа одной системы «ГЕТ»

Год	2003г.	2004г.	2005г.	2010г.
Среднее время на монтаж одной системы «ГЕТ»	6,8 смены	4 смены	3,5 смены	3,3 смены

Из таблицы 1 видно что, постоянная модернизация средств производства работ обеспечивает уменьшение сроков монтажа систем термостабилизации грунтов. С 2003 года по 2005 год произ-

водительность труда при монтаже систем термостабилизации грунтов выросла практически в два раза. На первый взгляд может показаться, что в период с 2005 по 2010год практически не произошло прироста производительности труда. На самом деле увеличение скорости монтажа систем нивелировалось увеличением трудоемкости работ. Системы термостабилизации были существенно модернизированы: внедрены ускорители циркуляции, гидроизоляция холодным оцинкованием сварных стыков испарительной части систем «ГЕТ», раскладка труб идущих к системам от конденсаторных блоков стала осуществляться в гильзах и т.д. Увеличение количества операций и трудоемкости можно отследить по локальным сметным расчетам (см. табл. 2).

Таблица 2 - Усредненная трудоемкость монтажа одной системы «ГЕТ»

Год	Объект	№ локального сметного расчета	Трудоемкость по смете
2005	Харасавейское ГКМ. Склад отапливаемый	1-1и	**~10400 ч/час** на 8 систем «ГЕТ»
2010	Ванкорское м/р. ЦПС. Производственный корпус №3	1174-24.2006.2-08-49203-СМ-02-38-01	**~24300 ч/час** на 9 систем «ГЕТ»

Из таблицы 2 видно, что трудоемкость монтажа систем «ГЕТ» за период с 2005 год по 2010 год увеличилась практически в два раза. При этом стоит особо отметить, что увеличение скорости и трудоемкости работ не снизило качество монтажа систем ТСГ.



Рисунок 10 - Сварочно-монтажный комплекс СМК-1 на Ванкорском строительном участке

Сварочно-монтажный комплекс

В 2011 году на Ванкорский строительный участок поступил строительно-монтажный комплекс (Рис. 10). Этот комплекс стал очередным витком модернизации средств производства работ.

Основные задачи строительно-монтажного комплекса:

- Монтаж и сварка металлических и полиэтиленовых труб охлаждения;
- Механизированный монтаж конденсаторных блоков, ускорителей циркуляции, площадок обслуживания и ограждений без привлечения сторонней крановой техники;
- Ведение погрузочно-разгрузочных работ элементов систем «ГЕТ» на строительной площадке без привлечения сторонней крановой техники;
- Обеспечение электроэнергией при отсутствии электрификации строительной площадки.
- Доставка оборудования и сварочно-монтажной бригады от места дислокации к месту выполнения работ.

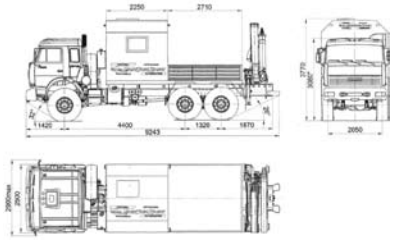


Рисунок 11 - Схема автомобиля КАМАЗ-43118 со специальным фургоном и краном-манипулятором

Кроме того, входящий в состав СМК дизель-генератор может не только обеспечить строительную площадку электроэнергией, но и благодаря современной системе стабилизации напряжения, обеспечивает постоянство параметров электропитания, что повышает надежность и качество выполнения сварочных работ подземной части систем ТСГ.

В состав строительно-монтажного комплекса входит:

- автомобиль повышенной проходимости КАМАЗ-43118.
- передвижная сварочно-монтажная установка.

На автомобиле КАМАЗ-43118 смонтирован специальный фургон для перевозки и обогрева работников и кран-манипулятор «ИМ-150», предназначенный для погрузо-разгрузочных и монтажных работ.

Передвижная сварочно-монтажная установка в новом ис-

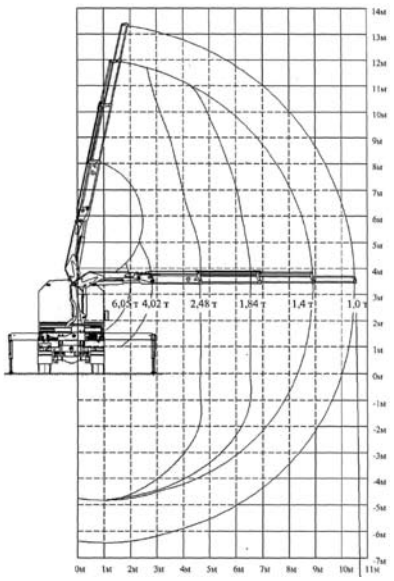


Рисунок 12 - Грузовысотные характеристики краноманипуляторной установки



Рисунок 13 - СМК-1 ведет разгрузочные работы



Рисунок 14 - СМК-1 ведет монтаж конденсаторных блоков с применением крано-манипуляторной установки

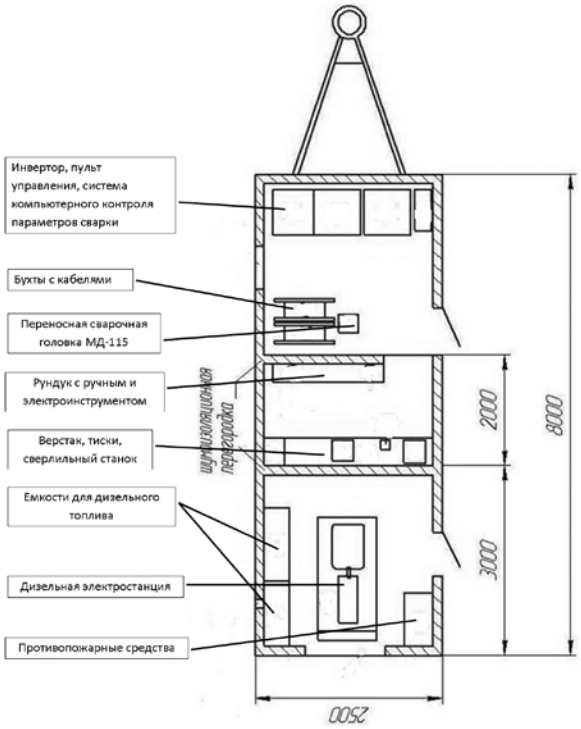


Рисунок 15 - Схема ПСМУ СМК-1 на базе прицепа-фургона

полнении включает в себя:

- установку полевой автоматической сварки;
- мастерскую с необходимым для текущего ремонта слесарным оборудованием;
- дизель-электростанцию.

Преимущества сварочно-монтажного комплекса очевидны:

- Ликвидация времени необходимого на привлечение сторонней техники при выполнении крановых работ и буксировании ПСМУ.
- Автономность ПСМУ. Возможность выполнять монтаж систем термостабилизации грунтов оснований на не электрифицированной строительной площадке.
- Подача напряжения оптимальных параметров для проведения сварочных работ.
- Значительное улучшение условий, как при строительно-монтажных работах, так и для ведения ремонта оборудования.

По предварительным оценкам эти основные преимущества позволили ускорить монтаж систем термостабилизации грунтов оснований с 3,3 смены на систему до 3 смен. Но самое главное преимущество заключается в том, что новый строительно-монтажный комплекс позволит сократить время простоев связанных с организационными работами при привлечении крановой и буксировочной техники сторонних организаций.

Сварочная установка СПУ-89

В 2003г. на плотине гидроузла р.Ирелях были смонтированы глубинные СОУ длиной 50-100м. Монтаж велся способом опускания-наращивания, а соединение элементов производилось сваркой дугой вращающейся в магнитном поле при помощи сварочной головки МД-102П. Для сварки вертикально-ориентированных трубных деталей головку МД-102П пришлось держать на подвесе или кране. Такой способ крепления, в совокупности с парусностью монтируемой трубы (элементы по 10-11м), не мог обеспечить высокой производительности работ. Кроме того для производства работ требовалось 2 единицы крановой техники: одна для удержания головки МД-102П в вертикальном положении, а вторая для подачи элементов СОУ.

Учитывая опыт работ на р. Ирелях и применяя современные материалы специалистами ООО НПО «Фундаментстройаркос» сконструирована новая сварочная установка СПУ-89. Значительное влияние на компоновку новой установки оказало техническое задание на монтаж глубинных ТОВ в штольне плотины Вилюйской ГЭС.

Преимущества сварочной установки СПУ-89:

- Меньший вес сварочной головки по сравнению с МД-102П
-Сварочная головка является поворотной и может производить сварку как горизонтально так и вертикально ориентированных труб. Кран для удержания сварочной головки не требуется.
- Оборудование смонтировано на тележках, что облегчает передвижение установки в рабочей зоне.
- диаметр свариваемых элементов до 89мм
- Для монтажа элементов длиной до 2,5м

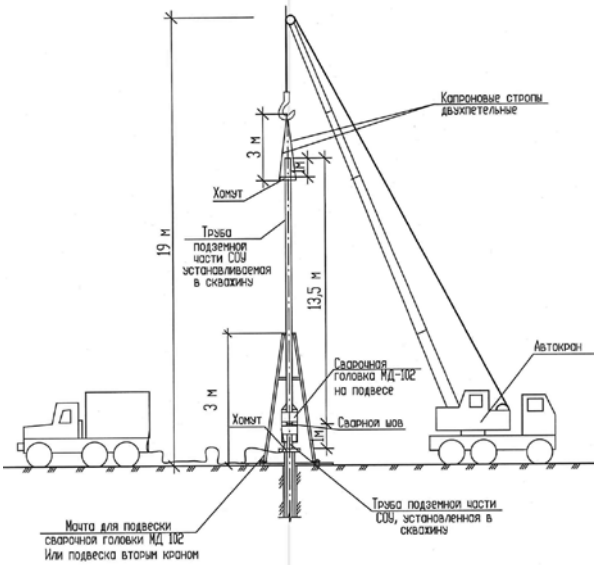


Рисунок 16 - Схема монтажа СОУ50/40 на плотине реки Ирелях.



Рисунок 17 - Принципиальная схема компонентов СПУ-89

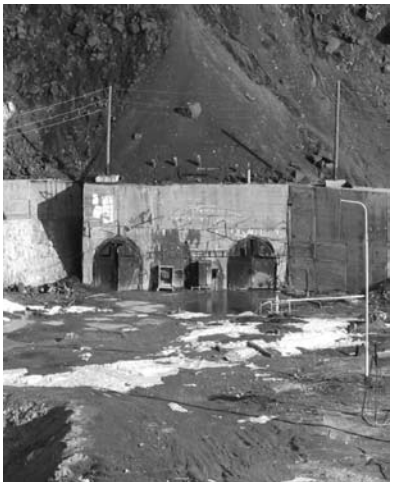


Рисунок 18 - Вход в штольню Вилюйской ГЭС. Испытание сварочной установки СПУ-89

не требуется применение кранов. Такие элементы подаются в сварочную головку подъемным блоком.

- Модернизированный узел зажимных устройств исключает воздействие парусности трубы на качество сварки.

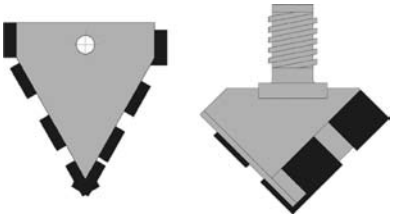
- Цилиндры, встроенные в подвижную часть, обеспечивают более стабильное перемещение подвижной части сварочной головки.

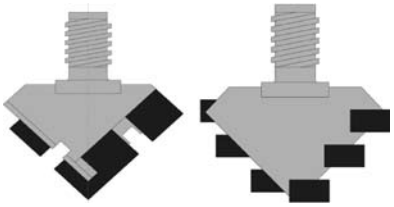
Модернизация бурового инструмента и оборудования

Постоянной модернизации и совершенствованию с целью повышения производительности и качества работ подвергается также буровое оборудование ООО НПО «Фундаментстройаркос».

Для бурения скважин при монтаже термостабилизаторов, термометрических труб и охлаждающих вертикальных труб ООО НПО «Фундаментстройаркос» с 1991 года использует малогабаритные буровые установки УКБ 12/25. Их преимущество заключается в мобильности, и возможности применения в стесненных условиях. Так же следует отметить простоту устройства и обслуживания.


Рисунок 19 - Малогабаритная буровая установка УКБ 12/25


Рисунок 20 - Слева долото Д-76 М1, справа долото 2008 года Д-76М6


Рисунок 21 - Варианты экспериментальных долот на 2011-2012 год.

В 2008 году силами СМУ ООО НПО «Фундаментстройаркос» был модернизирован буровой инструмент для этой установки (Рис. 19).

По результатам полевых испытаний применение долот нового образца (Д-76М6) позволило увеличить производительность в 1,5-2 раза. Превосходство долота нового типа оказалось особенно очевидно при бурении на мерзлых глинистых грунтах. Помимо этого увеличился примерно в 4 раза ресурс долота. Таким образом экономический эффект на примере объемов работ 2007 года от модернизации только лишь бурового инструмента составил бы:

- увеличение возможности освоения объемов работ за год с 85 км проходки до порядка 130 км проходки. Практически это 5000 шт. термостабилизаторов ТК32/10 с ориентировочной стоимостью монтажа порядка 100 млн. руб.

- уменьшение количества долот, требуемого для освоения такого объема работ в 4 раза с 3900 шт. до 1000шт. Экономия средств на производство долот составила бы 2 млн. руб.

Экономический эффект, положительные отзывы работников и значительное увеличение производительности от внедрения нового бурового инструмента способствовали дальнейшей его модернизации (Рис.21). Модернизация узлов соединений шнековой колонны сократило случаи потери бурового инструмента и перебуривания скважин, что в свою очередь благоприятно сказалось на качестве производства работ.

Основным недостатком буровой установки УКБ 12/25 является малая мощность. Бурение на участках распространения грунтов 5-6 категории было затруднено. Производство работ на таких тяжелых грунтах требовало применения более мощных буровых установок.

С 2009 года «Фундаментстройаркос» успешно применяет новый вид малогабаритных буровых установок с гидравлическим приводом буровых органов УБГ-Л2 «Аллигатор» производства завода Современной буровой техники. Их неоспоримым преимуществом являются большая мощность и скорость бурения. Помимо этого данная буровая установка является самоходной. С сожалению одним из недостатков УБГ-Л2 «Аллигатор» является низкая маневренность в условиях плотных свайных полей. Данные установки не заменили УКБ 12/25, а дополнили парк буровой техники ООО НПО «ФСА» расширяя возможности монтажа элементов ТСГ. Появилась возможность повысить производительность работ грамотно распределяя механизмы в соответствии с грунтовыми условиями.



Рисунок 22 - УБГ-Л2 «Аллигатор» ведет бурение скважин под монтаж вертикальных электродов заземления.

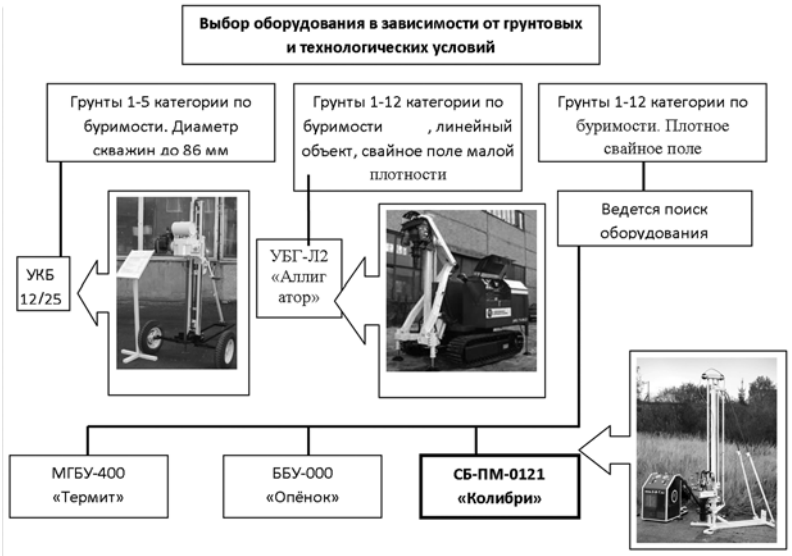




Рисунок 23 - Модульная буровая установка СБ-ПМ-0121 «Колибри».

В связи с освоением новых объектов отличающихся тяжелыми грунтовыми условиями ООО НПО «ФСА» рассматривает возможность замены УКБ 12/25 на более современный переносной модульный станок СБ-ПМ-0121 «Колибри» производства завода Современной буровой техники (ЗАО НПЦ «СБТ»). Данная установка обладает гидрофицированным приводом, что позволяет производить бурение скважин диаметром до 200мм и глубиной свыше 20м в породах 1-12 категории по буримости. Маневрированию буровой установки в условиях свайного поля способствует принцип модульности установки.

3. Совершенствование технологий производства работ

Увеличение производительности и качества работ может быть связано не только с модернизацией средств производства работ, но и с совершенствованием технологий и организации производства работ.

До 2011 года монтаж площадок обслуживания конденсаторных блоков проводился силами генподрядных организаций ввиду большого объема работ по монтажу металлоконструкций на высоте и необходимости привлечения крановой техники на продолжительное время. Руководство ООО НПО «Фундаментстройаркос», критически рассмотрев данный момент, реорганизовало работы реализовав крупноузловую сборку надземной части систем ТСГ.

Были разработаны несколько сборных типовых площадок обслуживания конденсаторных блоков высокой заводской готовности. Данные площадки обслуживания разделены на монтажные части исходя из целесообразности транспортировки. При этом в условиях строительной площадки сборка площадок обслуживания и установка на них конденсаторных блоков производится на земле при помощи манипуляторной установки входящей в состав СМК. Монтаж собранного узла



Рисунок 24 - До 90% сварочных работ по сборке площадок обслуживания производятся на уровне земли

Рисунок 25 - Монтаж конденсаторных блоков и ускорителей циркуляции производится на уровне земли. Это облегчает производство сварочных работ и контроль качества соединений.





Рисунок 26 - Узел надземной части подготовленный к монтажу

Рисунок 27 - Крановая техника привлекается лишь для монтажа предварительно собранного узла



(площадка обслуживания и конденсаторные блоки) производится автокраном. Таким образом, используя принцип крупноузловой сборки, значительно сокращается продолжительность работ по монтажу площадок обслуживания и конденсаторных блоков. При этом на качество работ по монтажу конденсаторных блоков и ускорителей циркуляции не влияют такие факторы как работа на высоте, а также облегчен контроль качества монтажных соединений и сварных швов.

4. Внедрение инноваций

ООО НПО «Фундаментстройаркос» является инновационно-активным предприятием. Ярким примером внедрения современных технологий можно считать использование ООО «НПО Фундаментстройаркос» тепловизионной диагностики систем ТСГ. Первоначально тепловизионная съемка производилась в рамках научных исследований и экспериментов, но в данный момент разрабатывается перспективная программа, согласно которой на момент запуска систем ТСГ и сдачи их в эксплуатацию могут быть составлены полные тепловые карты конденсаторных блоков.

Современный рынок предъявляет высокие требования к качеству продуктов и услуг, при этом наибольшее преимущество получают товары качество которых документально подтверждено и не вызывает сомнений.

Тепловые карты отображают интенсивность теплового излучения конденсаторной части систем ТСГ и являются графическим подтверждением процесса запуска системы. Благодаря высокой точности и информативности тепловые карты могут быть включены в исполнительную документацию по ведению спецмонтажных работ. Кроме того возможна съемка тепловизионного фильма запуска системы ТСГ в работу в режиме реального времени. Использование тепловизионной съемки выводит на новый уровень контроль качества производства работ в период запуска систем ТСГ и передачи их в эксплуатацию.

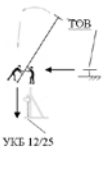
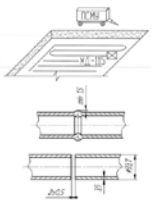
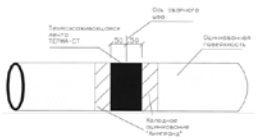
Подробнее с технологией тепловизионной диагностики систем ТСГ можно ознакомится в статье С.Н. Стрижкова «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения территорий в криолитозоне».

Постоянному развитию технологий способствует также и грамотная политика руководства организации, ведь даже сильная команда и мощная финансовая поддержка не в состоянии обеспечить качественный инновационный процесс, если в компании отсутствует инновационная корпоративная культура. Под такой культурой в «Фундаментстройаркос» понимается, прежде всего, ориентированность на новые разработки и критический подход к своим достижениям.

Помимо этого организационная структура и корпоративная культура предприятия способствуют рационализаторской деятельности. В «Фундаментстройаркос» организован четкий процесс контроля и оценки эффективности внедряемых рационализаторских предложений. В совокупности с материальным поощрением это обеспечивает постоянное увеличение количества и качества рацпредложений. За последние два года рационализаторскими было признано 19 предложений сотрудников. Благодаря реализации этих предложений значительно повышается качество и скорость изготовления и монтажа продукции ООО НПО «Фундаментстройаркос».

Научно производственное объединение «Фундаментстройаркос» является ярким примером неразрывности науки и производства, теории и

Перспективная схема организации работ на примере объекта ДРСУ Ванкорского м/р. Поз.5. Производственный корпус Объем работ: Систем ВЕТ - 3, Систем ГЕТ- 7. В том числе монтаж ТОВ – шт.135, монтаж КБ – 7шт.

Этап работ	1	2	3	4
Наименование работ	Входной контроль изделий	Бурение скважин и монтаж ТОВ	Монтаж охлаждающих и соединительных труб подземной части систем	Гидроизоляция сварных стыков подземной части систем ТСГ
Схема				
Продолжительность работ	1 смена	10 смен	15 смен	2 смены
Кол-во человек	1	3 бригады по2 чел	5чел	2
Применяемые механизмы	-	УКБ 12/25 – 3 ед.	ПСМУ (МДП15) – 1ед.	-
Контроль качества	ВИК	ВИК	Лабораторные испытания допускных стыков, ВИК, компьютерный контроль параметров сварки, пневматический контроль	ВИК, контроль адгезии покрытия

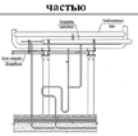
Этап работ	5	6	7	8
Наименование работ	Монтаж и сварка резервных полиэтиленовых труб	Укрупненная сборка площадок обслуживания и надземной части систем ТСГ	Узловой монтаж надземной части и площадок обслуживания	Обвязка надземной части, соединение с подземной частью
Схема				
Продолжительность работ	2 смены	2 смены	1 смена	3 смены
Кол-во человек	2 чел	2чел	2чел	2 чел
Применяемые механизмы	Аппарат для сварки полизиленовых труб типа «Барбарш»	Краноманипуляторная установка, Инвертор ARC200	а/кран типа КС45717-1, Инвертор ARC200	Инвертор ARC200
Контроль качества	ВИК, использование контрольных закладных электронагревательных элементов	ВИК	ВИК	ВИК, рентгеноскопический контроль

Схема ведения монтажа подземной части систем «ВЕТ» комплексной бригадой.



Бригада бурильщиков выполняет работы по монтажу охлаждающих вертикальных труб (ТОВ), а сварочно-монтажная бригада, двигаясь следом, производит раскладку соединительных труб, их сварку и гидроизоляцию стыков.

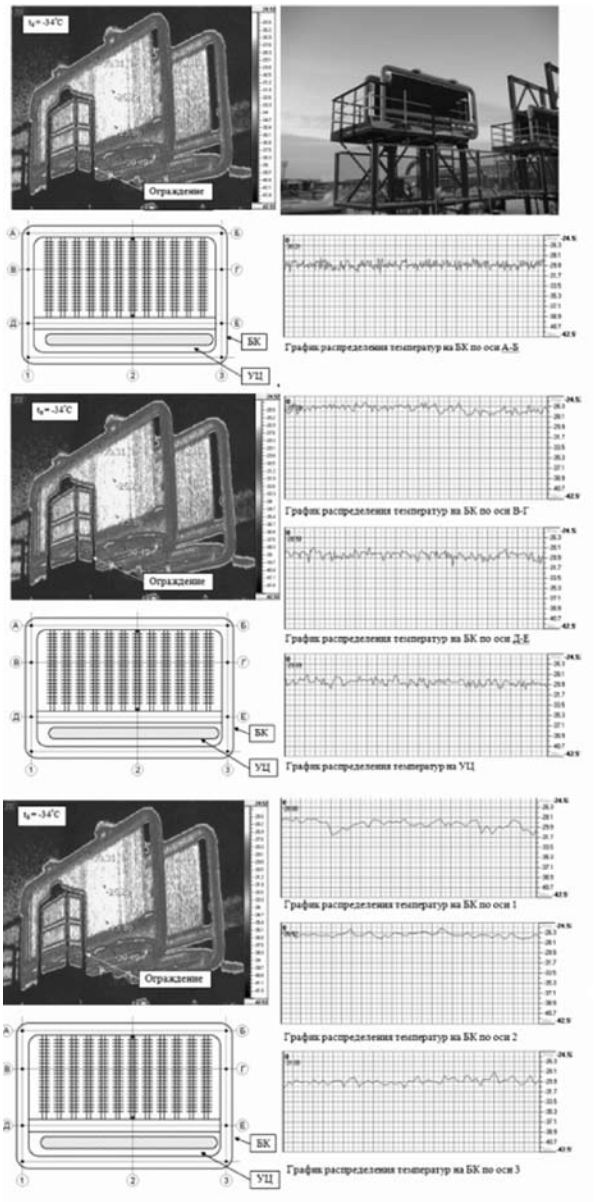


Рисунок 28 - Полная тепловая карта блока конденсации

Сравнение способов контроля запуска систем ТСГ

	Контактный способ	Тепловизионная диагностика
Операции	- Определение температуры конденсаторного блока при помощи термодатчика; - Определение характера движения теплоносителя при помощи шумомера; - Определение тепловой эффективности системы; - Обработка результатов.	- Тепловизионная съемка конденсаторного блока, ускорителя циркуляции и подводов с нескольких ракурсов; - Определение тепловой эффективности системы; - Обработка результатов.
Продолжительность работ из расчета на 1 систему ТСГ	Полевые работы: 1,5 часа. Камеральные работы: 1 час.	Полевые работы: 10 мин. Камеральные работы: 20 мин.
Количество работников	ИТР – 1 чел. Рабочих – 1 чел.	ИТР – 1 чел.
Трудоемкость	Трудоемкость контактного способа выше тепловизионной диагностики не менее чем в 10 раз (2,5ч/0,5ч * 2чел)	
Необходимые приборы и оборудование	-Акустический анализатор циркуляции аммиака (шумомер) на основе диктофона Panasonic RR-US470; - направленный микрофон типа Dialog M107; - наушники; - Звукозащитный чехол и теплоизолирующий контейнер - Температурный датчик типа ТСМ 9204; - Портативный измеритель температуры ИТПМ-2 - мановакуумметр МВПЗА-У (0-1,5МПа); -Термоанемометр микропроцессорный переносной ТТП-2; - Ноутбук.	- Аппарат тепловизионной диагностики ИРТИС-2000; - Ноутбук.
Преимущества способа	-Доступность оборудования.	- Дистанционность; - Скорость; - Точность; - Информативность (полная картина теплового поля); - Компактность оборудования
Недостатки способа	- Низкая скорость; - Низкая информативность, точечные измерения - Потребность в обученных рабочих, осуществляющих вспомогательные функции; - Большое количество оборудования	- Стоимость оборудования.

практики. Теоретические и научные разработки мотивируют модернизацию производства. В свою очередь увеличение технических возможностей способствует не только благосостоянию предприятия, но и открывает новые горизонты для научно-исследовательских работ.

Список литературы

1. ТУ 3642-004-54098700-2006 Системы и установки криогенные. ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень, 2006.

2. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Кинцлер Ю.Э. Практический опыт строительства оснований зданий и сооружений в условиях ВМГ. ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень, 2002

3. Ред. Л.М. Гохберга. Статистика науки и инноваций. Краткий терминологический словарь. Москва 1996

4. Стрижков С.Н. Стратегия инновационного развития, строительства и освоения территорий в криолитозоне. Сборник Всероссийской НПК. ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень, 2011.

5. Хабибуллин Р.Х. Качественный эксперимент по моделированию коррозионного воздействия на антикоррозионные покрытия. Сборник Всероссийской НПК. ООО НПО «Фундаментстройаркос».Тюмень 2011.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЛЬДИСТОСТИ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ВОКРУГ ЗАГЛУБЛЕННОГО ТРУБОПРОВОДА

А. Б. Шабаров, П. Ю. Михайлов, У.Ю. Шастунова, А.А. Вакулин, И.А.Суровцев

ФГБОУ ВПО "Тюменский государственный университет", e-mail: kaf_mms@utmn.ru

Разработаны: теплофизическая модель, алгоритм и компьютерная программа расчета процессов нестационарного тепломассопереноса в мерзлых и талых грунтах вблизи заглубленного трубопровода. Установлено существенное влияние миграции влаги на поля льдистости вблизи заглубленного трубопровода.

1. Физическая модель многофазной среды

1.1. Уравнение баланса массы фаз

Описанная в этой статье теплофизическая модель учитывает особенности реальных процессов передачи тепла и массы в мерзлых и талых грунтах. К числу этих особенностей относятся: 1) нестационарность процессов; 2) решение задачи в двумерной постановке; 3) учет наличия фазовых переходов в многофазной среде, состоящей из: жидкой фазы (свободная и связанная влага), газовой фазы (пары воды и воздух), твердой фазы (грунт и лед). Разработанная модель тепломассообменных процессов учитывает балансы массы каждой отдельной фазы. Изменение массы каждой i – фазы за единицу времени, по физическому закону сохранения массы, приравнивается сумме потока массы этой фазы через поверхность контрольного объема (КО) V и массы фазы образовавшейся внутри КО в результате фазовых превращений [1,2,3]:

$$\int_V \frac{\partial \rho_i}{\partial t} \cdot dV = -\int_S \rho_i \cdot \nu_i^n \cdot dS + \int_V \sum_{j=1, j\neq i}^{N} J_{ji} \cdot dV \qquad (1.1)$$

где i=1,2,...,N – номер фазы, J_{ji} – интенсивность перехода j-й фазы в i-ю в единице объема в единицу времени, $\rho_i = \frac{m_i}{V}$ – приведенная плотность фазы (m_i – масса фазы), v^n_i – скорость движения соответствующей фазы.

1.2. Уравнение баланса массы фаз в контрольных объемах

Уравнение баланса массы (п.1.1) (в каждом фиксированном КО V_{ij} для промежутка времени (t(n), t(n+1)=t(n)+Δt)):

– для водяного пара:
$$\frac{\rho_{nij}^{(n+1)} - \rho_{nij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = -\sum_{k=1}^{k=4} \rho_{nijk} \cdot V_{nijk}^{nk} \cdot \Delta S_{ijk} + I_{\ln} \cdot V_{ij} \qquad (1.2)$$

– для воздуха:
$$\frac{\rho_{\text{в}ij}^{(n+1)} - \rho_{\text{в}ij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = -\sum_{k=1}^{k=4} \rho_{\text{в}ij} \cdot V_{\text{в}ijk}^{nk} \cdot \Delta S_{ijk} \qquad (1.3)$$

– для воды:
$$\frac{\rho_{lij}^{(n+1)} - \rho_{lij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = -\sum_{k=1}^{k=4} \rho_{lijk} \cdot V_{lijk}^{nk} \cdot \Delta S_{lijk} + I_{nl} \cdot V_{ij} + I_{Sl} \cdot V_{ij} \qquad (1.4)$$

– для льда:
$$\frac{\rho_{Sij}^{(n+1)} - \rho_{Sij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = I_{IS} \cdot V_{ij} \qquad (1.5)$$

В уравнениях (1.2) – (1.5) правые части вычисляются как средние для промежутка ($t^{(n)}$, $t^{(n+1)}$), т.е. в момент времени t(n)+εΔt, где 0≤ε≤1; обозначения индексов следующие: n – пар, в – воздух, l – жидкая фаза, s – твердая фазы. В применяемом нами методе «предиктор – N раз корректор» применяется итерационная на каждом шаге или на M шагах схема, как правило, с ε≥0,5. Нижние и верхние индексы k=1,2,3,4 при решении двумерных задач соответствуют W,E,S,N граням контрольных объемов. Интенсивность фазовых переходов в поровом пространстве КО Vij характеризуется величинами: Iln, кг/м3С – интенсивностью испарения влаги; Inl, кг/м3С – интенсивностью конденсации водяного пара; ISl, кг/м^{3}С – интенсивностью плавления льда; IlS, кг/м3С – интенсивностью замерзания воды. Расходы паровой и воздушной компонент газовой смеси через грани КО записываются в виде: , а расход влаги в виде: . Следует отметить, что в уравнениях (1.2) – (1.5) содержатся приведенные плотности: – пара, – воздуха, – воды, – льда. Они выражаются через истинные плотности и объемные доли составляющих , следующим образом: . Кроме того, рассматривается объемная доля сухого грунта в КО: , где m–пористость, а также приведенная плотность сухого грунта . Схематически объемные доли фаз и компонентов приведены на рис.1.

1.3. Уравнение баланса внутренней энергии

Уравнение баланса внутренней энергии смеси с одинаковой температурой фаз запишем с учетом аддитивности внутренней энергии при условии малости мощности внутренних сил, что оправдано в связи с малостью скоростей и производных от скоростей движения газовой и жидкой фазы в грунтах [1,2,3]:

$$\int_V \frac{\partial\left(\sum_{i=1}^{N} \rho_i \cdot U_i\right)}{\partial t} \cdot dV = -\int_{S'} \sum_{i=1}^{N} \left(\rho_i \cdot \nu_i^n \cdot U_i\right) dS - \int_S q^n \cdot dS \qquad (1.6)$$

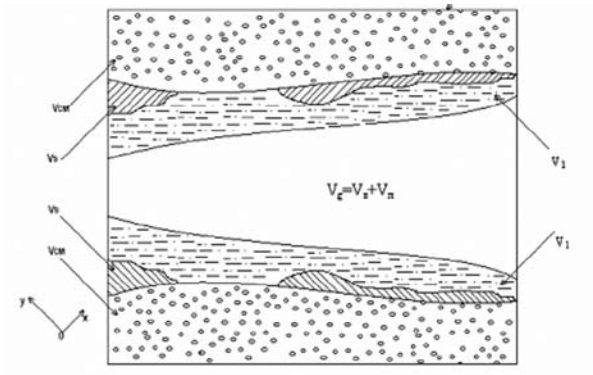


Рисунок 1 - Схема объемной структуры фаз в КО; Vсм, VS, Vl, Vв, Vп – объемы, занятые соответственно сухим грунтом, льдом, влагой, воздухом, водяным паром; x,y – ортогональные координаты.

где в левой части уравнения – изменение внутренней энергии смеси в объеме V за единицу времени, первое слагаемое в правой части характеризует перенос внутренней энергии фаз через поверхность S, а второе – перенос тепла через поверхность S механизмом теплопроводности. Следует отметить, что принятая форма записи уравнения энергии не содержит в явном виде теплот фазовых переходов. Эти теплоты входят лишь в условия нормировки [1,2,3]. Основная сложность и новизна разработанной модели тепломассопереноса в грунтах заключается в комплексном одновременном моделировании потоков массы и внутренней энергии влаги и газовой фазы через грани КО выражениями вида $\rho_l v_l^n \Delta S$, $\rho_g v_g^n \Delta S$ в (1.1) и $\rho_l v_l^n U_l \Delta S$, $\rho_g v_g^n U_g \Delta S$ в (1.6), а так же моделировании основных фазовых переходов: испарение жидких пленок в порах J_{lg} при парциональном давлении пара меньшем, чем давление насыщенных паров, конденсации водяного пара J_{gl} при температурах ниже, чем точка росы, замерзание воды в порах J_{ls} с учетом обобщенных данных об изменении приведенной плотности незамерзающей воды в порах грунта и плавление льда J_{Sl}. Следует отметить наличие и учет в данной модели гистерезиса в процессе замерзание воды – плавление льда. Тепловые потоки, моделируются с учетом зависимости теплопроводности от состава среды, температуры и влажности.

1.4. Уравнение баланса внутренней энергии многофазной среды в контрольных объемах

Уравнение баланса внутренней энергии ((1.6) п.1.3) многофазной среды состоящей из газовой фазы (водяной пар и воздух), жидкой фазы (свободная и связанная воды) и твердой фазы (лед, сухой грунт) запишем в приближении однотемпературной среды и пренебрежения мощностью внутренних сил:

$$\frac{\sum_{i=1}^{N}(\rho_i \cdot U_i)^{(n+1)} - \sum_{i=1}^{N}(\rho_i \cdot U_i)^{n}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = -\sum_{k=1}^{k=4}\sum_{i=1}^{N}\left(\rho_i \cdot v_i^{nk} \cdot U_i\right)_k \cdot \Delta S_k - \sum_{k=1}^{k=4} q_k^{nk} \cdot \Delta S_k \qquad (1.7)$$

где верхние индексы (n) и (n+1) соответствуют моментам времени t(n) и t(n+1)=t(n)+Δt, индексы k=1,2,3,4 соответствует четырем граням КО при 2D – моделировании; N=5 – число фаз (компонент), причем индексы i=1,2,3,4,5 относятся соответственно к параметрам: паров воды (i=1), воздуха (i=2), влаги (i=3), льда (i=4), сухого грунта (i=5); Ui, Дж/кг – удельная внутренняя энергия компонентов; q_k^{nk}, Вт/м^2 – удельный тепловой поток через грань ΔS_k контрольного объема V. Внутренняя энергия фаз в многофазной среде является аддитивной функцией [1,2,3]. Тогда для момента времени $t^{(n+1)}$ получим для внутренней энергии ρU смеси в целом для КО V_{ij}:

$$(\rho \cdot U)_{ij}^{n+1)} = \left(\rho_n \cdot U_n + \rho_в \cdot U_в + \rho_l \cdot U_l + \rho_S \cdot U_S + \rho_{см} \cdot U_{см}\right)_{ij}^{n+1)} \qquad (1.8)$$

Удельная внутренняя энергия сред, не испытывающих фазовых переходов, определяется с точностью до постоянных. В средах с температурами фаз T=T(t,x,y): для воздуха – $U_в = C_{vв} T$, для сухого грунта – $U_{см} = C_{см} T$, где $C_{vв}$, $C_{см}$, Дж/кг°К – удельная изохорная теплоемкость воздуха и удельная теплоемкость сухого грунта. Для льда – $U_s = C_s T + U_{so}$, где C_S – удельная теплоемкость льда, U_{So}, Дж/кг – несущественная константа, которая принимается равной нулю. Для воды – $U_l = C_l (T - T_0) + U_{lo}$, для водяного пара – $U_n = C_{vn} (T - T_0) + U_{no}$, где C_l, $C_{vп}$ – удельные теплоемкости воды и пара, а константы U_{lo} и U_{So} являются существенными константами при наличии фазовых переходов типа вода ↔ пар l↔п и вода – лед l↔S. Эти константы определяются условиями нормировки при фазовых переходах [1,2,3]:

$$i_n - i_l = l_{ln} \qquad (1.9)$$

$$i_l - i_s = l_{Sl} \qquad (1.10)$$

$$i_n - i_l = i_{ln} \qquad (1.11)$$

$$i_S = U_S + \frac{P_o}{P_S^{(o)}} \qquad (1.12)$$

$$i_l = U_l + \frac{P_o}{P_l^{(o)}} = C_l \cdot (T - T_o) + U_{lo} + \frac{P_o}{P_l^{(o)}} \qquad (1.13)$$

$$i_n = U_n + \frac{P_n}{P_n^{(o)}} = C_{vn} \cdot (T - T_o) + U_{no} + \frac{P_n}{P_n^{(o)}} \qquad (1.14)$$

где i_S, i_l, $i_п$, Дж/кг – удельные энтальпии льда, воды и водяного пара при условиях фазовых переходов; l_{Sl}, l_{ln}, Дж/кг – удельная теплота фазовых переходов лед – вода и вода – пар. Начальное значение удельной внутренней энергии воды:

$$U_{lo} = l_{Sl} + C_S \cdot T + \frac{P_o}{P_s^{(o)}} - \frac{P_o}{P_l^{(o)}} \quad (1.15)$$

Начальное значение удельной внутренней энергии пара:

$$U_{no} = U_{lo} + l_{\ln} + (C_l - C_{vn}) \cdot (T - T_o) + \frac{P_o}{P_l^{(o)}} - \frac{P_o}{P_n^{(o)}} \quad (1.16)$$

Полная энергия смеси (1.8) с одинаковой температурой компонент запишется в виде:

$$(\rho \cdot U) = (\rho_n \cdot C_{vn} + \rho_в \cdot C_{vв} + \rho_l \cdot C_l + \rho_S \cdot C_S + \rho_{см} \cdot C_{см}) \cdot T + \rho_n \cdot (U_{no} - C_{vn} \cdot T_o) + \rho_l \cdot (U_{lo} - C_l \cdot T_o) \quad (1.17)$$

Обозначим:

$$\rho \cdot C = \rho_n \cdot C_{vn} + \rho_в \cdot C_{vв} + \rho_l \cdot C_l + \rho_S \cdot C_S + \rho_{см} \cdot C_{см} \quad (1.18)$$

$$\rho \cdot U_o = \rho_n \cdot ((U_{no} - C_{vn} \cdot T_o) + \rho_l \cdot (U_{lo} - C_l \cdot T_o) \quad (1.19)$$

1.5. Расчет температур контрольных объемов

Из уравнения баланса внутренней энергии многофазной среды (1.7) получим для КО Vij:

$$(\rho \cdot C)_{ij}^{(n+1)} \cdot T_{ij}^{(n+1)} = (\rho \cdot C)_{ij}^{(n)} \cdot T_{ij}^{(n)} + (\rho \cdot U_o)_{ij}^{(n)} - (\rho \cdot U_o)_{ij}^{(n+1)} - \quad (1.20)$$

$$- \sum [(\rho_n \cdot V_n^n \cdot U_n) + (\rho_в \cdot V_в^n \cdot U_в) + (\rho_l \cdot V_l^n \cdot U_l)]_{ijk} \cdot \frac{\Delta S_k}{V_{ij}}$$

где $Q_{вн_{ij}} = -\sum_{k=1}^{k=4} q_{kij}^{nk} \cdot \Delta S_k$ – тепловая мощность, подводимая к КО V_{ij} через его грани механизмом теплопроводности (рис.2). Температуры на гранях W, E, S, N определяем из условий равенства тепловых потоков через грани. Так, например, для грани W имеем:

$$q_w = \lambda_{i-l,j} \cdot \frac{T_w - T_{ww}}{dx_{i-1}/2} = -\lambda_{ij} \cdot \frac{T - T_w}{dx_i/2} \quad (1.21)$$

откуда:

$$T_w = \frac{\lambda_{ij} \cdot dx_{i-1} \cdot T + \lambda_{i-1,j} \cdot dx_i \cdot T_{ww}}{\lambda_{ij} dx_{i-1} + \lambda_{i-1,j} \cdot dx_i} \quad (1.22)$$

Аналогично выражаем температуры на гранях E, S, N:

$$T_E = \frac{\lambda_{ij} \cdot dx_{i+1} \cdot T + \lambda_{i+1,j} \cdot dx_i \cdot T_{EE}}{\lambda_{ij} dx_{i-1} + \lambda_{i-1,j} \cdot dx_i}$$

$$T_S = \frac{\lambda_{ij} \cdot dy_{i-1} \cdot T + \lambda_{i-1,j} \cdot dy_i \cdot T_{SS}}{\lambda_{ij} dy_{i-1} + \lambda_{i-1,j} \cdot dy_j} \quad (1.23)$$

$$T_N = \frac{\lambda_{ij} \cdot dy_{j+1} \cdot T + \lambda_{i,j+1} \cdot dy_j \cdot T_{NN}}{\lambda_{ij} dy_{j+1} + \lambda_{i,j+1} \cdot dy_j}$$

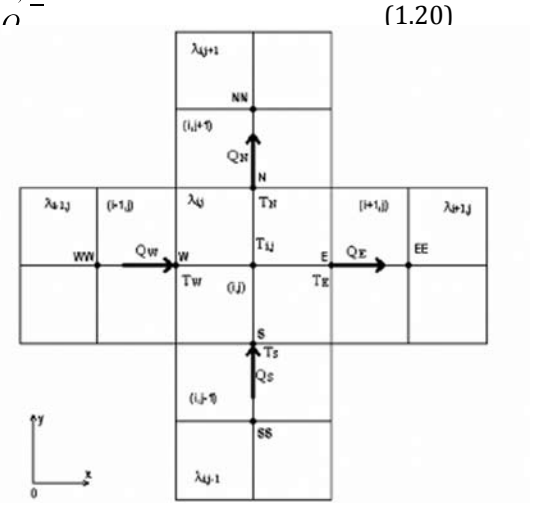


Рисунок 2 - К определению тепловой мощности и потоков массы фаз подводимой через грани W, E, S, N к контрольному объему Vij.

Тепловая мощность Q, Вт, подводимая через грани W, E, S, N к контрольному объему Vij выражается с учетом (1.22) – (1.23):

$$Q_w = -\frac{2 \cdot \lambda_{ij}}{dx_i} \cdot (T_{ij} - T_W) \cdot dy_j \cdot dz \qquad Q_E = -\frac{2 \cdot \lambda_{ij}}{dx_i} \cdot (T_E - T_{ij}) \cdot dy_j \cdot dz$$

$$Q_S = -\frac{2 \cdot \lambda_{ij}}{dy_i} \cdot (T_{ij} - T_S) \cdot dx_i \cdot dz \qquad Q_N = -\frac{2 \cdot \lambda_{ij}}{dy_j} \cdot (T_N - T_{ij}) \cdot dx_i \cdot dz \quad (1.24)$$

Тогда тепловая мощность, подводимая к контрольному объему Vij равна:

$$Q_{вн_{ij}} = Q_W - Q_E + Q_S - Q_N \quad (1.25)$$

Разделив (1.20) на $(\rho C)^{n+1}$ получим:

$$T_{ij}^{(n+1)} = \alpha \cdot T^n + \Delta T_o + \Delta T_n + \Delta T_в + \Delta T_l + \Delta T_q \quad (1.26)$$

где: $\alpha = \frac{(\rho \cdot C)_{ij}^{(n)}}{(\rho \cdot C)_{ij}^{(n+1)}}$ $\Delta T_o = \frac{(\rho \cdot U_o)_{ij}^{(n)} - (\rho \cdot U_o)_{ij}^{(n+1)}}{(\rho \cdot C)_{ij}^{(n+1)}}$ – изменение температуры, связанное с изменением по времени приведенных плотностей пара и воды и ненулевыми значениями констант $U_{по}$ и U_{lo};

$\Delta T_n = -\sum_{k=1}^{k=4} (\rho_n \cdot v_n^n \cdot U_n)_k \cdot \frac{\Delta S_k \Delta t}{V_{ij} \cdot (\rho \cdot C)_{ij}^{(n+1)}}$ – изменение температуры из-за потока внутренней энергии пара через грани КО;

$\Delta T_в = -\sum_{k=1}^{k=4} (\rho_в \cdot v_в^n \cdot U_в)_k \cdot \frac{\Delta S_k \Delta t}{V_{ij} \cdot (\rho \cdot C)_{ij}^{(n+1)}}$ – изменение температуры из-за потока внутренней энергии воздуха через грани КО;

$\Delta T_l = -\sum_{k=1}^{k=4} (\rho_l \cdot v_l^n \cdot U_l)_k \cdot \frac{\Delta S_k \Delta t}{V_{ij} \cdot (\rho \cdot C)_{ij}^{(n+1)}}$ – изменение температуры из-за потока внутренней энергии влаги через грани КО;

$\Delta T_q = \frac{Q_{вн_{ij}} \cdot \Delta t}{V_{ij} \cdot (\rho \cdot C)^{(n+1)}}$ – изменение температуры из-за потока тепла через грани КО вследствие теплопроводности.

Приведение уравнения баланса внутренней энергии к виду (1.26) позволяет оценивать влияние и относительную значимость отдельных физических механизмов теплопереноса по прираще-

ниям температуры.

2. Расчетное исследование

2.1. Алгоритм и программная реализация метода расчета нестационарных полей температуры и льдистости в мерзлых грунтах

На основе предложенной и обоснованной теплофизической модели нестационарных тепловлажностных режимов мерзлых грунтов разработан вычислительный алгоритм и компьютерная программа Heatmassgrunt. Используемая в данной работе алгебраическая форма уравнений тепломассопереноса для конечного числа КО V_{ij} (п.1.1 – п.1.5) с соответствующими замыкающими условиями, на каждом временном шаге, эквивалентна системе дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производных по времени:

$$\frac{df_k}{dt} = F_k(x, y, t, f_1, f_2, ..., f_k) \qquad (2.1)$$

где k=1,2,3,4; $f_1=\rho_l$; $f_2=\rho_п$; $f_3=\rho_в$ – приведенные плотности влаги, паров воды и воздуха; f_4=T – общая температура фаз, $f_5=\rho_S$ – приведенная плотность льда вычисляется по алгебраической аппроксимационной модели $\rho_S=\rho_S(\rho_l,T)$. Соотношение (2.1) применяется для каждого КО V_{ij} (i=N_1,...,N_2; j=M_1,...,M_2) последовательно для временных интервалов (t,t+Δt). Используется схема «предиктор – С-раз корректор» [8 и др.]с коэффициентом релаксации α≥0,5:

$$f_k^{(n+1)} = f_k^{(n)} + \left\lfloor \alpha \cdot F_k^{(n)}(t) + (1-\alpha) \cdot F_k^{(c)}(t+\Delta t) \right\rfloor \Delta t \qquad (2.2)$$

где $F_k^{(c)}$ – величина правой части (2.1), вычисленная после С итераций.

Процедура (2.2) итерационно повторяется на каждом временном шаге (t,t+Δt) С – раз, где С – число итераций. Число итераций в пределах каждого временного шага первоначально задается С=Со (в наших расчетах принималось Со=5). После расчета (NC) временных шагов, определяется максимальная невязка по плотностям и температурам при С=Со и С=Со+1 и во всех КО проверяется условие:

$$\frac{\Delta\rho_k}{\rho_k} \le \varepsilon_{\rho k}, \frac{\Delta T}{T} \le \varepsilon_T \qquad (2.3)$$

где $\varepsilon_{\rho k}$, ε_T – принятая точность итераций. Если условие (2.3) не выполняется, то происходит возврат на (NC) временных шагов назад и расчеты повторяются с числом итераций на единицу большим.

2.2. Расчетная область и граничные условия

На рис. 3 изображена расчетная область и граничные условия. На верхней грани задается температура воздуха – Tpov в зависимости от времени. Так же на этой грани задается коэффициент теплоотдачи от воздуха к грунту . На грани трубы боковым стенкам контрольных объемов, которые касаются трубы, присваивалась температура – Ttrub в зависимости от времени. Характеристики глинистого грунта [4,5,6] приведены в таблице 1.

2.3. Результаты расчета полей температуры и льдистости в мерзлом глинистом грунте вокруг заглубленного трубопровода

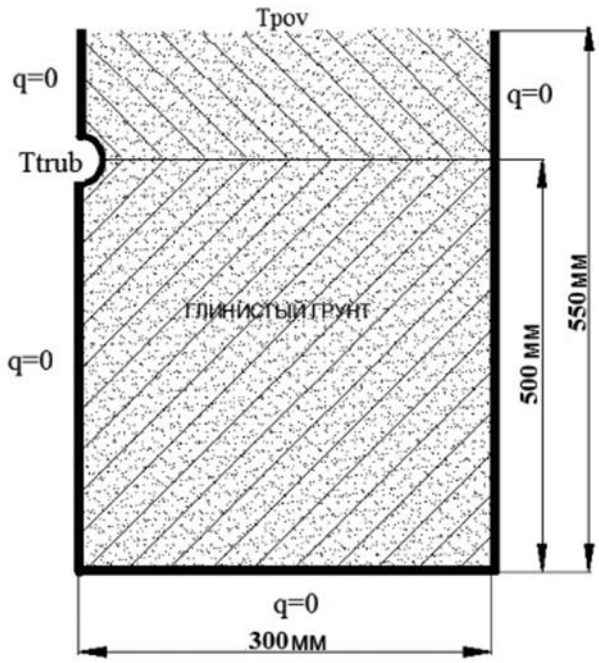


Рисунок 3 - Расчетная область

Таблица 1.

Характеристика	Величина
Удельный вес грунта	20000 $\frac{Н}{м^3}$
Удельный вес частиц грунта	27000 $\frac{Н}{м^3}$
Влажность (массовая)	10%
Теплоемкость (массовая)	840 $\frac{Дж}{кг\,К}$
Пористость	0,475
Коэффициент пористости	0,906
Плотность	1735 $\frac{кг}{м^3}$
Удельный вес высушенного грунта	16677 $\frac{Н}{м^3}$
Коэффициент теплопроводности талого грунта	2 $\frac{ккал}{м\,ч\,градС}$
Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта	2.2 $\frac{ккал}{м\,ч\,градС}$

С помощью программы Heatmassgrunt был произведен расчет, и программы SigmaPlot были построены изотермы распространения температуры и изолинии распространения приведенной льдистости в мерзлом глинистом грунте вокруг трубопровода. В результате на рис. 4 представлено распределение температуры в грунте вокруг трубопровода, полученное в результате расчета через 20 и 60 часов, а на рис. 5 представлено распределение приведенной льдистости через те же промежутки времени Температуры указаны в Кельвинах, приведенная льдистость имеет размерность кг/м3. Стоит заметить, что изотермы температур, как и поля льдистости, строились в области меньшей, чем расчетная. Это связано с тем, что наибольшие изменения температуры и льдистости наблюдаются вблизи трубы.

На рисунке 5 видно увеличение количества льда в расчетной области с понижением температуры, а так же малое количество льда на верхней грани расчетной области из-за испарения водяного пара во внешнюю среду.

Понижение температуры в расчетной области с течением времени связано с заданием граничных условий: температуры Tpov и Ttrub всегда ниже 273 К. Тем самым моделируется подземный трубопровод с холодным теплоносителем (например, сжиженный газ), эксплуатируемый в холодное время года. Сравнение рассчитанных полей температуры и льдистости, с полями, полученными экспериментально, показало приемлемую точность разработанных физико-математической модели, алгоритма и компьютерной программы Heatmassgrunt.

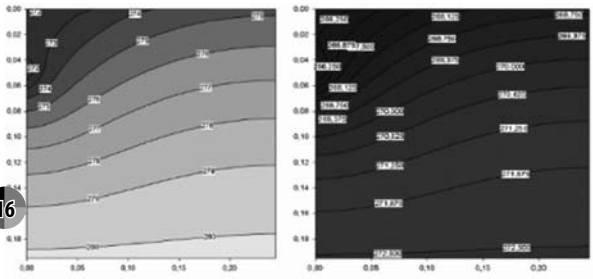


Рисунок 4 - Температурные поля в грунте, рассчитанные по программе. Температуры в грунте через 20 часов (слева) и через 60 часов (справа).

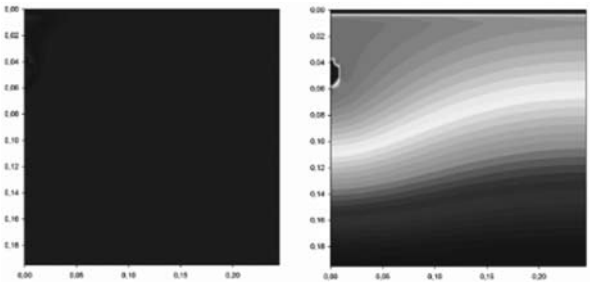


Рисунок 5 - Поля льдистости в грунте, рассчитанные по программе. Содержание льда в грунте через 20 часов (слева) и через 60 часов (справа).



Рисунок 6 - Шкала приведенной льдистости

Шкала приведенной льдистости имеет следующий вид (приведенная льдистость имеет размерность кг/м3):

Основные выводы могут быть сведены к следующему:

1. Разработана теплофизическая модель нестационарных тепловлажностных режимов в мерзлых и талых грунтах.

2. На основе разработанной модели созданы вычислительный алгоритм и компьютерная программа «Heatmassgrunt», позволяющая проводить расчет полей температур, влажности и льдистости в грунтах, вблизи инженерных сооружений.

3. Проведено расчетно-теоретическое исследование нестационарных полей температуры и льдистости вблизи заглубленного трубопровода. Установлено существенное влияние миграции влаги на поля льдистости вблизи заглубленного трубопровода.

Список литературы

1.Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.I. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 464с.

2. Гребер Г., Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене. М.: Изд-во иностр. лит-ра, 1958. – 586с.

3. Теория тепломассообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. – 495с.

4. Цытович И.А. Механика мерзлых грунтов. Учеб. Пособие. М., «Высш. школа», 1973 – 448с.

5. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: Справочное пособие. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – 146с.

6. Определение коэффициента теплопроводности больших массивов грунтов. Даниэлян Ю.С. , Зайцев В.С. .Нефтяное хозяйство. 2009. №5 с 98-100.

7. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат. 1979. 416с .

8. Пульдас Л.А. Нестационарные тепловые режимы в гражданских зданиях: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.23.03. Тюмень 2008, 20с.

КАК ОБЕСПЕЧИТЬ СТАБИЛЬНОСТЬ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В КРИОЛИТОЗОНЕ

В.Г. Кондратьев[1,2]

[1]НПП «ТрансИГЭМ», г. Москва; 2ЗабГУ, г. Чита, e-mail: v_kondratiev@mail.ru

История создания железных дорог в районах вечной мерзлоты насчитывает уже более 110 лет: Забайкальская, Амурская, Аляскинская, Норильская, Гудзонская, Лабрадорская, Байкало-Амурская, Амуро-Якутская, Ямальская, Цинхай-Тибетская и другие дороги в России, США, Канаде и Китае. Строительство каждой из этих дорог – выдающийся этап транспортного строительства, однако пока ни кому и ни где не удалось построить железнодорожный путь, который бы не испытывал деформаций вследствие осадок при оттаивании льдистых грунтов основания. В докладе освещаются возможные пути решения этой проблемы.

В районах с вечной мерзлотой и глубоким сезонным промерзанием горных пород, занимающих около 70% территории России, эксплуатация железных дорог сопряжена со значительными, все возрастающими материальными и трудовыми затратами на текущее содержание и ремонты пути, контактной сети, воздушных линий, средств связи, автоблокировки и т.п. В основном это связано с многочисленными деформациями земляного полотна вследствие осадок при оттаивании льдистых грунтов или пучения при промерзании влажных дисперсных грунтов основания.

Эти проблемы характерны для всех железных дорог независимо от срока их эксплуатации: для Забайкальской ж.д., находящейся в эксплуатации более сотни лет, БАМ и АЯМ – десятки лет, подъездных путей Чара-Чина и Улак-Эльга – несколько лет.



Рисунок 1 - Деформации Забайкальской ж.д., км 6278: а - февраль 1998 г., б - февраль 2011 г.

Так, на Забайкальской ж.д. известен «золотой» километр – участок км км 6277-6278 (рис. 1), где постоянные деформации пути отмечаются с 1949 г.

Здесь постоянное ограничение скорости движение поездов до 40, иногда 15 км/час, введено с 1969 г. и ежегодно выполняются выправки и ремонт пути. Местами балласт уже провалился на 5-6 м, однако осадки пути не прекращаются. Они могут продолжаться ещё 100-150 лет, поскольку в основании пути местами залегают льдистые многолетнемерзлые породы мощность 25-30 м.



Рисунок 2 - Деформации БАМ ж.д., км 1374: а – сентябрь 2003 г. (фото Козыревой Е.А.), б - июль 2011 г.

На Восточно-Сибирской ж.д. в районе разъезда Казанкан, 1374 км БАМ, второе десятилетие деформируется железнодорожный путь (рис. 2).

Из первоначальных 4 путей остался 1, но и его приходится выправлять практически ежемесячно и часто ремонтировать. За последние 8 лет на ремонт участка затрачено около 500 млн. рублей, но проблема стабилизация пути так и осталась не решенной: скорость движения по-прежнему ограничена 15 км/час, угроза внезапного схода пути и прекращения движения поездов по БАМу остается. Участок дороги электрифицирован, приходится также постоянно ремонтировать и контактную сеть.

В настоящее время БАМ эксплуатируется на пределе пропускной способности. Главная проблема: состояние пути. Так, на Дальневосточной дороге из 3539 км земляного полотна 637 км (18%) подвержены деформациям вследствие оттаивания многолетней мерзлоты в основании. Деформации железнодорожного пути носят многолетний и незатухающий характер как на участках, построенных в 1974-1988 гг., так и в 1932-1940 гг.

Аналогичная ситуация и на западной части БАМ, входящей в состав Восточно-Сибирской ж.д. Наиболее характерный пример участок Наледный – Хани, пересекающий с запада на восток Чарскую котловину и хребты Кодар (тоннелем длиной 2 км) и Удокан. Здесь повсеместно развиты многолетнемёрзлые горные породы, нередко содержащие сегрегационный, инъекционный, погребённый и полигонально-жильный лёд. Талики приурочены только к руслам рек и днищам глубоких озёр, а также местам разгрузки подземных вод глубокой циркуляции. Протяжённость железнодорожного пути составляет 217,89 км, земляного полотна – 211,5 км. По данным на 3.08.2010 г. на участке имелось 171 место с деформациями земляного полотна общей протяжённостью 54, 61 км (25,8% от длины участка). За период с 2005 по 2010 гг. количество больных мест земляного полотна и их об-

щая протяжённость изменялись следующим образом: на 1.01.2005 г. – количество мест – 100, протяжённость – 27,16 км (12,8%); на 1.01.2006 г. – 105, 27,65 км (13,1%); на 1.01.2007 г. – 177, 58,70 км (27,8%); на 1.01.2008 г. – 183, 61,76 км (29,21%); на 20.05.2009 г. – 169, 54,12 км (25,6%); на 3.08.2010 г. – 171, 54,61 км (25,8%) соответственно. Таким образом, за последние 5 лет количество больных мест увеличилось в 1,7 раза, суммарная протяжённость – в 2 раза, несмотря на систематические, в т.ч. капитальные, ремонты и реконструкцию пути. Многолетние деформации земляного полотна вследствие оттаивания льдистых многолетнемёрзлых грунтов в основании на участке Наледный – Хани отмечаются на 144 (84,2%) местах общей протяжённостью 43,025 км (78,8%).

Стратегия инновационного развития Российских железных дорог предусматривает перспективный рост перевозок по БАМ для обеспечения потребностей экономики страны и населения. Предполагается, что к 2020 г. необходимо увеличить пропускную способность БАМ в 4,8-7,5 раз. При этом планируется увеличить осевые и погонные нагрузки грузовых поездов, массы и длины поездов и увеличить скорость их движения. Но прежде необходимо кардинально улучшить состояние земляного полотна, в особенности на участках льдистых многолетнемёрзлых грунтов, где скорость движения поездов на протяжений десятилетий постоянно ограничена до 25-40 км/час.

Предотвращение деградации вечной мерзлоты в основании железных дорог, а именно с этим обычно связаны длительные и опасные деформации пути (на БАМе – 70-90% всех деформаций), на протяжении более 110 лет остается актуальной проблемой, как в научном, так и практическом отношениях в России [1, 3, 5-8], а также на Аляске (рис. 3), в Канаде [9] и Китае [10].

Сооружение в 2001-2006 гг. в Китае Цинхай-Тибетской (Цинхай-Хизанской) ж.д. – это новейший этап железнодорожного строительства в криолитозоне и очередная, колоссальная по масштабам и средствам, попытка найти технические решения, позволяющие обеспечить стабильность железнодорожного пути на льдистых, просадочных при оттаиваний многолетнемерзлых грунтах. Современная железная дорога построена в сложнейших горно-геологических условиях: 80% трассы протяжённостью 1142 км от Голмуда до Лхассы проходит по территории с абсолютными отметками местности свыше 4000 м и около 50% – по вечномерзлым грунтам со среднегодовой температурой от -0,5 до -3,6оС и мощностью от 5-25 до 60-130 м и больше. Наивысшую отметку трассы 5072 м на перевале через хребет Тангулашань пассажирский поезд преодолевает со скоростью 100 км/час, а весь путь от Голмуда до Лхассы занимает всего 13 часов.



Рисунок 3 - Деформации Аляскинской ж.д., июнь 2008 г.

По заявлениям китайских специалистов Цинхай-Тибетская ж.д., после 3 лет эксплуатации, не имела тревожных участков, которые могли бы влиять на движение поездов. Тем не менее, по их же данным полевых наблюдений в 2006-08 гг. [10], уже сейчас развиваются болезни земляного полотна: термокарст, осадки при оттаивании, сплывы при оттаивании, термоэрозия, морозное пучение и др.

Так, в 2007 г. в полосе 100 м по обе стороны от земляного полотна насчитывалось 250 термокарстовых озёр площадью от 6000 до 1200 м2, из которых около 70% имели эллиптическую, а 12% вытянутую формы; 80% термокарстовых озёр до дна зимой не промерзают.

Многочисленные осадки земляного полотна при оттаивании многолетнемёрзлых грунтов в основании отмечены главным образом на участках широких насыпей и сочленений с мостами. Анализ наблюдений с июля 2003 г. по декабрь 2007 г. тепловых осадок насыпей высотой от 3,2 до 6,0 м на 56 участках показал, что они тем больше, чем выше насыпь: 13-15 см при высоте насыпи меньше 5 м, 17-23 см при высоте насыпи больше 5 м; в среднем – 17,8 см. 35 участков (63%) характеризуются «тёплой» мерзлотой со среднегодовой температурой выше -0,5оС; 7 участков – с температурой от -0,5 до -1,0оС; 12 участков – без многолетней мерзлоты; на 26 участках(46%) льдистость от 20% до 50%.; на 18 участках (32%) льдистость меньше 20%. Обследованные насыпи были трёх типов: обычной конструкции, из скального камня, с каменной наброской на откосах насыпи. Максимальная осадка земляного полотна (18,6 см) была отмечена у насыпи из скального камня высотой 6,0 м в месте сочленения с мостом, минимальная осадка составила 3 см. Отмечалось постоянное увеличение осадок земляного полотна в течение наблюдательного периода. Так, суммарная протяжённость больных мест с осадками составила в 2005 г. 15,76 км, в 2007 г. – 18,56 км. Кроме того в 2007 г. отмечены просадки берм общей протяжённостью около 1 км, в 2005 г. такие просадки не отмечались.

По данным обследования в апреле 2009 г. на участке от Ердаугоу до Белухэ 43 мостов в 172 точках (по 4 точки на 1 мост) установлено, что осадки имеют место в 73% точек, а в 44 точках (35,2%) осадки составили более 10 см. Судя по тенденции количество их может увеличиваться.

Таким образом, начавшаяся эксплуатация Цинхай-Тибетской ж.д. еще раз подтверждает, актуальность проблемы стабилизации земляного полотна на льдистых многолетнемёрзлых грунтах.

Так можно ли решить эту вековую проблему?

Можно. Причем двумя принципиально различными путями: сохраняя грунты основания в мерзлом состоянии на протяжении всего времени эксплуатации дороги или, если невозможно вырезать, превентивным оттаиванием льдистых грунтов и замещением их. Тот или иной вариант ста-

билизации земляного полотна следует выбирать на основе теплотехнических расчетов и технико-экономического сравнения вариантов с учетом затрат как на строительство, так и содержание железнодорожного пути и иной инфраструктуры, а также с учетом эксплуатационных расходов.

Но прежде надо выявить, качественно и количественно, все факторы возможного оттаивания мерзлых грунтов в конкретных природных и техногенных условиях, а затем воздействовать на эти факторы, добивать нужного температурного режима грунтов основания земляного полотна.

Оттаивание вечномерзлых грунтов под земляным полотном железных дорог обычно вызывают: 1) увеличение поглощения солнечной радиации земляным полотном по сравнению с естественной поверхностью; 2) инфильтрация теплых летних осадков в тело и основание земляного полотна; 3) увеличение толщины снежного покрова у основания насыпи и на прилегающей территории; 4) фильтрация поверхностных и подземных вод в тело и основание земляного полотна на косогорных участках.

С учетом этого нами разработано несколько способов укрепления основания земляного полотна на сильнольдистых вечномерзлых грунтах, предусматривающих понижение среднегодовой температуры грунтов и сохранение их в постоянно-мерзлом состоянии путем регулирования соотношения охлаждающих и отепляющих факторов или, наоборот, превентивное оттаивание сильнольдистых массивов с одновременным замещением их непросадочной грунтовой массой [2, 3].

Эти технические решения прошли определенную апробацию путем публикации статей, докладов и монографий в отечественных и зарубежных изданиях, а также использования в опытно-экспериментальных проектах строящихся Амуро-Якутской железнодорожной магистрали и подъездного железнодорожного пути Улак – Эльга, при технико-экономическом обосновании стабилизационных мероприятий для Забайкальской ж.д. Некоторые из них применены в Китае на Цинхай-Тибетской ж.д., в частности, солнцеосадкозащитный навес (рис. 4), который исключает прогрев земляного полотна прямой солнечной радиацией, теплыми летними осадками и под которым нет снежного покрова, что усиливает зимнее охлаждение грунтов. По данным натурных наблюдений [11] навес на откосах насыпи может понижать температуру грунтов на 3-5оС (рис. 5) и обеспечивать стабильность земляного полотна на сильнольдистых вечномерзлых грунтах.

Перспективно применение солнцеосадкозащитных навесов и на российских железных, в частности на Амуро-Якутской железнодорожной магистрали, в особенности на подходе к р. Лена, где на десятках километров трассы имеются грунты так называемого ледового комплекса мощностью в несколько десятков метров. Такую толщу ни вырезать, ни предварительно оттаять невозможно. Поэтому ее придется предохранять от оттаивания на протяжении всего периода эксплуатации дороги.



Рисунок 4 - Солнцеосадкозащитные навесы на откосах насыпи Цинхай-Тибетской ж.д., август 2006 г.

В 2007 г. было выполнено теплотехническое обоснование применения навесов для предотвращения деградации сильнольдистых многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна строящейся железной дороги Томмот – Кердем на примере пяти участков (трех насыпей высотой по оси пути 3,48; 6,64 и 7,31 м и двух выемок глубиной 2,38 и 5,5 м). Для этих же участков были выполнены теплотехнические расчеты охлаждающего влияния каменной наброски на откосы насыпей и выемок. Сравнение результатов расчетов показало высокую эффективность солнцеосадкозащитных навесов для охлаждения грунтов тела и основания земляного полотна и предотвращения деградации подстилающих многолетнемерзлых грунтов, в особенности в сочетании с доломитовой обсыпкой (покраской) поверхности основной площадки и противофильтрационной пленкой под ней:

• навесы на откосах насыпей и выемок позволяют уменьшить на 10-31%, в среднем на 22,4%, глубину залегания кровли многолетнемерзлых грунтов по оси пути по сравнению с каменной наброской;

• навесы на откосах насыпей и выемок, а также доломитовая обсыпка (покраска) поверхности основной площадки позволяют уменьшить на 25-35%, в среднем на 30,6%, глубину залегания кровли многолетнемерзлых грунтов по оси пути по сравнению с каменной наброской;



Рисунок 5 - Понижение среднегодовой температуры грунтов откосов насыпи с помощью солнцеосадкозащитного навеса [11]

• навесы на откосах насыпей и выемок, а также доломитовая обсыпка (покраска) поверхности основной площадки и противофильтрационная пленка под ней позволяют уменьшить на 28-40%, в среднем на 34,6%, глубину залегания кровли многолетнемерзлых грунтов по оси пути по сравнению с каменной наброской.

В последнем случае охлаждение насыпи и грунтов основания происходит значительно быстрее, чем при каменной наброске. Уже через 5 лет грунты основания и значительной части

тела насыпи оказываются в многолетнемерзлом состоянии, тогда как под каменной наброской и через 5 лет все еще сохраняется талик, а его полное промерзание происходит лишь через 50 лет.

Теплотехнические расчеты для Амуро-Якутской магистрали, как и опытно-экспериментальные исследования на Тибете, позволяют утверждать, что солнцеосадкозащитный навес может стать основным противодеформационным устройством для земляного полотна железных дорог на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов. Положительный эффект применения навеса достигается тем, что под ним создаются возможности интенсивного зимнего охлаждения земляного полотна и его основания и исключаются инфильтрация летних осадков и прямая солнечная радиация. При сохранении высоких прочностных свойств мерзлых грунтов основания на протяжении всего периода эксплуатации дороги отпадает необходимость в дополнительных противодеформационных мероприятиях, упрощается конструкция насыпи, возрастают пропускная способность дороги и увеличиваются межремонтные сроки пути.

Однако эксплуатационная надежность дорог в области распространения вечной мерзлоты предопределяется не только правильностью (обоснованностью) выбора конструктивно-технологических решений и способов производства работ при их сооружении и содержании. Это необходимое, но не достаточное условие. Нужна также постоянная защита дорог, в особенности на участках льдистых грунтов, от разрушающего воздействия инженерно-геокриологических процессов и явлений, иначе невозможно экономически целесообразным путем обеспечить их стабильность и проектные скорости движения. Наиболее эффективно такую защиту можно осуществить лишь в рамках системы инженерно-геокриологического мониторинга дороги, предусматривающей систематический контроль, анализ, оценку и прогноз изменения мерзлотных условий на трассе дорог для своевременного обнаружения, ослабления или подавления нежелательного развития криогенных процессов и явлений. Концепция такой системы мониторинга была разработана для строящегося железнодорожного пути Беркакит – Томмот – Якутск [4], в 2001 г. она была опубликована в Пекине, а затем использована на Цинхай-Тибетской железной дороге.

Таким образом, для обеспечения стабильности железных дорог на участках льдистых многолетнемёрзлых горных пород необходимо:

Установить пространственное положение (в плане и разрезах, а лучше в трехмерном пространстве) льдистых толщ и подземных льдов, их генезис, условия залегания и криогенное строение путем последовательного применения дешифрирования космо- и аэрофотоснимков, геофизических, буровых и др. работ.

Разработать прогноз изменения в дальнейшем мерзлотной обстановки на участках льдистых грунтов и развития в связи с этим неблагоприятных инженерно-геокриологических процессов и явлений. Оценить возможное воздействие их на же6лезнодорожный путь.

Разработать и осуществить противодеформационные мероприятия, эффективные в техническом и экономическом отношениях.

Создать систему инженерно-геокриологического мониторинга пути для постоянного контроля, анализа, оценки и прогноза развитие неблагоприятных процессов и явлений, своевременно предупреждения, ослабления или подавления их.

Список литературы

1. Еленевский В.В. и Низовкин Г.А. Железнодорожное строительство в условиях мерзлоты. М.: Трансжелдориздат, 1936.

2. Кондратьев В.Г. Новые способы укрепления основания железнодорожного земляного полотна на сильнольдистых вечномерзлых грунтах // Ж.-д. транспорт. Сер. «Строительство. Проектирование»: ЭИ/ЦНИИТЭИ МПС. - 1995.- Вып. 1.

3. Кондратьев В.Г. Стабилизация земляного полотна на вечномерзлых грунтах. – Чита: ПолиграфРесурс, 2011.

4. Кондратьев В.Г. и Позин В.А. Концепция системы инженерно-геокриологического мониторинга строящегося железнодорожного пути Беркакит – Томмот – Якутск. – Чита: Забтранс, 2000.

5. Минайлов Г.П. Способы понижения температуры вечномёрзлых грунтов на железных и автомобильных дорогах путём применения каменной наброски. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. М., 2003.

6. Перетрухин Н.А. и Потатуева Т.В. Взаимодействие земляного полотна и вечномерзлых грунтов. – Томск: Изд-во Том.ун-та, 1987.

7. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР, изд. 1. Владивосток, 1927; изд. 2. М., 1937.

8. Яковлев В.Е. Текущее содержание и капитальный ремонт земляного полотна в условиях БАМ ж.д.// Ж.д. транспорт. Сер. «Путь и путевое хозяйство»:ЭИ/ЦНИИТЭИ МПС.-1992.Вып.5-6.

9. Hayley D.W. Maintenance of a railway grade over permafrost in Canada: Proc. 5th Int. Conf. On Permafrost. Vol. 3, 1988.

10. Lin Zhanju, Niu Fujin & Xu Zhiying et al. 2009. Roadbed Diseases and Their Development States along the Qinghai-Tibet Railway. Proceeding of the Eighth International Symposium on Permafrost Engineering. 15-17 October, 2009, Xi'an, Cnina. Pp. 489-501.

11. Niu Fujin, Shen Yongping. Guide of Field Excursion after Asian Conference on Permafrost (Aug. 10-16, 2006). Lanzhou, China, 2006.- 28 p.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СМР НА ОБЪЕКТАХ С СИСТЕМАМИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ

А.А. Гусенков, Н.В. Колдасов

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

На протяжении 20-ти лет ООО НПО «Фундаментстройаркос» (далее - НПО «ФСА») производит и монтирует системы термостабилизации грунтов оснований на объектах промышленного и гражданского строительства в условиях Крайнего Севера. За это время был значительно расширен производственный комплекс, создан проектный институт и научный полигон.

Ежегодное увеличение объемов ввода в эксплуатацию естественно-действующих трубчатых систем «ГЕТ», «ВЕТ» и индивидуальных термостабилизаторов (ТК) вызвало необходимость повысить требования к качеству строительно-монтажных работ.

Для этих целей были разработаны технологические карты и специальные стандарты организации, позволившие конкретизировать участки, на которых требуются повышение контроля качества. К таким участкам относятся сварка, раскладка охлаждающих труб в соответствии с проектной документацией, спецмонтажные работы по запуску систем ГЕТ, ВЕТ.

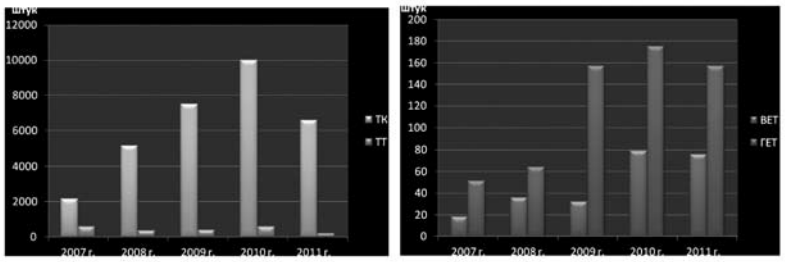


Рисунок 1 - График объемов запуска систем ГЕТ, ВЕТ и монтажа ТК

За последнее десятилетие в строительной отрасли нашей страны произошли ощутимые структурные изменения. Они привели к росту числа научно-изыскательных, проектных и производственных организаций, занимающихся температурной стабилизацией грунтов (по тексту -ТСГ), желающих получить лицензии на осуществление строительства систем ТСГ на различных объектах, а также заказы от государственных, частных и, в том числе, иностранных инвесторов. Возникновение конкурентной среды между специализированными организациями такого рода дает возможность инвесторам выбрать организации, удовлетворяющие его требования.

Для повышения конкурентоспособности и уровня культуры построения хозяйственного механизма внутри организации в 2007 году ООО НПО «Фундаментстройаркос» была разработана и внедрена система менеджмента качества, получен сертификат на соответствие стандартов серии ИСО 9000.

В 2010 г. в рамках аудита успешно пройдена проверка на соответствие требованиям стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2008. Данный шаг позволил предприятию надежно закрепиться на существующих позициях и создать основу для дальнейшего развития, так как

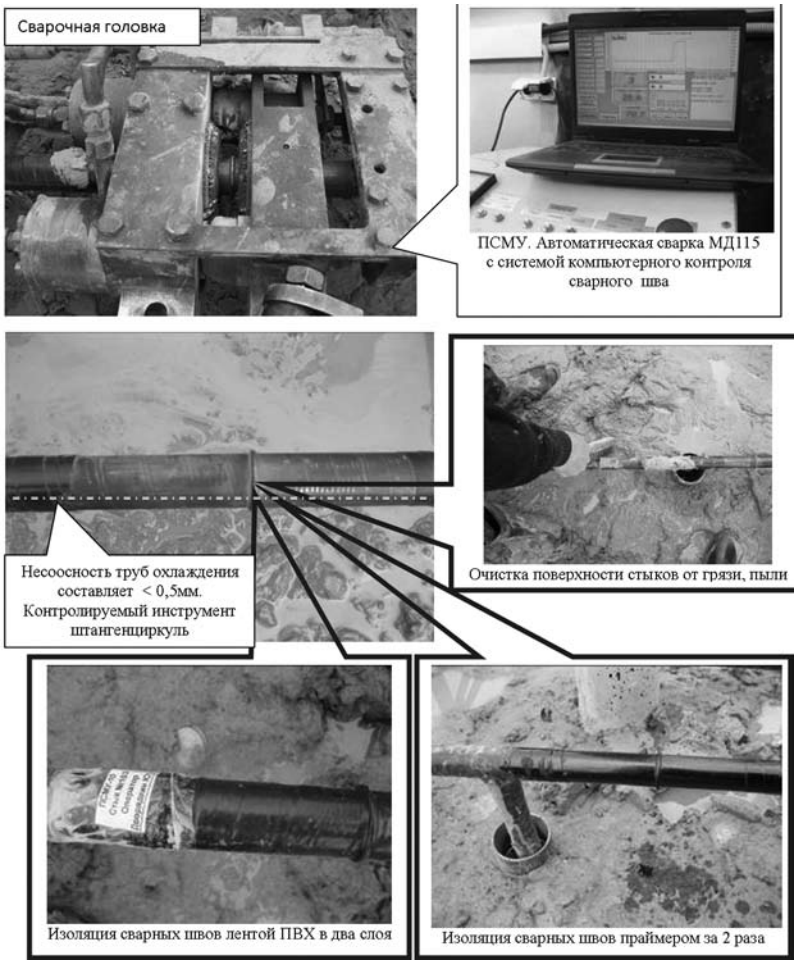


Рисунок 3 – Визуальный контроль гидроизоляции сварных швов охлаждающих труб системы ВЕТ.

основным принципом стандартов серии ISO является постоянное улучшение во всех областях, на которые распространяется система.

В текущем году предприятие прошло сертификацию интегрированных систем менеджмента по моделям ГОСТ Р ИСО 9001-2008/ISO 9001:2008; ГОСТ Р ИСО 14001-2007/ ISO 14001:2004; ГОСТ 12.0.230-2007/OHSAS 18001:2007. Наличие трех сертификатов позволило создать на предприятии «Интегрированную систему менеджмента», что дало дополнительное преимущество перед конкурентами и приблизило ООО НПО «Фундаментстройаркос» к высоким требованиям ведущих Российских и западных компаний. Систематический подход к решению вопросов качества, экологии и охраны труда позволяет обеспечивать наших потребителей высококачественной продукцией с одновременным гарантированным и постоянным улучшением аспектов охраны окружающей среды и безопасности труда работников предприятия и третьих лиц.

В НПО «ФСА» практическим осуществлением мероприятий по созданию и внедрению интегрированных систем менеджмента занимается руководящий и инженерно-технический персонал. В то же время учтена необходимость самостоятельного творческого подхода к созданию систем качества для учета в разрабатываемой документации конкретных задач, условий работы и структуры организации. Только при таком подходе созданная система качества является эффективным средством руководства, управления, обеспечения и улучшения качества строительно-монтажных работ, а также основой для совершенствования всего хозяйственного механизма организации.

Основной задачей НПО «ФСА» в области качества является создание и внедрение таких методов повышения качества СМР, которые позволили бы реализовать политику НПО «ФСА» в области качества, соответствующую требованиям систем стандартов.

В настоящее время все методы повышения качества СМР организации документально оформлены и осуществляются в соответствии с СТО-СМК-02.07.18-2011 «Контроль качества выполнения СМР».

Входной контроль входит в функции инженерно-технических работников СМУ и представителей группы контроля качества СМР, осуществляющих непосредственную приемку.

Пооперационный контроль качества работ выполняет представитель группы контроля качества СМР, с применением инструментальных методов контроля, а также фактическим подтверждением посредством фото- или видеофиксации.

Представитель группы контроля качества СМР контролирует порядок производства работ согласно ФЗ, СП, СНиП, ПСД, ТУ, СТО и технологических карт. Осуществляет контроль ведения исполнительной документации.

При выявлении нарушений и отклонений в работе СМУ на объекте представитель группы





Рисунок 4 – Входной контроль охлаждающих труб на строительной площадке.

контроля качества СМР выдает предписание с перечнем замечаний и отклонений.

При осуществлении работ представитель группы контроля качества СМР регулярно ведет журнал контроля качества СМР, в которым фиксирует все виды работ, выполняемые ежедневно. В журнале контроля качества строительно-монтажных работ инженер группы контроля качества СМР фиксирует характер нарушений и отклонений: отступления от проекта, от действующих норм и технических условий, снижающих качество строительства, а также указываются сроки устранения нарушений.

Ежедневно инженерами группы контроля качества СМР осуществляется контроль выполнения замечаний, ранее внесенных в данный журнал, с обязательной еженедельной передачей данных в виде отчетов руководителю группы. При выявлении грубых нарушений инженер группы контроля качества СМР обязан немедленно сообщить об этом руководству НПО «ФСА».

Запись в Журнале контроля качества СМР о проведенной работе заверяется подписями инженера группы контроля качества СМР и лицом, ответственным за объект по приказу НПО «ФСА». Записи и указания излагаются четко, с необходимыми ссылками на рабочие чертежи, по которым допущены отступления, действующие строительные нормы и правила, государственные стандарты, технические условия, стандарты НПО «ФСА», документация СМК и иные нарушения. Запись выполняется и при отсутствии замечаний.

Приемочный контроль качества выполненных работ осуществляется представителями группы контроля качества СМР после завершения монтажа системы ТСГ, а также после выполнения отдельных работ (промежуточный приемочный контроль) и объекта в целом совместно с ответственным представителем технадзора заказчика.

Испытания проводятся в соответствии с требованиями проекта.

Промежуточному приемочному контролю подлежат результаты всех видов работ, которые имеют в проектной и технологической документации требования к качеству и критерию качества, а именно:

- плановое и высотное положение элементов систем ТСГ и элементов мониторинга;

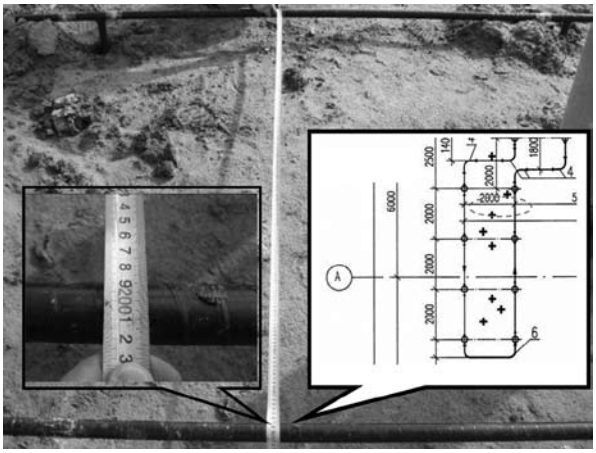


Рисунок 5 - ГП - 6, ДКС 6. Медвежьего ГКМ. Цех компрессорный Агрегат №1. Проверка размеров в плане между горизонтальными соединительными трубами системы ВЕТ.

- результаты работ, которые относятся к скрытым(качество сварки, качество трубной изоляции и теплоизоляции).

Представитель группы контроля качества СМР совместно с представителем заказчика вправе проверить также соответствие технических характеристик используемых при строительстве материалов, изделий и оборудования требуемым.

Результаты приемочного контроля качества оформляются исполнительной документацией, содержащей фактические данные о качестве, а также актами приемки по принятой в нормативных документах форме. Представители технадзора заказчика и группы контроля качества СМР могут перед тем, как подписать акт приемки, проверить достоверность исполнительной документации.

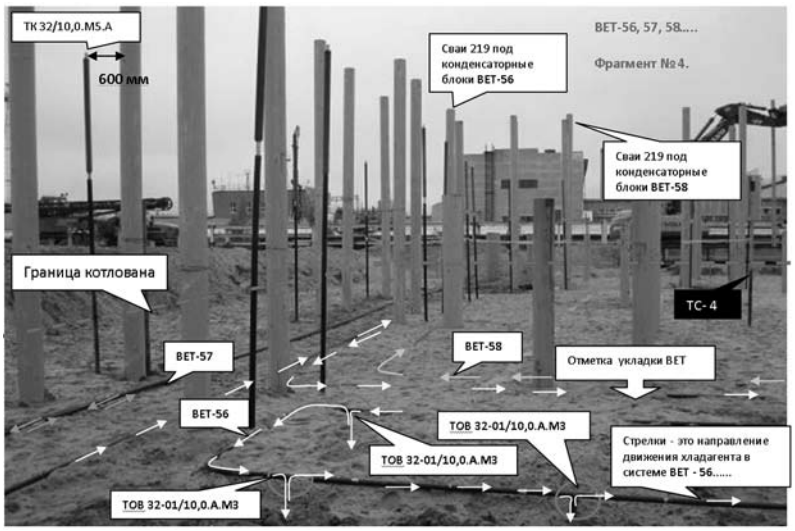


Рисунок 6 - ГП - 6, ДКС 6. Медвежьего ГКМ. Цех компрессорный Агрегат №1. Пооперационный контроль произведенных работ по монтажу ТСГ посредством фотофиксации.

Результаты работы группы контроля качества СМР документируются и анализируются руководителем группы на предмет необходимости и целесообразности внесения изменений в рабочую документацию. Изменения вносятся в соответствии с требованиями ГОСТ Р 21.1101-2009 Стандартизация в Российской Федерации. Основные требования к проектной и рабочей документации. Прописываются корректирующие и предупреждающие действия, согласно СТО-СМК-02.08.05-2010 Стандарт организации. Управление корректирующими действиями и СТО-СМК-02.08.04-2010 Стандарт организации. Управ-

ление предупреждающими действиями.

Особое место при выполнении ООО НПО «Фундаментстройаркос» договорных обязательств по монтажу систем ТСГ занимает **усовершенствование методов контроля качества** строительно-монтажных работ, которое определяется соответствием показателей СМР требованиям проекта и нормативной документации.

В процессе документальной и технической подготовки строительного производства проводятся следующие мероприятия, способствующие повышению качества ведения СМР:

- изучение проектной документации и принятие решений по совершенствованию организации работ, по внедрению прогрессивной технологии, накопленного опыта, рациональному составу механизмов, инструмента и приспособлений;



Рисунок 7 - Ванкорское месторождение. ОБП ЦТОиРТ. Производственно-бытовой корпус. Приемочный контроль качества смонтированных систем ТСГ.

- обеспечение строительства нормативной документацией, проектами производства работ, технологическими картами или технологическими схемами на весь комплекс выполняемых работ;

- постоянное ведение и хранение записей по СМК (журналов, таблиц, актов, предписаний, отчетов и т. п.);

- анализ деятельности как строительно-монтажного управления, так и группы контроля качества;

- ежегодная актуализация документации;

- разработка и внедрение новых, или внесение изменений в существующие стандарты организации и другую документацию системы менеджмента качества, описывающие новые методы повышения качества СМР;

- расчеты результативности и постоянное повышением эффективности деятельности представителей группы контроля качества.

В процессе материально-технического обеспечения строительства осуществляются мероприятия, положительно влияющие на качество строительных работ, а именно:

- своевременная и комплектная поставка изделий, материалов, необходимых для строительства;

- организация проверки качества поставляемых изделий и материалов, оборудования;

- обеспечение нормативного качества изделий, изготавливаемых на производственном комплексе ООО НПО «Фундаментстройаркос».

При комплектовании бригад строительно-монтажного управления квалифицированными кадрами учитываются следующие требования:

- квалификация специалистов должна соответствовать технической сложности выполняемых работ, а программы подготовки и повышения квалификации специалистов должны предусматривать изучение методов повышения качества СМР, в том числе прогрессивной технологии, новых механизмов, инструмента и приспособлений;

- должен проводиться анализ характерных дефектов, допускаемых при выполнении работ и принятие мер по их предотвращению.

На предприятии создаются условия для качественного выполнения СМР, основанные на реальном планировании, что позволяет:

- ритмично выполнять строительно-монтажные работы;

-обеспечивать удовлетворительными бытовыми условиями на объектах,

- снижать текучесть кадров;

-эффективно применять системы материального стимулирования;

- повышать качество строительно-монтажных работ.

Высококачественные строительно-монтажные работы не допускают необоснованной экономии на необходимых статьях расходов и для того, чтобы не тратить лишних средств, для них составляется качественная сметная документация и грамотно организуется процесс снабжения строительства стройматериалами.

Для соблюдения всех этих сложных и ответственных требований НПО «ФСА» имеет в своем штате только профессиональных и компетентных сотрудников: строителей и монтажников, сметчиков и инженеров, специалистов с достаточной квалификацией и умением ориентироваться в современных особенностях ведения строительно-монтажных работ, применении новых технологий и материалов.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛОЩАДКАХ В УСЛОВИЯХ ЗАПОЛЯРНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В.Н. Матковский, Е.А. Пульников, Д.В. Лукин, О.Г. Кистанов

ООО «Газпром добыча Ямбург» Филиал ИТЦ, Заполярное месторождение.
v_matkovskiy@ygd.gazprom.ru, e_pulnikov@ygd.gazprom.ru

Представлены результаты семилетнего ряда ежемесячных геотемпературных наблюдений, характеризующие развитие температурного режима грунтов в основании разных типов инженерных сооружений Заполярного месторождения при современных колебаниях климата.

Стандартная схема производства режимных геотемпературных наблюдений при выполнении геотехнического мониторинга (весна, осень) позволяет дать оценку состояния грунтовых оснований на момент производства геотемпературной съемки, но в условиях развивающихся климатических колебаний недостаточен для своевременного выявления и прослеживания тенденции развития теплового состояния грунтов в многолетнем цикле. По предложению Заполярной лаборатории мерзлоты, с 2004 года на крупных промышленных площадках газодобывающего комплекса Заполярного месторождения были организованы ежемесячные геотемпературные наблюдения в фоновых скважинах, позволившие выявить закономерности формирования ряда важных параметров, характеризующих температурный режим грунтов в основании разных типов инженерных сооружений.

За методологическую основу выбора мест проведения наблюдений в фоновых термоскважинах на промышленной площадке принят принцип, аналогичный выбору ключевых участков при производстве мерзлотной съемки территорий. Получаемая геотемпературная информация должна характеризовать развитие температурного режима грунтов основания в различных, наиболее распространенных типовых условиях теплообмена с определенным набором природных и техногенных факторов. Для этой цели, с дублированием, было выбрано 28 наблюдательных термоскважин.

По результатам измерений, по непрерывной временной шкале, строятся графики термоизоплет, отражающие ход распространения зимних и летних теплооборотов в грунтовых основаниях различных типов инженерных сооружений в зависимости от условий теплообмена на поверхности основания и влияния средств термостабилизации грунтов (СПМГ). Контрольным параметром геотемпературного режима принято среднее значение температуры в интервале глубины от 2,0 до 10,0 м., являющийся, как правило, проектным расчетным параметром.

Анализ результатов исследований по фоновым скважинам показал, что по характеру формирования температурного режима можно выделить два основных типа грунтовых оснований:

1. Грунтовые основания инженерных сооружений площадочного типа с проветриваемым подпольем. Условия теплообмена характеризуются отсутствием снежного покрова и наличием постоянного теневого пятна.
2. Грунтовые основания с различной степенью снегонакопления на их поверхности. Условия теплообмена определяются мощностью снежного покрова на грунтовом основании и возможностью очистки прилегающей к инженерному сооружению территории от снега.

Пример развития температурного режима грунтового основания зданий, сооружений с проветриваемым подпольем, по периметру оборудованных СПМГ приведен в приложении 1.

Условия теплообмена на поверхности грунтовых оснований данного типа сооружений являются самыми оптимальными для ежегодного максимального охлаждения грунтов основания, обеспечивающего высокую эксплуатационную надежность инженерных сооружений. Решающим фактором в формировании теплового состояния грунтового основания является температура воздуха.

Минимальные значения средней температуры грунтов в рабочем интервале свайного фундамента формируются в марте-апреле месяце, чаще в апреле, и составляют, в зависимости от особенности зимнего сезона, минус 7 – минус 10 оС. Своих максимальных значений (минус 2,5 – минус 3,5 оС) средняя температура грунтов достигает в ноябре месяце. В основаниях такого типа сооружений, в соответствии с колебаниями температуры воздуха за семилетний ряд наблюдений, деградационных процессов не отмечено. На данном этапе наблюдений, потенциал по аккумуляцию холода в грунтах не исчерпан. Эксплуатационная надежность оснований и фундаментов данных типов сооружений очень высокая, с дополнительным запасом холода в грунтах.

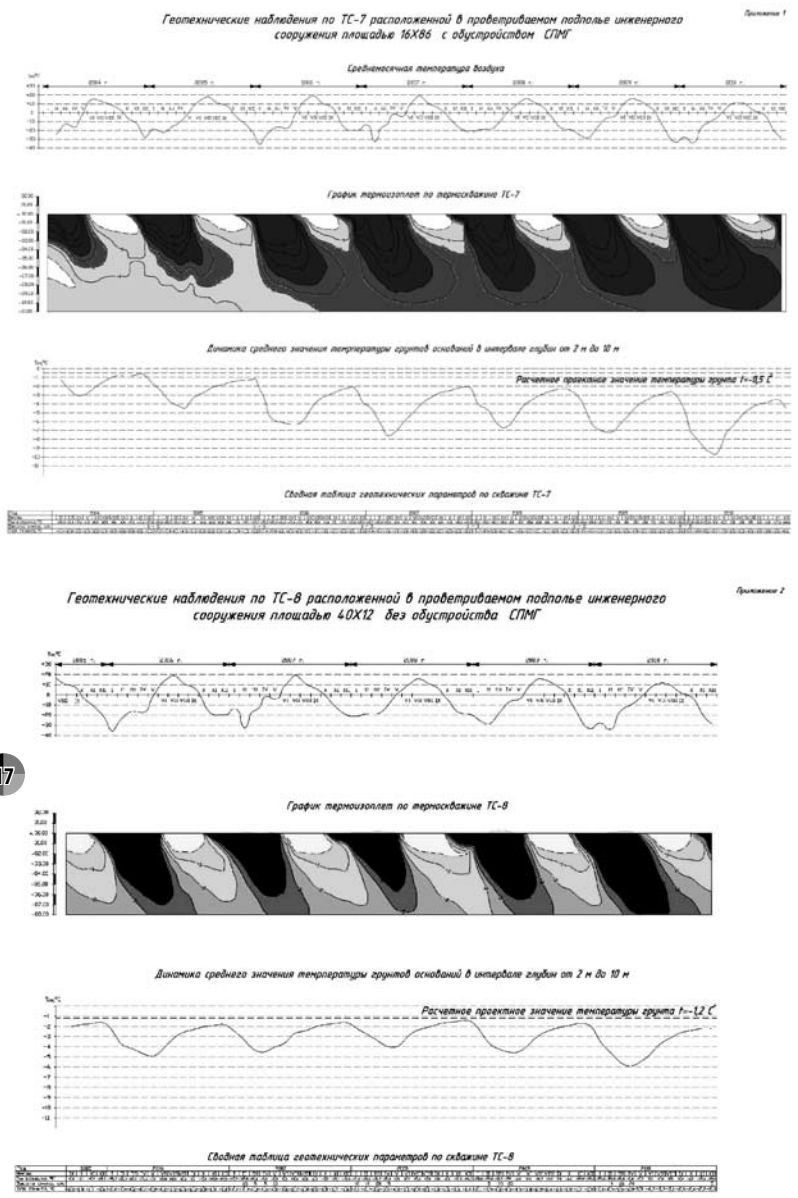
Пример динамики теплового состояния основания зданий, сооружений с проветриваемым подпольем без дополнительных средств термостабилизации приведен в приложении 2.

Температурный режим грунтов основания таких сооружений характеризуется менее амплитудными сезонными колебаниями. Минимальные значения средней температуры грунтов составляют минус 4 – минус 6 оС. Их формирование приходится на апрель-май месяцы. Своего максимума

температурный параметр достигает в ноябре-декабре месяцах со значениями минус 1,5 – минус 2,0°С. Зимние и летние теплообороты распространяются на геотемпературном фоне минус 2,0 – 3,0°С.

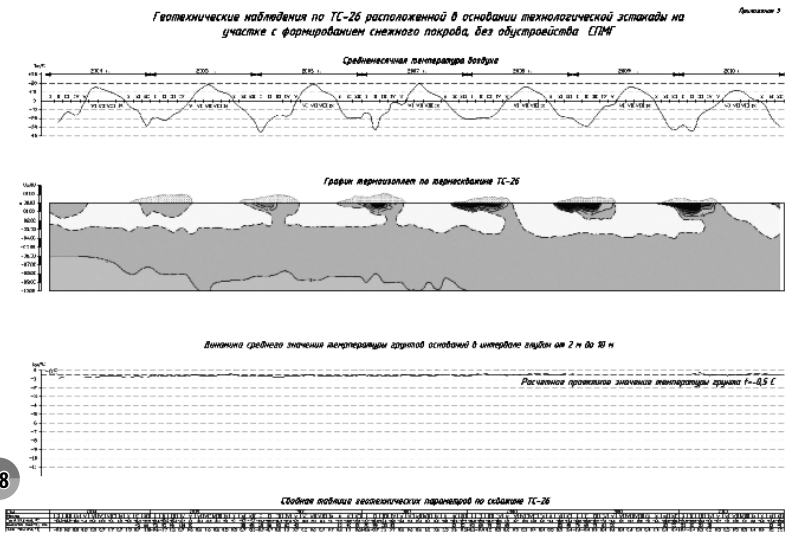
Геотемпературный режим за период наблюдений характеризуется как стабильно удовлетворительный. С начала эксплуатации (2000 г.) грунтовые основания никогда не переходили в состояние параметрического отказа – контролируемый температурный параметр не превышал расчетного значения.

Инженерные сооружения с возможностью формирования снежного покрова на поверхности грунтового основания. К таким сооружениям относятся: мачты; эстакады инженерных и технологических сетей; открытые площадки, с установленным оборудованием различного типа (подогревателей газа, емкостей, дизельных электростанций) и другие. Решающим фактором в формировании температурного режима грунтового основания таких сооружений является характер снегонакопления на его поверхности. Чем больше накапливается снега на поверхности основания, тем менее выражена на графике сезонная динамика среднего значения температуры грунтов. При мощности снежного покрова более 0,5 метра график принимает форму прямой линии (приложение 3). Это значит, что большая часть зимних теплооборотов экранируется, и грунтовое основание ежегодно испытывает дефицит охлаждения. На участках, где невозможно выполнять снегоуборочные работы механическим способом непосредственно в основании сооружений или на прилегающей к ним территориях, до 2009 года включительно, развивался слабовыраженный процесс деградации мерзлоты. Только благоприятные погодно-климатические условия зимнего сезона 2009/10 позволили временно стабилизировать геотемпературную обстановку. На таких участках, из-за отсутствия ежегодного охлаждения, грунтовое основание может переходить в состояние параметрического отказа.



С уменьшением мощности снежного покрова на поверхности грунтового основания, выполнением регулярной зачистки смежной к сооружению территории от снега, применением систем термостабилизации грунтов, динамика контрольного геотемпературного параметра приобретает выраженныйамплитудныйхарактер (приложение 4). В зависимости от условий теплообмена на поверхности грунтовых оснований, погодно-климатических особенностей зимних периодов, наличия СПМГ сезонные колебания среднего значения температуры грунтов варьируют в широком диапазоне от 1 до 5°С. Грунтовые основания ежегодно в зимний период получают порцию холода, необходимую для поддержания проектного температурного режима грунтов. В соответствии с колебаниями температуры воздуха, начиная с зимнего сезона 2008/09 года, на графике выражен тренд понижения среднего значения температуры грунтов.

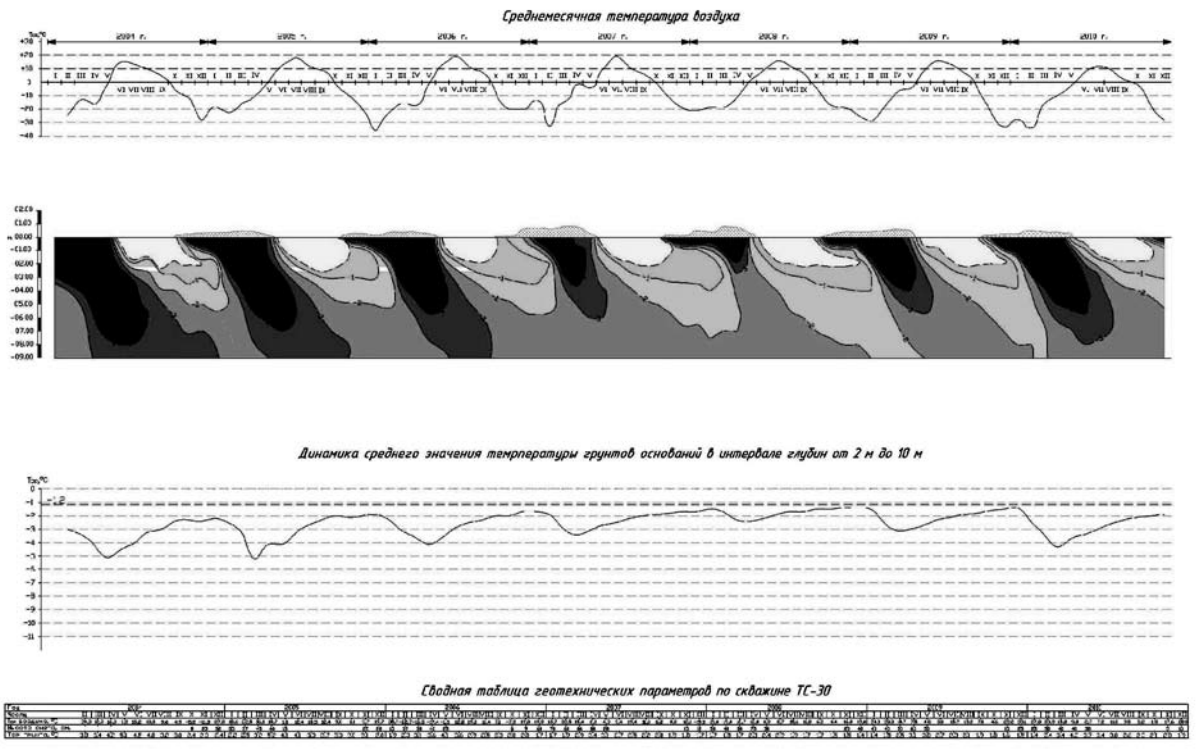
Таким образом, с точки зрения определения направленности динамики температурного режима грунтов, по результатам семилетнего ряда геотемпературных наблюдений по фоновым скважинам установлено что для региона Заполярного месторождения однонаправленных деграда-



ционных процессов в грунтах оснований зданий и сооружений промышленных площадок, вызванных современными колебаниями температуры воздуха, на данном этапе наблюдений не отмечено. Процесс деградации мерзлоты может развиваться при ежегодном снегонакоплении мощностью более 0,5 метра.

Приложение 4

Геотехнические наблюдения по ТС-30 расположенной в основании технологической эстакады на участке с формированием снежного покрова, без обустройства СПМГ, На расстоянии в 1,5 метра от зачищаемого проезда



ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ НАСЫПИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА УЧАСТКЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОРОД ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА

С.П. Варламов, П.Н.Скрябин

Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН, г.Якутск
e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

Строящаяся железнодорожная линия Томмот-Кердем на 692-734 км пересекает участок распространения пород ледового комплекса. Освещены особенности организации наблюдательной сети инженерно-геокриологического мониторинга, включающего наблюдения за динамикой просадки, температуры и глубины протаивания грунтов, начиная со времени вырубки просеки трассы и отсыпки насыпи. Результаты исследований показали, что это наиболее сложный для строительства и эксплуатации железной дороги участок, который запроектирован по I принципу. На просеке трассы глубина сезонного протаивания продолжает увеличиваться, а температура верхних горизонтов мерзлых пород повышаться. На насыпи, отсыпанной в холодный период, установлено поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород, при этом, чем выше высота насыпи, тем интенсивнее скорость ее поднятия. При отсыпке насыпи в теплый период с удалением сезонноталого слоя в её основания отмечено формирование чаши протаивания. Геокриологические обследования выявили участки фильтрации надмерзлотных вод сезонноталого слоя через песчаную насыпь и угрожающие её устойчивости. Предложены мероприятия обеспечивающие устойчивость земляного полотна. Оценка изменений теплового состояния насыпей и прилегающей к ней территории успешно может быть решена на основе геокриологического мониторинга.

Введение

Железнодорожная линия Томмот-Кердем на 692-734 км пересекает участок распространения пород ледового комплекса, где льдистость достигает 0,7-0,8 дол. ед. Институт мерзлотоведения СО РАН с 2005 года проводит на этом участке экспериментальные исследования за тепловым состоянием грунтов основания насыпи и прилегающей к трассе территории. Это наиболее сложный для строительства и эксплуатации железной дороги участок. По П.А.Соловьеву [1] ледовый комплекс представляет особый горизонт, насыщенный жилами льда, более или менее единый и плащевидно залегающий на обширных участках, неоднородный по возрасту, составу, генезису и мощности.

Проблемы «ледового комплекса» рассматривались на научно-техническом совете и семинаре-совещании, проведенных в г.Якутске [2 и 3]. По итогам обсуждений ОАО «Проекттрансстрой» принял решение организовать систему инженерно-геокриологического мониторинга на стадии строительства и эксплуатации железной дороги на этом участке. После начальных 2-3 лет эксплуатации железной дороги предусматривается проектирование дополнительных мероприятий, обеспечивающих устойчивость земляного полотна.

Результаты исследований на экспериментальном полигоне

В 2005 г. были организованы исследования на экспериментальном полигоне на участке развития ледового комплекса, где льдистые грунты и повторно-жильные льды залегают на глубинах всего 0,6-1,2 и 1,8-2,3 м соответственно от поверхности. По льдистости и просадочности они относятся к IV и V категориям типа грунтов. В центральной части полигона были удалены лесорастительный и напочвенный покровы. Периферийный участок полигона с удаленным древостоем представлял аналог просеки (рис. 1).

Просадка грунтов на поверхности с удалением напочвенного (мощность 0,1-0,2 м) и лесорастительного покровов в 2010-2011 г.г. составила в среднем 29 см. На поверхности с удалением древостоя, начиная с 2008 г. просадка стабилизировалась на уровне 15 см (рис. 2).

Величина чаши оттаивания в грунтах на участке с удаленными напочвенным и лесорастительным покровами в четвертом году достигла своего максимума (рис. 3а). По сравнению с мощностью сезонноталого слоя в лесу она увеличилась в среднем в 2,8 раза. Процесс стабилизации многолетнего протаивания пород ледового комплекса обусловлен интенсивным произрастанием травяного покрова (см. рис. 1). На участке с удалением древостоя глубина оттаивания грунтов незначительная и на 3-ий год составила 1,60 м. Далее отмечается тенденция к уменьшению мощности сезонноталого слоя. В 2009 г. тем-



Рисунок 1 - Общий вид экспериментального полигона.

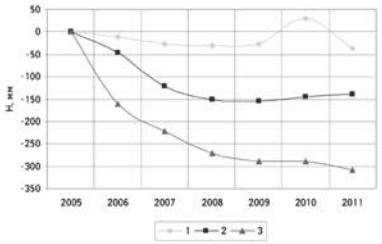


Рисунок 2 - Деформация поверхности экспериментальной площадки в районе ПК 6940: 1 – естественная поверхность; 2 – поверхность с удалением лесорастительного покрова; 3 – поверхность с удалением напочвенного и лесорастительного покровов.

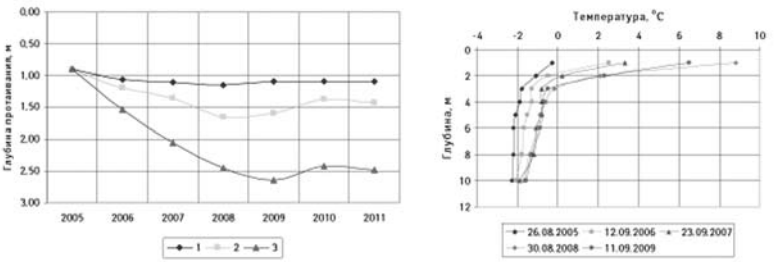


Рисунок 3 - Изменения мощности сезонного протаивания (а) и температуры (б) грунтов на экспериментальном полигоне.
1 - поверхность с естественной растительностью; 2 – поверхность с удалением лесорастительного покрова (вырубка); 3 – поверхность с удаленным напочвенным и лесорастительным покровами.

пература грунтов на участке с удаленным напочвенным и лесорастительным покровами в конце теплого периода на глубинах 4, 6 и 10 м по сравнению с 2005 г. соответственно повысилась на 1,2, 1,3 и 0,7 оС. Заметное повышение температуры грунтов происходило в сезоннопротаивающем слое (рис. 3б). В теплые и многоснежные зимние периоды последних четырех лет промерзающий слой не смыкался с многолетнемерзлыми грунтами.

Организация наблюдательной сети инженерно-геокриологического мониторинга и особенности строительства земляного полотна

Для проведения инженерно-геокриологического мониторинга в системе железнодорожное полотно – окружающая среда в 2007-2010 г.г. были оборудованы 7 поперечных профилей в районе пикетов: 6926, 6932, 6934, 7087, 7088, 7089, 7179. Бурение скважин и их оборудование для режимных температурных наблюдений под основания земляного полотна были проведены после вырубки просек трассы и до начала их отсыпки (рис. 4), в районе ПК 7179 - после возведения нулевой насыпи, а на окружающей территории (просека, лес) во время возведения насыпи. Всего пробурена и оборудована 41 скважина. После укладки шпалорельсов на земляное полотно были установлены стационарные марки для наблюдения за деформацией его поверхности. В таблице 1 приведены сроки начала-окончания вырубки просек трассы, отсыпки земляного полотна и укладки шпалорельсов. Следует



Рисунок 4
Бурение термометрических скважин и укладка полипропиленовых труб для отвода косы термогирлянд из зоны влияния железнодорожных насыпей в районе ПК 6934 (август 2007 г.).

Таблица. Сроки начала-окончания вырубки просек трассы, отсыпки земляного полотна и укладки шпалорельсов.

Пикеты	Сроки				
	Вырубка просек трассы		Возведение насыпи		Укладка шпалорельсов
	Начало	Окончание	Начало	Окончание	
6926	-	-	Апрель 2009	Июль 2010	Август 2010
6932	Зима 2006	Весна 2007	Январь-февраль 2009	Июнь 2010	
6934			Март-апрель 2009		
7087	Зима 2008	Весна 2008	Август-сентябрь 2009		Сентябрь 2010
7088			Август 2009		
7089			Сентябрь 2009		
7175	Весна 2007	Весна 2008	Июнь-июль 2009		
7179					
7270	Зима 2008	Весна 2008			

отметить, что процессы отсыпки насыпи были произведены круглогодично (рис. 5).

В январе-феврале 2009 г. на поперечнике ПК 6932 была начата отсыпка насыпи с укладкой на глубине 1,0-1,5 м теплоизоляционного материала из пенополистирола толщиной 5 см. Высота насыпи составляла 1,0-1,5 м. На поперечнике ПК 6934 отсыпка насыпи высотой 1-4 м произведена в марте-апреле, а на поперечнике ПК 6926 в конце холодного периода. В конце летнего периода 2009 г. на поперечнике ПК 7088 была частично отсыпана насыпь высотой до 1 м, а на поперечнике ПК 7087 была начата выемка грунта сезонно-талого слоя с последующей заменой его скальными грунтами. На участке поперечника ПК 7179 отсыпка насыпи в 2009 г. была произведена в летний период с заменой грунта сезонноталого слоя скальными грунтами.

В итоге в августе-сентябре 2010 г. на поперечниках ПК 6926 и 6934 строителями сооружены из скального грунта насыпи высотой 7 м, в первом на бермах с установкой сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ) до глубины 4 м. На поперечнике ПК 6932 выполнена отсыпка насыпи высотой до 2,5 м. Здесь на бермах установлены СОУ, в телах бермы и насыпи уложены теплоизоляционные материалы из пенополистирола. На поперечнике ПК 7087 отсыпана насыпь высотой 2,5 м с субвертикальными охлаждающими откосами из скального грунта. На поперечнике ПК 7088 на



Рисунок 5 - Отсыпка насыпи на выемках трассы в районе 732 км в апреле (а) и 711 км в августе (б) 2009 г.

откосах с консольным навесом высота насыпи составляла 2,5-3,0 метра. На поперечнике ПК 7089 отсыпана насыпь высотой до 2,5 м с укладкой пенополистирола в его основании и установкой СОУ на бермах. На поперечнике ПК 7179 сооружена нулевая насыпь из скального грунта мощностью 2,2 м с заменой грунта сезоннопротаивающего слоя.

Тепловое состояние грунтов оснований сооружаемых насыпей

Результаты экспериментальных наблюдений показали, что на просеке железной дороги глубина сезонного протаивания грунтов на третий год (2009 г.) после вырубки леса увеличилась по сравнению с естественным фоном (лес) в 1,5-1,7 раза, что намного больше, чем на экспериментальном полигоне на этот срок. Это объясняется тем, что просека трассы железной дороги отличается от экспериментального полигона большей открытостью и соответственно наибольшим приходом солнечной радиации. В 2011 г. на просеке отмечено дальнейшее увеличение глубины сезонного протаивания грунтов (1,4-2,2 раза), а также и в лесу (перемычка между просекой железной дороги и притрассовой автодороги). Последнее связано с изменением условий теплообмена поверхности с атмосферой, т.е. уменьшением затененности, т.к. перемычка имеет небольшую ширину. На маревых участках увеличение глубины сезонного протаивания грунтов в естественных условиях в 2011 г., по сравнению с 2007 г. составило 16-22%, а у основании насыпей – 32-52%.

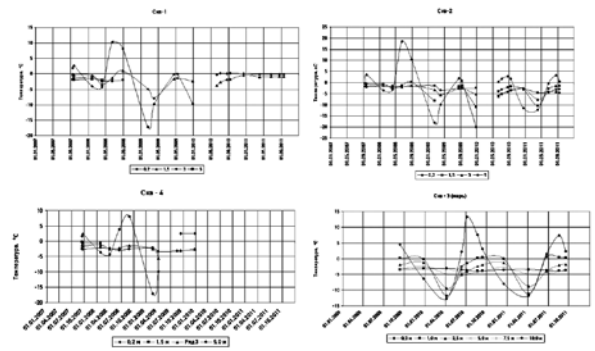


Рисунок 6 - Динамика температуры грунтов основания насыпи в районе пикета 6926 по оси трассы (Скв-1), под правым (Скв-2) и левым (Скв-4) бермами и на мари в естественных условиях (Скв-3).

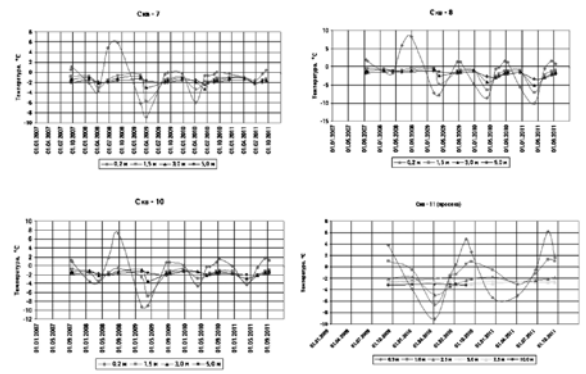


Рисунок 7 - Динамика температуры грунтов основания насыпи в районе пикета 6932 по оси трассы (Скв-7), под правым (Скв-8) и левым (Скв-10) бермами и на просеке (Скв-11).

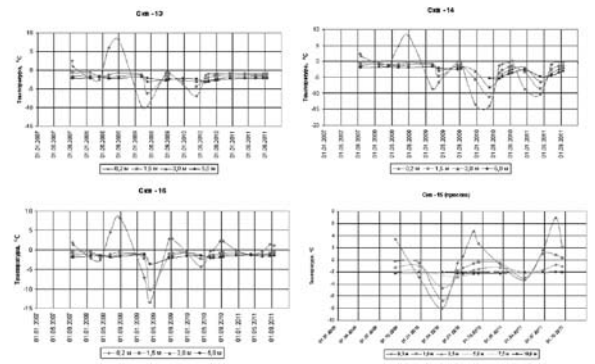


Рисунок 8 - Динамика температуры грунтов основания насыпи в районе пикета 6934 по оси трассы (Скв-13), под правым (Скв-14) и левым (Скв-16) основаниями его откосов и на просеке (Скв-15).

На мари (ПК 6926) в зиму 2007/2008 гг. до отсыпки насыпи грунты на глубинах 0,2 и 1,5 м охладились соответственно на 6,6-6,9 и 2,1-3,1°С. Здесь охлаждающее влияние низкой насыпи, высотой 1,5-2,0 м зимой 2008/2009 гг. заметно понижает температуру грунтов основания насыпи. Так на отметках 0,2 и 1,5 м под насыпью температура грунтов понижается соответственно до -17,2 и -7,9°С (рис. 6). К осени 2009 г. верхняя граница многолетнемерзлых пород оказалась приподнятой под осью трассы на 1,0-1,2 м, а под откосами бермы на 0,5 м. В сентябре 2010 г. температура грунтов под основания насыпи на этих отметках составила соответственно 0,2 и –1,7°С. К концу теплого периода 2010 г. после возведения 7 метровой насыпи под ним ещё остается маломощный (0,3-0,5 м) талый слой. Этот интенсивный охлаждающий эффект на первый год, по-видимому, объясняется отсыпкой насыпи в зимнее время на мерзлый грунт, а потеря этого эффекта на второй год – отепляющим влиянием тела высокой насыпи на подстилающие грунты в летний период.

На просеке трассы ПК 6932 и 6934 в зиму 2007/2008 гг. понижение температуры грунтов до отсыпки насыпи на глубинах 0,2 и 1,5 м достигла соответственно величины 3,3-4,9; 0,6-2,6 и 3,1-3,8; 0,7-1,3°С (рис. 7 и 8). Здесь слабая интенсивность накопления холода грунтами, по сравнению с маревым участкам (ПК 6926), объясняется более поздними сроками смыкания фазовых границ, из-за увеличения мощности сезонноталого слоя после вырубки леса. В зиму 2008/2009 гг. после отсыпки насыпи грунты за-

метно начали аккумулировать холод до глубины 4-5 м. Температура грунтов основания насыпи на отметках 0,2; 1,5 и 3,0 м на этих пикетах понизились соответственно на 14,5-21,6; 4,3-9,7 и 1,4-6,1 оС.

В районе ПК 6932 после отсыпки насыпи грунты её основания заметно охладились. К концу летнего периода 2009 г. верхняя граница многолетнемерзлых пород на оси трассы была приподнята на 1 м, а под откосами бермы заметно меньше (0,5 м). В зиму 2009/2010 гг. грунты под основаниями насыпи охладились по-разному. Так, на отметке 0,2 м температура грунтов достигала по оси трассы -6°С, под откосами правой бермы -8,5°С и левой бермы -4,5°С. Это, по-видимому, объясняется накоплением надмерзлотных вод сезонноталого слоя у левой бермы и, соответственно, большей потерей тепла на фазовые переходы. На следующий летний сезон под осью трассы и под откосами берм верхняя граница многолетнемерзлых пород сохранилась на уровне предыдущего сезона. Следует отметить, что под влиянием вышеперечисленного фактора под откосами левой бермы температура грунтов на отметке 0,2 м имеет тенденцию к повышению, т.е. от 0,7°С (2009 г.) до 1,9°С (2011 г.).

В районе ПК 6934 процесс формирования термического режима грунтов основания насыпи происходит иначе, чем на ПК 6932. Здесь грунты сезонноталого слоя находятся в более переувлажненых условиях, т.к. находятся в отличие последних на более низких гипсометрических отметках с относительно большими уклонами. Под влиянием этих факторов амплитуды колебаний температуры грунтов в холодный и теплый периоды были наибольшими. На оси трассы после отсыпки насыпи высотой 3-4 м грунты её основания в зимний период заметно охладились и к концу летнего периода 2009 г. верхняя граница многолетнемерзлых пород на оси трассы была приподнята более 1 м, под правым нижним откосам насыпи примерно на 1 м, а под левым откосам - меньше 0,5 м. На оси трассы грунты основания насыпи на отметке 0,2 м в первый зимний сезон охладились до -10, а во второй сезон всего до –7°С. Это связано с тем, что грунты тела насыпи уже начали промораживаться снизу, а отсыпка насыпи достигла проектного уровня (7 м), поэтому амплитуда колебания температур уменьшилась. Температура грунтов основания насыпи на этой отметке на правой нижней части откосов насыпи в первый зимний сезон охладилась до – 9°С, а во второй сезон до – 15°С. Здесь наблюдается более интенсивное охлаждение грунтов основания насыпи, чем на оси трассы. Грунты основания насыпи в левой нижней части её откоса, наоборот, в первый зимний сезон сильно охладились до – 13 оС, а во второй заметно меньше (-4,5°С). Это связано с накоплением надмерзлотных вод сезонноталого слоя у основания насыпи и потерей запаса холода на фазовые переходы при промерзании грунтов этого слоя, как и в районе ПК 6932.

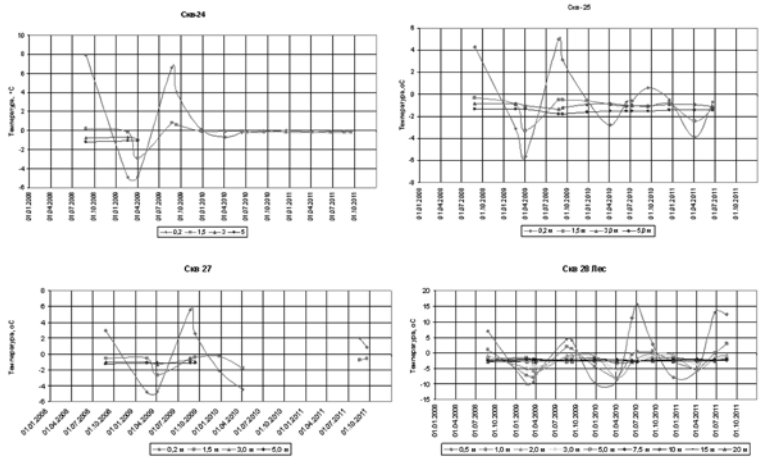


Рисунок 9 - Динамика температуры грунтов основания насыпи в районе пикета 7088 по оси трассы (Скв-24), под правым (Скв-25) и левым (Скв-27) откосами насыпи со консольными деревянными навесами и в лесу в естественных условиях (Скв-28).

В районе ПК 7088 отсыпка насыпи высотой 2,5 м произведена в конце августа 2009 г., поэтому температуры грунтов основания ее по оси трассы на глубине 0,2 м к концу августа и началу сентября были высокими и соответственно равны 6,5 и 4,3 оС. Зимой 2009/2010 гг. грунты основания насыпи на глубине 1,5 м почти не охладились (-0,1°С), а на глубине 0,2 м понижение температуры составило всего до -0,7°С. Следовательно, при промерзании не происходило смыкания с многолетнемерзлыми грун-

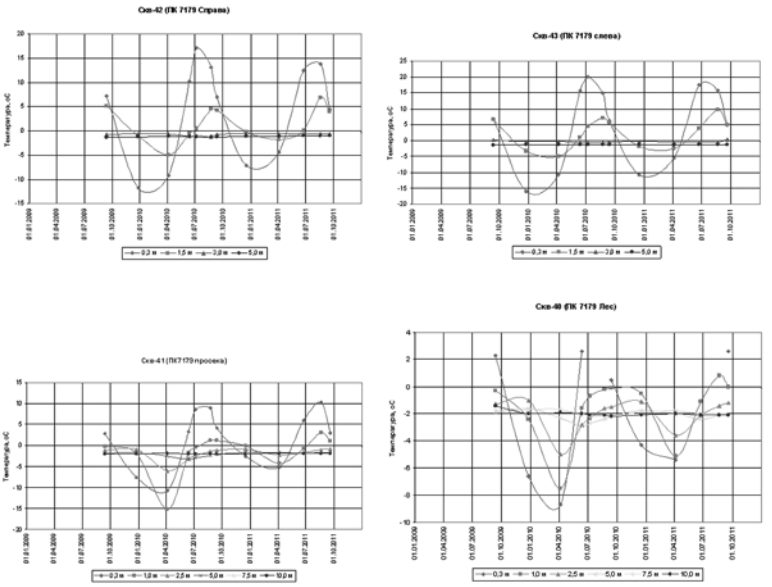


Рисунок 10 - Динамика температуры тела насыпи и грунтов её основания (Скв-42, Скв-43), на просеке (Скв-41) и в лесу (Скв-40) в районе пикета 7179.

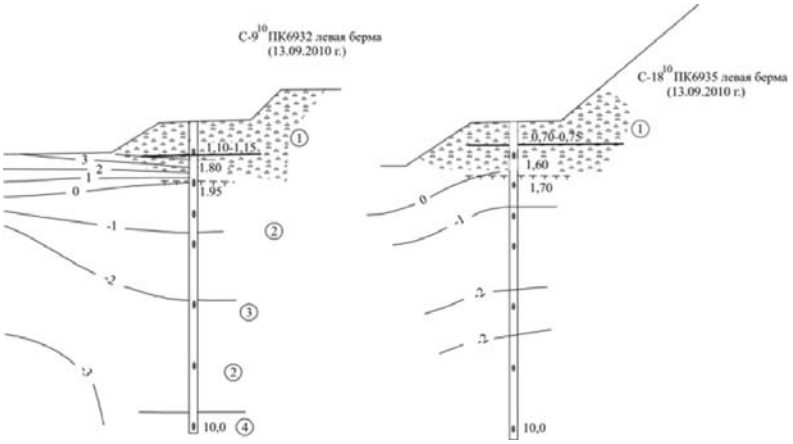


Рисунок 11 - Изменение глубины протаивания и температуры грунтов основания берм при укладке теплоизоляционного материала на разных глубинах в районе ПК 6932 и 6935.

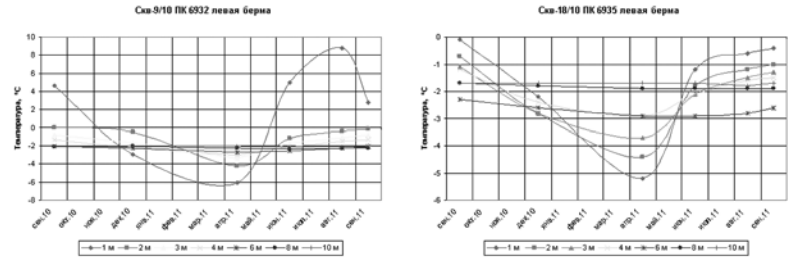


Рисунок 12 - Динамика температуры тела бермы и грунтов её основания на 0,5 м (Скв-18/10) и 1,3 м от сезонноохлаждающих устройств (Скв-9/10).

тами. В летний сезон 2011 г. температура грунтов основания насыпи по оси трассы в 1,5 метровом слое не отпускалась ниже -0,2°С.

В районе пикета 7179 бурение и оборудование термических скважин произведено в конце августа 2009 г. после возведения земляного полотна с выемкой грунтов сезонно-протаивающего слоя. При бурении глубина протаивания от поверхности насыпи составляла 2,5-3,0 м при мощности скального грунта 2,2 м. Итак, здесь искусственно создана чаша протаивания грунтов в основании насыпи. Это подтверждают и температурные данные. Так, в зимний сезон в теле насыпи на глубине 1,5 м температура понижается до -5,0°С, а в летний сезон она повышается до 4,3-7,1°С (рис. 10), и грунты на глубине 5 м остаются стабильно высокотемпературными (-1,1...-1,3°С). По расчётам нулевая изотерма находилась глубже 2 м и, по видимому, здесь промерзающий слой не смыкается с многолетнемерзлыми породами.

На участке распространения пород ледового комплекса при возведении земляного полотна широко использовался теплоизоляционный материал из пенополистирола. В августе 2010 г. бурение скважин на бермах пикетов 6932 и 6935 показало, что теплоизоляционная эффективность его зависит от глубины укладки. С увеличением глубины укладки ослабевает теплового влияния. Так, при укладке его на глубине 0,7 м глубина протаивания грунтов под бермой ПК 6932 составила 1,70 м, а при укладке на глубине 1,1 м – 1,95 м (ПК 6935) (рис. 11). В зиму 2010/2011 гг. на бермах вышеперечисленных пикетов начали действовать сезонноохлаждающие установки (СОУ).

Годичный цикл наблюдений в термометрических скважинах с разной удаленностью от СОУ показали, что охлаждающий эффект его на расстоянии 0,5 м заметное, а на удалении 1,3 м резко снижается (рис. 12). В сентябре 2011 г. обследование СОУ на бермах в районе ПК 6932 показали, что после установки СОУ стволы скважины не заполнялись грунтом, поэтому у стволов скважин глубина сезонного протаивания колебалась в пределах 1,85-2,40 м. Также это подтвердило выкопанный здесь шурф для прокладки оптоволоконных кабелей, где глубина сезонного протаивания составляла 1.85-1,90 м. Для повышения охлаждающего эффекта СОУ необходимо досыпать стволы скважин дисперсным грунтом.

Экспериментальные исследования за тепловым режимом грунтов под теплоизоляционными покрытиями были проведены в 1971-1973 г.г. на стационаре Якутск. Плиты из пенопласта (марка ПС-1 и ПС-4) сокращают глубину сезонного протаивания 3-6 раз, но повышают среднегодовую температуру грунтов [4]. Представляют интерес работы ООО НПО «ФундаментСтройАркос» успешно применяемые в условиях криолитозоны Западной Сибири. Компания разработала эффективные, надежные устройства, обеспечивающие устойчивость мерзлого состояния грунтов за счет использования естественного холода: трубчатые системы замораживания и температурной стабилизации, сезоннодействующие охлаждающие устройства [5].

Выводы

За период наблюдений глубина сезонного протаивания на просеке трассы продолжает увеличиваться, а температура верхних горизонтов многолетнемерзлых пород повышаться.

На насыпи, отсыпанной в холодный период, наблюдается поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород, при этом, чем выше высота насыпи, тем интенсивнее скорость ее поднятия. При отсыпке насыпи в теплый период с удалением сезонноталого слоя в её основании формируется чаша протаивания.

Для обеспечения устойчивости насыпи необходимо накопление запасов холода в её теле и грунтах основания, поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород. Рекомендуется постоянное удаление снежного покрова с поверхности насыпи, или его уплотнение. Отсыпку насыпи не-

обходимо проводить только в зимний период.

Результаты данного этапа исследований пока не позволяют подтвердить эффективность использования теплоизолирующих покрытий, термостабилизаторов, консольных навесов для предотвращения повышения температуры грунтов основания и деградации мерзлой толщи.

Список литературы

1. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / П.А.Соловьев. – Москва: Изд-во АН СССР, 1959. – 144 с.

2. Проектирование и строительство земляного полотна железной дороги Томмот-Кердем в сложных инженерно-геокриологических условиях. Итоги инженерных изысканий в 2005 г.: Материалы научно-технического совета 7-8 декабря 2005 г. в Якутске. – Якутск, 2005. – 118 с.

3. Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот-Кердем на участке «ледового комплекса (Материалы семинара-совещания 11-12 сентября 2007 г. в г. Якутске). – Якутск: ООО «Центр Трансстройиздат», 2007. – 165 с.

4. Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. – Якутск, 1975. – 302 с.

5. Строительство на вечномерзлых грунтах. – Тюмень, 2011. – 15 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ

Н.И. Сидняев, Ю.С. Мельникова, П.В. Храпов, А.В. Гласко

Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана

В статье рассматриваются геотехнические системы, под которыми понимаются инженерные сооружения, имеющие фундамент с соответствующей геологической средой, представленной вечномерзлыми или оттаивающими грунтами. Решается задача расчета и прогноза распространения температурного поля в вечномерзлом грунте под основаниями зданий и сооружений в криолитозоне. Дается математическая постановка задачи стационарной теплопроводности с соответствующими граничными условиями. Приводятся результаты прогноза температурного состояния грунта под фундаментом в различных пространственных разрезах. Представлены расчеты надежности оснований зданий и сооружений в зависимости от различных характеристик вечномерзлого грунта и особенностей фундамента.

Введение

Одним из главных параметров, определяющих несущую способность вечномерзлых грунтов как оснований зданий, является их температура, зависящая от температуры воздуха. Вечномерзлые грунты характеризуются различным происхождением, резкой изменчивостью мощности и вертикального строения, наличием азональных условий и локализованных таликов, пестротой температурного режима, различной льдонасыщенностью, структурно-текстурными особенностями и большим разнообразием состава и свойств. Таким образом, только изучение состава, состояния, строения, сложения и свойств вечномерзлых грунтов на территории строительства в их статике представляет собой большую, самостоятельную и весьма сложную задачу. Однако вечномерзлые грунты во всех присущих им характеристиках подвержены изменениям как во времени, так и в пространстве. Указанные изменения в зависимости от вызывающих их факторов можно подразделить на три группы:

- изменения мерзлотной обстановки (мерзлотных инженерно-технологических условий строительства), происходящие в связи с естественными изменениями природной среды;
- изменения, вызванные строительным освоением территории;
- изменения, происходящие в результате воздействия проектируемых зданий и сооружений.

Без определения и учета этих изменений мерзлотных инженерно-геологических условий (т.е. без прогноза их изменений) надежное и экономическое строительство и эксплуатация проектируемых объектов практически невозможны, что подтверждается весьма значительной долей деформируемых зданий и сооружений от общего их числа, сооружаемого в районах распространения вечномерзлых грунтов. Первоочередной задачей инженерно-геологических изысканий является получение таких материалов прогноза, которые обеспечили бы сохранность проектируемых объектов в связи с непосредственным влиянием строительства на природную обстановку при возможном учете и прочих изменений. Прогнозирование теплового взаимодействия подземных магистральных газопроводов с многолетнемерзлыми грунтами является одной из наиболее сложных задач. Теоретические разработки этой проблемы основаны, главным образом, на предположении о стационарности процесса теплообмена и не обеспечивают необходимую точность прогноза, особенно в переходные периоды года.

Разведка и освоение нефтяных и газовых месторождений на арктическом шельфе потребовали решения ряда сложных научно-технических проблем, связанных с возведением и обеспечением устойчивости искусственных оснований для производства буровых работ, размещения технологического оборудования и других целей. На основании крупномасштабных натурных экспериментов были сформулированы и проанализированы основные научные и технические задачи создания и обеспечения сезонной и многолетней устойчивости искусственных ледовых оснований на мелководном арктическом шельфе. Составление прогноза изменений температурного режима грунтов является необходимым элементом инженерно-геологического обоснования строительства (реконструкции, расширения) объектов ОАО «Газпром» в районах распространения вечномерзлых грунтов. Проводится оценка вероятных изменений площадного распространения, мощности и вертикального строения вечномерзлых грунтов, сезонного промерзания и оттаивания грунтов, их свойств и сейсмичности в результате строительства в тех или иных микрорайонах площадки выделенных групп зданий и сооружений.

Задача составления прогноза, формулируется как определение изменений температурного режима, площадного распространения, мощности и вертикального строения вечномерзлых грунтов, сезонного и многолетнего промерзания грунтов, их температурно-прочностного состояния и свойств в связи со строительством конкретных зданий и сооружений в каждом микрорайоне площадки, а также приращений сейсмической интенсивности этих микрорайонов в измененных мерзлотных условиях. Анализ изменений, исследуемых при прогнозе, позволяет также сделать заклю-

чение о возможности возникновения на площадке мерзлотных физико-геологических процессов (термокарст, бугры пучения, грунтовые наледи, оползни и т.п.), что дает возможность проектирования соответствующих защитных противомерзлотных мероприятий. При решении задач прогноза, определяются изменения либо тех или иных характеристик температурного режима грунтов, либо температурного режима в целом. Температурный режим некоторой грунтовой области исследований за какой-либо промежуток времени описывается последовательной совокупностью температурных полей, определяемых в этой области в течение указанного промежутка времени. Под температурным полем грунтовой области исследований в какой-либо момент времени понимается совокупность значений температур грунта (распределение температур) в различных точках области исследований в этот момент времени. К характеристикам температурного режима грунтов также относят среднегодовую температуру грунтов, глубины оттаивания - промерзания и т.п. [3].

При исследованиях, как правило, используются аналитические и численные методы. Выбор того или иного метода определения составляющих температурного режима или режима в целом зависит от конкретной задачи прогноза и этапа изысканий.

Составление прогноза изменения температурного режима грунтов разработано в соответствии с требованиями к порядку составления прогноза мерзлотных инженерно-геологических условий, а также с общими требованиями к прогнозу изменения инженерно-геологических условий, установленными действующими нормативными документами по изысканиям и проектированию оснований и фундаментов [2]. Составление прогноза изменений температурного режима грунтов проведено для ограниченного определенным образом грунтового массива путем последовательного расчета температурных полей в этом массиве, соответствующих любым заданным моментам времени от начала расчета.

На основе особенностей внешних воздействий процессов производства на среду разработаны направления усовершенствования математических моделей переноса тепла и влаги. Процессы тепломассопереноса описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, дополненных рядом слагаемых и соответствующими краевыми условиями. В разработанных алгоритмах учитываются условия на границе слоев, условия на границе фазового перехода воды в лед, физические свойства отдельных слоев. Теплофизические характеристики корректируются по ходу вычислений при изменении влажности и температуры. Величина солнечной радиации определяется в зависимости от времени суток, месяца года и географической широты. Разрешающие уравнения записываются в разностной форме. В каждом узле сетки определяются температура и влажность. С использованием разработанных моделей, алгоритмов и программ будет выполнен аналитический прогноз последствий техногенных воздействий.

Температурный режим (совокупность последовательных температурных полей в грунтовом массиве, соответствующих любым заданным моментам времени от начала расчета) рассчитывается как результат задаваемых на весь период расчета прогноза тепловых воздействий на верхней, боковых и нижней границах грунтового массива.

Расчеты предполагается проводить для температурного режима грунтов для конкретных инженерно-геологических разрезов с учетом естественных изменений температурного режима воздуха и радиационного баланса дневной поверхности, естественных и техногенных условий теплообмена на поверхности грунтов (снежный и растительных покровы, насыпи, бетонные покрытия и т.п.) и техногенных источников и стоков тепла (здания и сооружения) [11].

1 Математическая постановка задачи

В качестве объекта исследования будем рассматривать двухфазную грунтовую среду, содержащую воду и лед, температурные поля в которой могут проходить границу в 0°С, то есть влага в грунте будет претерпевать фазовые превращения. С этими фазовыми переходами связаны выделение и поглощение большого количества тепла, которые существенно влияют на температурное поле рассматриваемой среды и ее динамику. Так, при охлаждении ниже 0оС грунтовой среды с влажностью 20% в результате замерзания влаги, содержащейся в 1 г породы, выделяется порядка 70 Дж тепла, которого оказалось бы достаточно для нагревания этого же грамма породы почти на 40оС.

На границах расчетного объема могут быть заданы различные граничные условия: первого, второго или третьего типов. Кроме этого, будем рассматривать грунтовые среды с внедренными в них термостабилизаторами, которые будут позиционироваться как дополнительные источники тепла [7].

Базовым уравнением для разработки методов прогноза процессов замерзания и таяния в грунтах является уравнение баланса тепла в интегральной форме [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V H d\nu = -\int_{\Sigma} H d\nu \qquad (1)$$

Здесь V - контрольный объем, $\sum$ - окружающая его поверхность, t – время, H = H(T) – энтальпия (внутренняя энергия) на единицу объема, T – температура, q - вектор потока тепла, λ - коэффициент теплопроводности, n - внешняя нормаль к рассматриваемому объему, F – приток тепла на единицу объема.

В грунте поток тепла определяется по закону Фурье:

$$\bar{q}=-\lambda\, \mathrm{grad}T, \qquad (2)$$

- коэффициент теплопроводности. Фазовые переходы (фронты замерзания) и скачки коэффициентов теплопроводности на границах грунтов различного типа или элементов строительных конструкций порождают разрывы в решениях [8]. При отсутствии таких разрывов на основе уравнений (1) и (2) выводится уравнение распространения тепла в дифференциальной форме:

$$c_v \frac{\partial}{\partial t}T = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial}{\partial x}T\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial}{\partial y}T\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial}{\partial z}T\right) + F(x,y,z) \qquad (3)$$

Здесь c_v=dH/dT=pc - объемный коэффициент теплопроводности, c- удельная теплоемкость, p- плотность, λ- коэффициент теплопроводности, T(x,y,z,t) - температура среды. Здесь считается, что в случае наличия фазового перехода, где энтальпия терпит скачок, объемный коэффициент теплопроводности имеет вид

$c_v = \rho c + Q\,\delta(T-T^*)$,

T* - температура фазового перехода, Q - теплота фазового перехода, δ (T-T*)- дельта-функция.

Энтальпия в общем случае нелинейная, монотонно возрастающая функция от температуры. В простейшем случае можно считать, что

$H = H_0 + c_t\left(T-T^*\right), T > T^*,$

$H = H_0 + c_f\left(T-T^*\right) - Q, T < T^*.$

Здесь - объемная теплоемкость талого грунта, - объемная теплоемкость мерзлого грунта, - константа определения энтальпии. В случае здесь энтальпия равна нулю при .

В случае, когда коэффициент теплопроводности постоянная величина, из уравнения (2.2.3) выводится уравнение теплопроводности:

$$\frac{c_v}{\lambda}\frac{\partial}{\partial t}T = \frac{\partial^2}{\partial x^2}T + \frac{\partial^2}{\partial x^2}T + \frac{\partial^2}{\partial x^2}T + \frac{F(x,y,z)}{\lambda} \qquad (4)$$

В данной модели допускается, что при может иметься область с частично замороженным грунтом, где процент замороженной воды зависит температуры, в связи с чем энтальпия при - нелинейная функция температуры. Для описания области с частичной заморозкой существуют и более сложные двухфазные модели смеси жидкость–лед, где соотношение между водой и льдом зависит еще и от времени с начала процесса замерзания. Такие модели требуют расчета двух уравнений теплообмена. В связи с тем, что здесь предполагаются длительно текущие процессы, эти модели не рассматриваются.

Применяется два разных аналитических подхода и соответственно два разных типа численных методов для решения задач с разрывами [4]. При первом подходе разрывы выделяются, а непрерывные области описываются уравнениями (1) или (2). На разрывах ставятся некоторые граничные условия, выводимые из (1) и (2). Для фазовых переходов граничные условия следующие:

$$U(H_2 - H_1) = \lambda_1\left(\frac{\partial}{\partial \vec{S}}T\right)_2 - \lambda_2\left(\frac{\partial}{\partial \vec{S}}T\right)_1 \quad T_1 = 0 \quad T_2 = 0 \qquad (5)$$

Здесь – скорость распространения поверхности разрыва в направлении ее нормали , индексы 1 и 2 обозначают значения соответствующих величин по разные стороны разрыва, нормаль направлена от области 1 к области 2. Предполагается, что на таком разрыве терпит скачок величина энтальпии при в связи с наличием теплоты фазового перехода. Учитывается также скачок теплопроводности для мерзлого и оттаявшего грунта, но для существования разрыва наличие такого скачка не обязательно.

Для неподвижных разрывов, связанных со скачком коэффициента теплопроводности на границе раздела двух разных сред граничные условия следующие:

$$\lambda_1\left(\frac{\partial}{\partial s}T\right)_1 - \lambda_2\left(\frac{\partial}{\partial s}T\right)_2 = 0 \qquad T_1 = T_2 \qquad (6)$$

В одномерном случае, когда все зависит только от одной координаты, x эти соотношения принимают вид:

$$U(H_1 - H_2) = \lambda_1\left(\frac{\partial}{\partial x}T\right)_1 - \lambda_2\left(\frac{\partial}{\partial x}T\right)_2 \quad T_1 = 0 \quad T_2 = 0$$

$$\lambda_1\left(\frac{\partial}{\partial x}T\right)_1 - \lambda_2\left(\frac{\partial}{\partial x}T\right)_2 = 0 \quad T_1 = T_2$$

На границе расчетного объема ставятся три типа граничных условий.

Граничное условие первого типа:

$T = \mu(t)$ (7)

Примеры применения: поверхность грунта, на которой температура известна. Например, поверхность земли или поверхность пола в подвальном помещении, стена подвального помещения, примыкающая к грунту при условии высокой теплопроводности этой стены, сооружение без фундамента, располагающееся на поверхности грунта при условии хорошей теплопроводности пола, подтаявший снежный покров на поверхности грунта в летнее время. Стандартное условие для

нижней границы расчетного объема: постоянная температура на глубине $T=T_b$.

Граничное условие второго типа:

$$-\lambda\frac{\partial}{\partial n}T=\nu(t) \quad (8)$$

Примеры применения: плоское терморегулирующее устройство, позволяющее регулировать поток тепла с поверхности, при v(t)=0 - теплоизолирующая поверхность, область контакта с хорошо утепленными элементами сооружения, стандартное граничное условие на боковой границе расчетного объема. Граничное условие третьего типа:

$$\lambda\frac{\partial}{\partial n}T=-\sigma\left(T-\mu(t)\right) \quad (9)$$

Применяется для описания области контакта с двусторонней теплопроводящей поверхностью, для которой с одной стороны температура совпадает с температурой грунта, а с другой – поддерживается заданная температура μ(t). Данное условие моделирует тонкий слой теплопроводящего материала. Величина рассчитывается по формуле: , - теплопроводность материала, – его толщина. Примеры применения: снежный покров на поверхности грунта в зимнее время, тонкая стена подвального помещения, пол, располагающийся непосредственно на грунте.

Для расчета непрерывных областей применяется любая сходящаяся численная схема, аппроксимирующая уравнения (3) или (4), но схемы, выведенные на основе уравнения (1), являются консервативными и потому более точными. Реализация условий (5) требует либо введения сетки, привязанной к разрыву, так называемой плавающей сетки, либо специальных формул расчета для ячеек вблизи поверхности разрыва. В связи со сложностями программной реализации в двумерном и трехмерном случае такой подход для расчета фазовых переходов обычно не используется.

При построении разностных схем всегда применяется интегральное уравнение (1). В свою очередь численные методы сквозного счета подразделяются на методы с регуляризацией и без нее. Регуляризация означает, что расчет разрывных решений заменяется расчетом гладких решений, где разрывы заменяются узкими переходными зонами и вводится малый параметр, определяющий ширину этой зоны. При стремлении этого параметра к нулю ширина зоны перехода тоже стремится к нулю и получается разрывное решение. В качестве малого параметра вводится температура полного замерзания , отличная от нуля. Энтальпия на участке - линейная функция от температуры. Такой подход позволяет избежать возможных проблем с устойчивостью расчета, связанных с существованием решений интегральных уравнений.

В соответствии с поставленной задачей реализован программный комплекс для проведения трехмерных расчетов тепловых процессов в грунтах при наличии фазовых переходов и переменном коэффициенте теплопроводности. Расчет ведется с помощью явной двухслойной схемы с переменными шагами по пространству и по времени. Функция энтальпии задается в виде непрерывной кусочно-линейной функции , , где индекс определяет соответствующие значения для мерзлого грунта, оттаявшего грунта и переходной зоны, и позволяет осуществлять расчеты однородного грунта. Значения постоянны для определенных диапазонов температуры , , , - температура полного замерзания, - температура начала замерзания принимаемая равной 0оС. В зоне частичного замерзания величина задается существенно большей, чем в зоне полного замерзания и оттаявшего грунта. Это позволяет моделировать распространенный подход, когда энтальпия задается как разрывная функция со скачком в точке замерзания, но применение непрерывной функции позволяет устранить возможные проблемы с некорректностью постановок задач с фронтом замерзания в трехмерных и двумерных случаях. Численная схема в программном комплексе рассчитана на однородный грунт.

Таблица 1 - Физические параметры грунта типа супесь

Показатель	Единицы	Значение
Температура начала замерзания грунта	°С	-0,2
Температура грунта на глубине 10 м	°С	-2,0
Коэффициент теплопроводности талого грунта	Вт/м·°С	1,62
Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта	Вт/м·°С	1,74
Теплоемкость объемная мерзлого грунта	Дж/ м³·°С	2140000
Теплоемкость объемная талого грунта	Дж/м³·°С	2310000
Влажность грунта суммарная	%	22
Влажность за счет незамерзшей воды	%	5
Влажность на границе раскатывания	%	13
Плотность сухого грунта	кг/м³	1570
Плотность грунта суммарная	кг/м³	1910
Условная теплоемкость	Дж/ кг·°С	5820

2 Результаты численного моделирования

В качестве расчетного объема рассматривается двухфазная грунтовая среда размером 20х20ч7,5 м. Берется грунт типа супесь (физические параметры этого вида грунтов представлены в таблице 1 [1]). Температурные показатели, необходимые для расчетов: на нижней границе задается постоянная температура -2оС, среднегодовая температура на поверхности -1°С с годовым перепадом в 40°С (таким образом, максимальная температура на поверхности 19°С, минимальная -21°С).

Первый этап расчетов – наблюдение за тем, как изменяется распределение температурных полей, если на поверхности грунта стоит сооружение размером 4х4 м, в котором поддерживается постоянная температура 20ºС. Пространственные шаги расчета одинаковы по всем осям и составляют 0,25 м. Будем считать, что представленное сооружение - постройка на земляном полу, следовательно, в пределах этой области на верхней границе расчетного объема будет иметь место первое граничное условие: совпадение с температурой внутри сооружения. На рисунке 1 представлен горизонтальный разрез температур на глубине 0,5 м.

Рассмотрим, как меняется температура под сооружением с течением времени. На рисунках 2

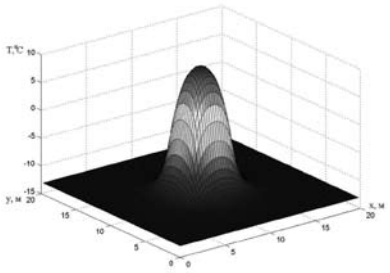


Рисунок 1 – Горизонтальный разрез расчетного объема на глубине 0,5 м

и 3 представлены графики изменения температуры в точках наблюдения. Первая, вторая и третья точки наблюдения располагаются на оси симметрии здания, на углу здания и на свободном от влияния температуры здания пространстве соответственно, глубины залегания точек наблюдения – 0,1 м.

Из рисунка 2 можно судить о явном влиянии сооружения на температуру грунта под ним. Если максимальная температура, приходящаяся примерно на 0,55 года (июнь-июль), близка для всех трех точек наблюдения, то минимальные температуры сильно разнятся. Максимальная температура воздуха достигает уровня в 19ºС, а температура, поддерживающаяся в здании на протяжении года, – 20ºС, этим и объясняется близость температур под зданием и на открытом участке грунта в летний период.

Минимальные температуры грунтовой среды отличаются: в точке 3, где на грунт влияет только температура воздуха, этот показатель близок к минимальной температурной точке (-21ºС), а под зданием – не опускается ниже 10ºС. Отличие профилей температур для точек 1 и 2 объяснимо тем, что точка 2, расположенная на углу здания, больше подвергается влиянию промерзшего грунта, чем точка, расположенная строго на оси симметрии сооружения.

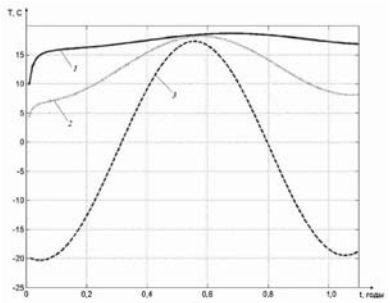


Рисунок 2 – Изменение температуры в точках наблюдения в течение 1 года

Если проследить за изменением температур самых важных точек исследования (1 и 2 на рисунке 3) – тех, что расположены непосредственно под зданием, - то можно сказать, что характер этих изменений довольно стабилен. На протяжении трех лет прогнозная температура под зданием колеблется в районе 17-18ºС (на оси симметрии) и 7-18ºС (для точек на углах здания). Очевидно, что это повлечет за собой скорую просадку сооружения и его разрушение.

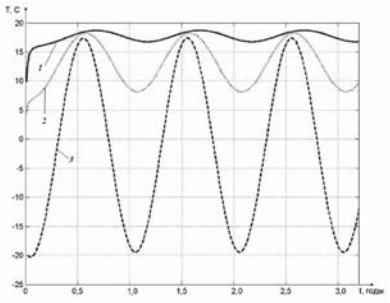


Рисунок 3 – Изменение температуры в точках наблюдения в течение 3 лет

На втором этапе исследования рассматривается расчетный объем, на поверхности которого находится сооружение с углубленным фундаментом. Геометрические параметры сооружения те же, размеры фундамента с ним совпадают. Ввиду схожести результатов, примеры расчетов и прогнозов температурных профилей не приводятся, однако стоит отметить, что, как и в вышерассмотренном случае, неотрицательная температура под фундаментом здания в течение теплого сезона неблагоприятно скажется на прочности сооружения: с такими температурами быстро образуется котлован, и здание разрушается. Только по достижении глубины 7 м можно наблюдать синусоидальный характер изменения температуры, когда максимум не превышает -1ºС. Но отрицательные температуры на такой глубине никак не повлияют на охлаждение грунта непосредственно под самим зданием, поэтому критическая ситуация, когда сооружение может обрушится из-за неустойчивости фундамента на талом грунте, остается острой. Решение этой проблемы представлено в третьем этапе исследования, когда для искусственного подмораживания грунта под зданием используются специальные устройства – термостабилизаторы.

Третий этап заключается в том, что, как и было упомянуто выше, в грунт по бокам здания с фундаментом внедряются термостабилизаторы. В программной реализации термостабилизатор представляет собой бесконечно тонкий источник тепла с постоянной мощностью. Расчетный объем, геометрические характеристики здания и фундамента остаются прежними.

Рассмотрим температурные профили в точках наблюдения. Точки наблюдения взяты аналогично первому этапу исследования: 1, 2, 3 – точки на оси симметрии сооружения, на углу фундамента и в грунте без стороннего теплового воздействия, глубина залегания – 3,1 м.

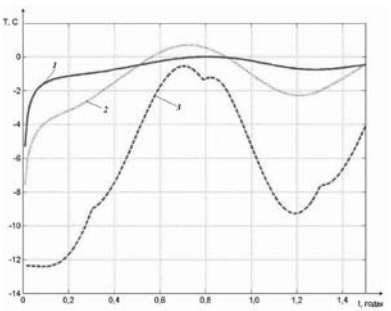


Рисунок 4 – Изменение температуры в 1, 2, и 3 точках наблюдения в течение 1,5 лет

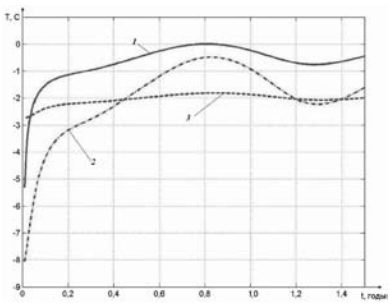


Рисунок 5 – Изменение температуры в точках наблюдения на оси симметрии здания в течение 1,5 лет (1 –на глубине 3,1 м, 2 – 5 м, 3 – 7 м)

На рисунке 4 представлены результаты численного моделирования температурного распределения в точках 1, 2 и 3: влияние термостабилизаторов на грунт под сооружением ярко выражено – если раньше грунт прогревался почти до температуры фундамента, то теперь на оси симметрии температура не превышает 0ºС.

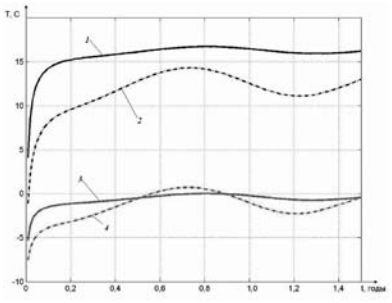


Рисунок 6 – Показатели температур в точках наблюдения: 1 – точка на оси симметрии здания на глубине 3,1м (термостабилизаторы не применяются); 3 – точка на оси симметрии здания на глубине 3,1м (с применением термостабилизаторов); 2 – точка на углу фундамента здания на глубине 3,1м (термостабилизаторы не применяются); 4 – точка на углу фундамента здания на глубине 3,1м (с применением термостабилизаторов)

Если рассматривать профили температур только для точек на оси симметрии здания на разных глубинах, то увидим следующее (см. рисунок 5): на глубине 3,1 м (прямо под фундаментом) грунт не тает даже в летний период, на глубине 5 м влияние термостабилизаторов еще заметно, а на глубине 7 м наблюдается почти постоянная температура около -2ºС.

Наконец, сравним показатели температуры под зданием без применения и с применением термостабилизаторов. На рисунке 6 приведены температурные профили точек, располагающихся строго под фундаментом (1 и 3 – на оси симметрии, 2 и 4 – на углу фундамента). Черным цветом выделены графики температур в том случае, когда термостабилизаторы не применяются. Видно, как сильно прогревается грунт в этом случае. Красным цветом показаны температурные профили точек грунта, охлаждаемого четырьмя термостабилизаторами. Здесь температуры имеют синусоидальный характер с максимумом в районе нуля. Только для точки на углу фундамента виден небольшой всплеск температуры после теплого периода. Его можно избежать, применяя более мощные термостабилизаторы. Также нужно обратить внимание, что максимумы температур грунта не совпадают с максимумом годовых температур. Это объясняется тем, что грунт прогревается постепенно, поэтому теплые температурные волны достигают показанной на графике глубины 3,1 м только спустя некоторое время.

3 Оценка надежности оснований, представленных мерзлыми и оттаивающими грунтами

Система «здание-основание» не ремонтопригодна и для нее понятия надежности и безотказности совпадают, кроме того, совпадают понятия долговечности и наработки на отказ (отказ – выход системы из области допустимых состояний).

Функция надежности – вероятность нахождения системы в области допустимых состояний в течение отрезка времени от 0 до , где – текущее время.

Надежность – то же в течение всего срока эксплуатации .

Долговечность – время пребывания системы в области допустимых состояний.

Их аналитические выражения запишутся:

функция надежности:

$$P(t)=\begin{cases} F_u(\tau)-F(\tau)\geq 0 \\ s_u-S(\tau)\geq 0 \\ F(\tau)+F_r(\tau)-F_n(\tau)\geq 0 \\ 0\leq\tau\leq t \end{cases}$$

Надежность: H=P(t) .

Долговечность – случайная величина, условно подчиняющаяся нормальному закону распределения и характеризующаяся математическим ожиданием и дисперсией .

$$m_g=\int_0^\infty R(t)dt \quad D_g=2\int_0^\infty tR(t)dt-m_g^2$$

где - соответственно несущая способность основания, нагрузка на основание, сила защемления фундамента в грунте (сила трения и смерзания), действующая на фундамент касательная сила пучения и деформация основания на момент времени ; - предельно допустимая деформация основания.

Дополнение функции надежности до единицы равно вероятности появления отказа . Различают два вида отказа – внезапный и постепенный. Внезапный отказ связан с аномальными отклонениями внешних воздействий от своих номиналов (нормативных или расчетных значений). Постепенный – с ухудшением свойств системы (старением системы).

Система называется стареющей, если выполняется неравенство: при , где , - первая производная функции надежности по времени .

К стареющим системам относится основание здания, возведенного по принципу II, к нестареющим – по принципу I.

Любая стареющая система при бесконечно большом периоде эксплуатации уступает нестареющей. Однако при реальном периоде эксплуатации нельзя сделать столь однозначного вывода, так как он будет зависеть от вида функции надежности.

Вычисление функции надежности слагается из трех этапов:

1) выбор пространства качества , пространства входных параметров и оператора системы ;

2) решение стохастического уравнения:

где - элемент пространства ; - элемент пространства ;

3) определение функции надежности как вероятности сохранения качества системы в течение

отрезка времени от 0 до , т.е. вероятности нахождения системы в области допустимых состояний в этот отрезок времени.

Под пространством понимаются численные значения природных и техногенных факторов.

К природным факторам относятся: температура наружного воздуха; скорость ветра; высота и плотность снега; глубина залегания вечномерзлых грунтов (ВМГ); температура ВМГ; геологическое состояние основания; состав грунтов и их физико-механические свойства.

К числу техногенных факторов относятся: конструкция здания, фундаментов и охлаждающей системы; условия работы охлаждающей системы; температура воздуха в помещениях первого этажа; глубина заложения подошвы фундаментов; глубина предпостроечной подготовки грунтов основания (искусственного оттаивания или промораживания). Последние два фактора особенно сильно влияют на надежность основания и с их помощью можно управлять надежностью, поэтому они называются управляющими параметрами.

Под оператором понимается алгоритм последовательного расчета: температуры поверхности грунта: температурного поля грунта основания; несущей способности основания; касательных сил пучения и сил защемления фундамента в грунте; величины деформации основания.

Третий завершающий этап определения функции надежности является самым сложным. Существует два возможных пути его реализации – численный и аналитический.

Первый путь, известный как метод Монте-Карло, состоит в статистическом моделировании подведения системы в условиях случайных воздействий на нее и происходящих в ней случайных изменений. Для реализации его надо лишь построить детерминистическое описание преобразования элементов в элементы и повторить его m раз (несколько сотен, а иногда и тысяч раз), фиксируя отказы системы в каждом испытании, если они будут иметь место. Функция надежности при этом определяется как дополнение до единицы частного от деления общего числа отказов за время на общее число испытаний.

Положительной стороной метода Монте-Карло является его малая чувствительность к сложности системы, и он может быть реализован как в случае одномерного, так и в случае многомерного пространства качества. Отрицательной стороной – большая потребность машинного времени (метод реализуется на ЭВМ) и сложность анализа полученных результатов.

Второй путь (аналитический) реализуется с привлечением известных в теории надежности моделей отказов и в ряде существенных допущений, оценка погрешности которых все равно производится численным методом.

В качестве допущений принимаются:

1) Все стохастические параметры подчиняются нормальному закону распределения;

2) принцип I реализуется только на участке с ВМГ сливающегося типа, при этом считается, что условие заведомо обеспечивается, а вероятность выпучивания фундаментов равна нулю;

3) считается, что несущая способность основания здания, возводимого по принципу II, заведомо обеспечивается, а вероятность появления многолетнего промерзания и выпучивания фундаментов равна нулю.

Главная цель допущений – заменить многомерное пространство качества на одномерное.

Далее рассматриваются две независимые задачи – обеспечение устойчивости здания на мерзлом основании и на оттаивающем. К первой задаче (принцип I) применяется Пуассоновская модель отказов, ко второй (принцип II) кумулятивная.

Положительной стороной аналитического метода является легкость анализа получаемого результат и возможность ручного счета. Отрицательной – невозможность расчета в случае многомерного пространства качества или большой сложности оператора , а также большая погрешность вычислений из-за принятых допущений.

Как отмечалось выше, с помощью управляющих параметров можно направленно изменять надежность оснований. В связи с этим прогноз работоспособности оснований приобретает активный характер: располагая аппаратом для расчета функции надежности, можно не только констатировать приемлемость проектного решения, но и изменять его по своему усмотрению, добиваясь оптимальной надежности.

Какая должна быть оптимальная надежность?

С одной стороны, чем выше надежность, тем выше начальная стоимость системы , а с другой – меньше материальный ущерб, обусловленный вероятностью отказа системы до окончания срока ее эксплуатации. Этот ущерб называется ценой риска и зависит от функции надежности. Возникает оптимизационная задача, из решения которой находится оптимальная надежность:

4 Методика определения функции надежности основания

Метод заключается в многократном математическом моделировании процесса теплового и механического взаимодействия основания со зданием и окружающей средой [9]. По результатам моделирования строится статистическая оценка функции надежности: $P_{ш}(t)=1-\frac{n(t)}{m}$, где n(t) - число отказов в интервале от 0 до t; m - число моделирований (испытаний).

Число испытаний зависит от задаваемой погрешности вычислений и связано с ней выражением $m=\frac{4P(1-P)}{\Delta^2}$, где - задаваемая погрешность вычислений; P - искомая вероятность (надежность).

Это условие записывается в виде таблицы 2.

Таблица 2

P	Менее 0,5	От 0,5 до 0,95	Более 0,95
Δ	$0,5\delta$	$(1\text{-}P)\delta$	$\delta\sqrt{0,05(1\text{-}P)}$

- параметр точности, для предварительных вычислений принимается равным 0,4, для окончательных 0,8 и выше.

Для этого случая предельные условия в детерминистической постановке формулируются следующим образом:

$F_u \geq k_H F$ (10)

где F_u - несущая способность основания; k_H - коэффициент запаса (коэффициент надежности); F - нагрузка, передаваемая на основание.

В вероятностной постановке:

$F_u + \geq k_H$ (11)

Где F_u, F - математическое ожидание несущей способности основания и нагрузки на основание; , - стационарные нормальные случайные процессы с математическим ожиданием, равным нулю.

Установлено, что для заданий , поэтому процессом пренебрегают.

Поделив правую и левую части (11) на среднее квадратичное отклонение процесса , получают или

$\psi(t) \leq \gamma$ (12)

где - характеристика безопасности, вычисляемая по формуле (13).

Из (10) следует , тогда, умножая и деля правую часть выражения (12) на , получают:

$$\gamma = \frac{F_u - FF_u}{\Gamma'_{\Gamma'}} = \frac{1-\frac{1}{k_H}}{\nu_{F_u}} \quad (13)$$

где $\nu_{F_u} = \frac{\sigma_\varphi}{F_u}$ - коэффициент вариации несущей способности основания.

Выражение (13) устанавливает связь между стохастическими параметрами , и детерминистическим параметром . Это позволяет получить ответы на два важных вопроса: как, зная коэффициент запаса , определить надежность ? Как, зная надежность , определить коэффициент запаса ?

Чтобы ответить на них, вначале определяют функцию надежности как вероятность отсутствия выброса из области допустимых состояний.

Из теории выбросов известно, что число выбросов n есть дискретна случайная величина с интегральной функцией распределения . Отсюда следует, что .

Поскольку интересны, как правило, только высоконадежные системы (выбросы – редкие события), то для них может быть применено распределение Пуассона. Тогда можно записать:

$$P(t,\gamma) = exp\left(-\mu(t,\gamma)\right)$$

где $-\mu(t,\gamma)$ - математическое ожидание числа выбросов за время .

Из теории выбросов также известно, что их число есть аддитивная величина, то есть число выбросов за время равно сумме выбросов за каждый год в интервале от 0 до t :

$$\mu(t,\gamma) = tm(\gamma),$$

где - число лет; - математическое ожидание числа выбросов в году.

Принимая во внимание вышесказанное, окончательно получим:

$P(t,\gamma) = \exp(-tm(\gamma))$ (14)

Если число выбросов меняется из года в год (например, в случае глобального изменения климата), то вместо произведения нужно взять сумму, то есть вначале вычислить число выбросов за каждый расчетный год, а затем их суммировать:

$P(t,\gamma) = \exp(-\sum m_i(\gamma))$ (15)

Опуская вывод, который можно найти в работе [10], запишем формулу для определения математического ожидания числа выбросов в году:

$$m(\gamma) = \frac{\exp(-0,5\gamma^2)}{\gamma\sqrt{2\Gamma'}} \quad (16)$$

Для вычисления по формуле (16) надо предварительно по формуле (13) вычислить характеристику безопасности и по формуле (17) – коэффициент вариации несущей способности основания . Вывод формулы (17) см. в упомянутой работе.

$$\nu_{F_u} = \frac{0,9(T_o'/A)^{\frac{1}{3}}\sigma D}{-2T - C\sqrt{-T}} \quad (17)$$

где T_0 - расчетная температура поверхности грунта под зданием; A - амплитуда сезонных колебаний наружного воздуха (разница среднемесячных температур наружного воздуха между самым теплым и самым холодным месяцем года, деленная на два, обычно =15-30°C); - среднеквадратичное отклонение средней годовой температуры наружного воздуха, обычно =0,7-1,6°C; - расчетная температура грунта, для столбчатых фундаментов – максимальная температура на глубине

заложения фундамента, для свайного – эквивалентная температура; - коэффициент, зависящий от типа фундамента: свайный C=0,47, столбчатый C =0,0 (пески), 0,38 (супеси), 0,58 (суглинки глины); D - коэффициент затухания температурной дисперсии с глубиной, зависит от типа фундамента и комплекса параметров (z - глубина заложения фундамента, считая от верхней границы ВМГ, C_f- теплоемкость мерзлого грунта, λ_f - теплопроводность мерзлого грунта).

Формулы для определения и

$$T = \alpha T_o^{'} + k(T_o - T_o^{'}) \quad (18)$$

где T_0 - температура грунта в естественных условиях на глубине 10 м.

Столбчатый фундамент

$$\alpha = 1 - \exp(-y) \quad (19)$$

$$D = \frac{1}{y}\sqrt{1 + (1 + y\sqrt{2})\exp(-y\sqrt{2}),} \quad (20)$$

$$k = 1 - \frac{2}{\Gamma'} arctg(u), \quad (21)$$

где $b_{зд}$ - ширина здания.

Свайный фундамент

$$\alpha = 0{,}44\sqrt{y} \quad (22)$$

$$D = \begin{cases} (0{,}78 + 0{,}74 ln(y))/y & \text{при } y > 1, \\ 1 - 0{,}22y & \text{при } y \le 1, \end{cases} \qquad D = \begin{cases} (0{,}78 + 0{,}74\ln(y))/y \\ 1 - 0{,}22y \end{cases} \quad (23)$$

$$k = 1 - \frac{2}{\Gamma'} arct(u) - \frac{u\ln(1 + u^2)}{O} \quad (24)$$

5. Результаты расчетов надежности сооружений в зависимости от вариации параметров

Для практического подтверждения выкладок, представленных в предыдущем разделе, была написана программа в пакете Matlab, реализующая расчет надежности оснований сооружений в зависимости от вариации различных параметров. В качестве основной была взята формула расчета надежности (15), в которой характеристика безопасности рассчитывалась с помощью формул (13) и (17).

На рисунке 7 представлен прогноз надежности основания, в котором расчетная температура грунта была найдена по формуле (18) (в качестве примера рассматривался столбчатый фундамент). График функции надежности монотонно убывает со временем, и надежность основания становится менее 0,5 уже через десять лет эксплуатации фундамента.

Затем, в качестве расчетной температуры при подстановке в формулу (15) выбиралась температура, рассчитанная с помощью программного комплекса, результаты моделирования которого представлены в разделе 2. Таким образом, расчетная температура становится более приближенной к реальной модели. На рисунке 8 представлен график функции надежности, рассчитанной с помощью спрогнозированной температуры грунта. Следует отметить, что функция так же является убывающей, но здесь можно наблюдать периоды резкого понижения надежности – в каждой второй половине расчетного года. Это явление может быть объяснено тем, что именно во второй половине года, в теплый сезон, температура грунта близка к критической (не превышает нуль, но тем не менее близится к нему), а следовательно, надежность оснований в эти периоды претерпевает резкий спад.

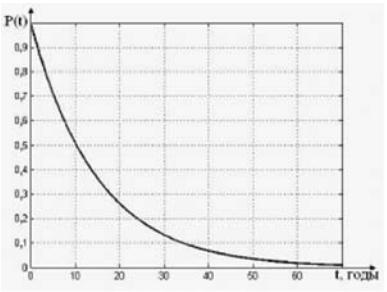


Рисунок 7 – Надежность основания, рассчитанная по формуле (15) с учетом расчетной температуры (18) (пример для столбчатого фундамента)

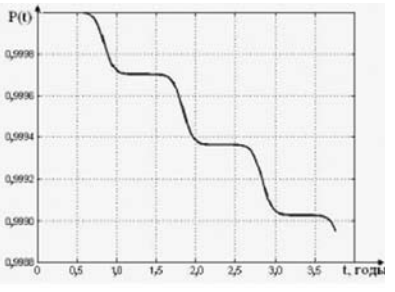


Рисунок 8 – Надежность основания, рассчитанная по формуле (15) с учетом расчетной температуры, полученной с помощью описанного программного комплекса

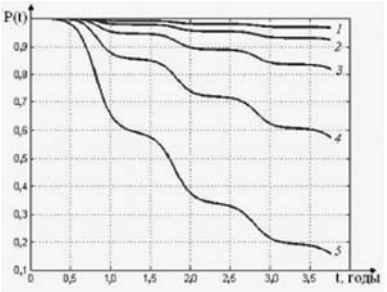


Рисунок 9 – Надежность основания, рассчитанная по (6) с учетом вариации амплитуды сезонных колебаний наружного воздуха (1 - A=10°C, 2 - A=15°C, 3 - A=20°C, 4 - A=25°C, 5 - A=30°C)

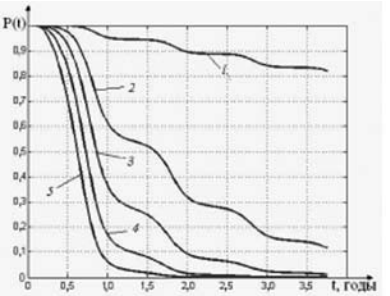


Рисунок 10 – Надежность основания, рассчитанная по (6) с учетом вариации среднеквадратичного отклонения средней годовой температуры наружного воздуха (=0,7; 0,9; 1; 1,1; 1,2°C)

На рисунке 9 изображены несколько графиков функции надежности в зависимости от изменения амплитуды сезонных колебаний наружного

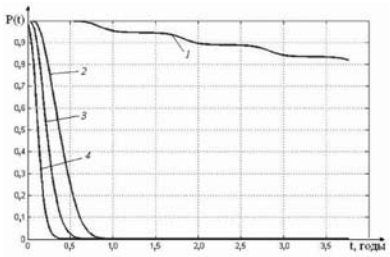


Рисунок 11 – Надежность основания, рассчитанная по (6) с учетом вариации расчетной температуры поверхности грунта под зданием (1 - =0,1°С; 2 - =1°С; 3 - =2°С; 4 - =5°С)

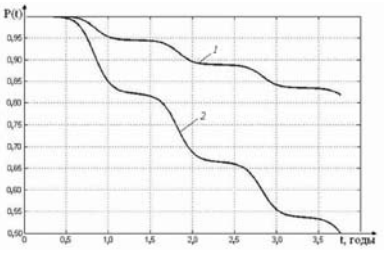


Рисунок 12 – Надежность основания, рассчитанная по (6) с учетом вариации типов грунта (1 – супеси, 2 - суглинки)

воздуха. Необходимо отметить, что чем больше показатель этого параметра, то есть чем больше вариативность внешних температур, чем выше температура окружающего воздуха в теплое время года, тем резче и интенсивней происходит спад надежности основания (график 5 на рисунке 9).

Далее рассматривались вариации среднеквадратичного отклонения годовой температуры, то есть параметр, характеризующий степень изменения климата [6]. Здесь, как и в предыдущем случае, чем больше отклонение рассматриваемого параметра, тем быстрее убывает функция надежности. К примеру, при среднеквадратичном отклонении в 1,2°С надежность основания становится ниже 0,5 уже примерно через 7 месяцев после начала эксплуатации. Такие результаты на практике, безусловно, не приемлемы, но здесь важно напомнить, что расчетная температура грунта, спрогнозированная с помощью программного комплекса, не учитывала дополнительных превентивных мер по сохранению фундаментов в мерзлом состоянии. Поэтому на представленных рисунках 10-12 отражена картина влияния изменения внешних параметров на температуру почв вблизи оснований сооружений, не защищенных дополнительными средствами от протаивания.

Также в ходе исследования рассматривались вариации таких параметров как расчетная температура грунта под зданием (рисунок 11) и тип почвы (рисунок 12). Результаты численного моделирования функции надежности представлены на соответствующих графиках.

Выводы

Сформулирована математическая постановка задачи в виде интегрального уравнения теплового баланса с учетом теплового потока, изменяющегося по закону Фурье, учтены скачки энтальпии и коэффициента теплопроводности. Решена задача расчета и прогноза распределения температурного поля в двухфазной грунтовой среде. Разработан численный метод и реализована разностная схема решения задачи. С помощью программного комплекса произведен расчет на грунтовом объеме с реальными литологическими параметрами. Рассмотрены различные варианты расположения геотехнических сооружений: на земляном полу; с фундаментом; с фундаментом при условиях наличия насыпного грунта; свайный фундамент. Проведено сравнение результатов распределения температурных полей с применением и без применения сезоннодействующих охлаждающих устройств – термостабилизаторов. Определено воздействие термостабилизаторов на температурное состояние грунта.

Проведены расчеты надежности оснований сооружений для разнообразных вариаций параметров, влияющих на устойчивость фундаментов. Представлены зависимости функции надежности как вероятности сохранения качества геотехнической системы для различных временных интервалов.

Список литературы

1. ГОСТ 25100-82. Грунты. Классификация. - М.: Изд-во стандартов, 1982

2. РСН 67-87 «Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами»

3. Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.

4. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. – 512 с.

5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

6. Пустовойт, Г.П. Учет изменчивости климата при обеспечении надежности оснований сооружений в криолитозоне / Г.П. Пустовойт // Криосфера Земли, 1997. – Т. I, № 4. – С. 50-53.

7. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Эдиториал УРСС, 2009. – 784 с.

8. Сидняев Н.И., Храпов П.В., Мельникова Ю.С. Основы математического моделирования распределения температурных полей в многофазных средах. – Материалы Четвертой Всероссийской молодежной научно-инновационной школы «Математика и математическое моделирование. – Саров: Изд-во «Альфа», 2010. с. 86-93

9. Хрусталев Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне. М. : Изд-во МГУ, 2005. 542 с.

10. Хрусталев Л.Н., Медведев А.В., Пустовойт Г.П. Многолетнее изменение температуры воздуха и устойчивость проектируемых в криолитозоне сооружений // Криосфера Земли. – 2000. – Т. IV, №3. – с.35-41.

11. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Наука, 1973. – 448 с.

ПОСТАНОВКА ВОПРОСА О РОЛИ КРИОГЕННОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ В УСТОЙЧИВОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛОТНА АМУРО-ЯКУТСКОЙ МАГИСТРАЛИ (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА ТОММОТ-КЕРДЕМ)

А.Е. Мельников[1], С.С. Павлов[2]

[1]ТИ (ф) СВФУ, г. Нерюнгри, e-mail: MelnikowDron@mail.ru
[2]ГОУ СПО «НПК», г. Нерюнгри, e-mail: Pavlov_SS@mail.ru

Обоснованы необходимость и проблема изучения процессов криогенного выветривания и их влияния на устойчивость железнодорожного полотна. Предпринята попытка районирования участков трассы Амуро-Якутской железнодорожной магистрали (Томмот – Кердем) по условию устойчивости к выветриванию.

Завершение строительства, ввод в строй железнодорожной линии Беркакит-Томмот-Якутск (рис. 1), в сочетании с опережающим развитием транспортной инфраструктуры в целом, обеспечит мультипликативный эффект программ освоения и развития Востока страны, позволит ускорить освоение месторождений, поступление средств в бюджеты всех уровней от реализации конечного продукта этих проектов и, самое главное, обеспечит повышение качества жизни населения. Однако, строительство АЯМ и его дальнейшее продолжение на Магадан, северных железных дорог и автомобильных коридоров, сооружение транспортных подходов к крупным месторождениям природных ресурсов Сибири и Востока страны осуществляется в экстремальных климатических условиях.

Задача обеспечения прочности и устойчивости земляного полотна возникла практически одновременно с началом проектирования и строительства железных дорог. Земляное полотно, построенное в различные периоды времени по нормативам, устаревшим впоследствии, переставало в процессе продолжительной работы удовлетворять повышающимся эксплуатационным требованиям.

Так, значительная затянутость строительства магистрали Беркакит-Томмот-Якутск (1985 г. – начало строительства – 0 км (рис. 2), 1992 г. – укладка «золотого звена» на станции Алдан – 294 км, 1995 г. – укладка «золотого звена» на станции Томмот – 376 км, 2005 г. – начало строительства от станции Томмот) по социально-экономическим и иным причинам в какой-то мере определило эксплуатационную надежность железнодорожного пути [1]. Например, высокая деформативность на участке Беркакит-Томмот (км 0-375) в значительной степени обусловлена тем, что действующие около 40 лет технические указания по изысканиям, проектированию и постройке железных дорог в районах вечной мерзлоты как и специально составленное для БАМ справочно-методическое пособие[1] не требовало гарантированного сохранения многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна [2].

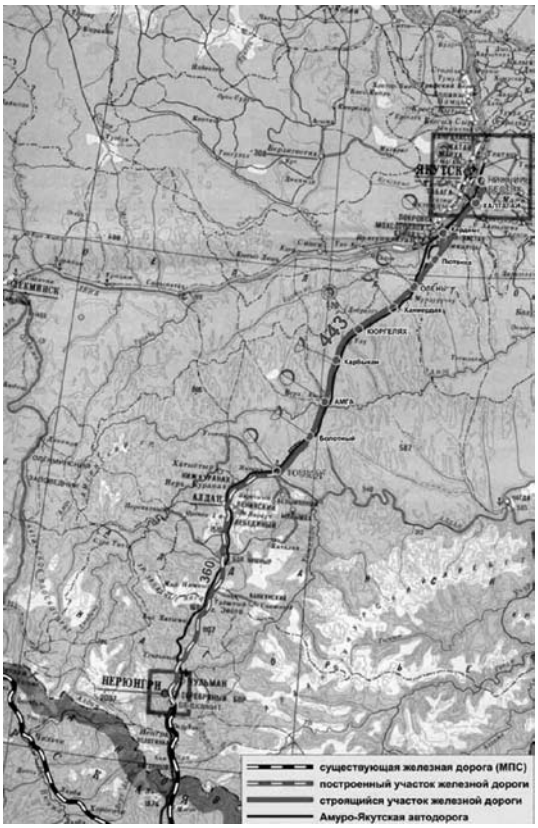


Рисунок 1 - Схема прохождения железнодорожной линии Беркакит-Томмот-Кердем.

Проектирование железной дороги на участке Томмот-Якутск (Нижний Бестях) (км 375-818) выполнялось уже с учетом опыта строительства и эксплуатации земляного полотна БАМ и предшествующего участка Беркакит-Томмот.

Поскольку деформации земляного полотна железных дорог на вечномерзлых грунтах чаще всего связаны с деградацией мерзлоты в их основании (например, на БАМ таких деформаций ~70%), при строительстве АЯМ, аналогов которому в мировой и отечественной практике не существует, использовался ряд противодеформационных сооружений, направленных на сохранение температурного режима грунтов в теле и в основании опор мостов и насыпей. Таким образом предполагалось повысить надежность устойчивости железнодорожного пути.

[1]Участок Беркакит-Томмот унаследовал многие недостатки БАМ, поскольку проектные решения земляного полотна на сильно льдистых вечномерзлых грунтах были приняты в основном по аналогии с Восточным участком БАМ (Тында-Ургал).

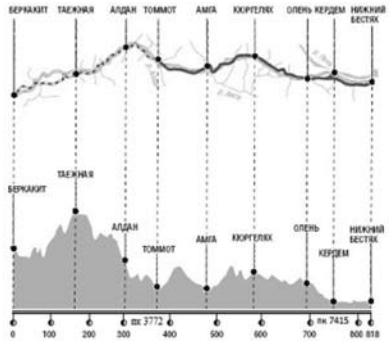


Рисунок 2 - План и профиль трассы Беркакит-Томмот-Якутск.

Однако, в результате рекогносцировочных и инженерно-геологических исследований, проводимых в 2010-2011 гг. в полосе строительства АЯМ на участке железной дороги Томмот-Кердем, отмечается некоторая «неэффективность» применяемых на рассматриваемой отрезке железнодорожной линии технических решений, в частности, ввиду недостаточного внимания к процессам криогенного выветривания грунтов, слагающих насыпь.

Современное состояние этого вопроса, применительно к протяженным инженерным сооружениям, отличается слабой разработанностью. Достаточно сказать, что до сих пор нет критериев учета интенсивности выветривания горных пород во времени. Вместе с тем, изучение этого процесса связано с трудностями методического характера – достаточно сложно из множества неблагоприятных инженерно-геологических и геокриологических факторов, влияющих на устойчивость (деформативность) железнодорожного полотна, вычленить участки сильно подверженные криогенному выветриванию, действие которого в некоторых случаях превышает воздействие других разрушающих явлений [3,4,5]. Авторами предприняты попытки в решении этого вопроса.

Так, с учетом геологической обстановки [6,7,8,9] (в общем виде характеризующаяся следующим: на всей территории трассы развиты четвертичные отложения, являющиеся в большинстве случаев основанием железнодорожной насыпи, на большей территории они, как правило, перекрывают коренные скальные и полускальные породы и представлены разновозрастными образованиями от нижнечетвертичных до современных; в пределах конечного участка в долине р. Лена основание земляного полотна сложено исключительно рыхлыми неоген-четвертичными породами; основной комплекс представленных в полосе строительства пород - это карбонатные горные породы нижнего кембрия – км 385-630, нижне- и среднекембрийские горные породы, перекрытые нижнеюрскими терригенными породами – км 630-700) и натурных наблюдений в полосе строительства железнодорожной магистрали на участке Томмот-Кердем, условно выделяются четыре «состояния» железнодорожного пути:



Рисунок 3 - Противодеформационные сооружения, применяемые на железнодорожной линии Томмот-Кердем: а – каменная наброска (ПК-4420); б – солнцеосадкозащитный навес (ПК-7138); в – вертикальные устройства для аккумуляции холода (ПК-6574); г – поперечные охлаждающие трубы (ПК-7212).



Рисунок 4 - Некоторые «неблагоприятные явления», отмеченные на линии Томмот-Кердем: а – использование песка для возведения насыпи с последующей отсыпкой крупнообломочным грунтом незначительной мощности (ПК-7897); б – развитие термокарстового озера в полосе строительства железной дороги (ПК-7751); в – деформация насыпи в виде просадок (ПК-6815), г – развитие трещин отседания на железнодорожной насыпи (ПК-6814).

1. Весьма устойчивое – участки с благоприятными орогидрографическими, инженерно-геологическими и геокриологическими условиями. Деформации земляного полотна минимальны или отсутствуют.

2. Устойчивое за счет применения противодеформационных сооружений, предусматривающие регулирование соотношения охлаждающих и отепляющих факторов с целью понижения среднегодовой температуры и сохранения их в многолетнемерзлом состоянии на протяжении всего времени эксплуатации пути – солнцеосадкозащитный навес, поперечные охлаждающие трубы, пленочный экран, вертикальные устройства для аккумуляции холода (рис. 3).

3. Неустойчивое – участки железнодорожной линии построенные с не полностью учтенными инженерно-геологическими и геокриологическими особенностями территории (применение строительного камня слабоустойчивого к морозобойному растрескиванию, наличие термокарста, распространенность и мощность многолетнемерзлых пород и пр.) или с нарушением технологии строительства, например, на расстоянии 60 км до Нижнего Бестяха скальных карьеров нет, а песчаные малопригодны для отсыпки



Рисунок 5 - Деформации полотна железной дороги, вызванные разрушением строительного камня под действием процессов криогенного выветривания (слева – ПК-6574, справа – ПК-6800 – в тело насыпи укладывался геотекстиль).



Рисунок 6 - Деформация железнодорожного полотна в результате дезинтеграции пород, слагающих насыпь (ПК-7486).

насыпи – они однородны, их невозможно уплотнить (рис. 4).

4. Весьма неустойчивое – даже при использовании различных способов укрепления тела железнодорожной насыпи. На этих отрезках пути процесс криогенного выветривания выражен наиболее четко (рис. 5).

Поскольку при строительстве столь масштабного объекта как АЯМ не маловажную роль играет финансовый аспект (надо отметить, что в общей сложности за время строительства активные работы приостанавливались из-за недофинансирования 20 раз), одним из доминирующих факторов при выборе грунтов для отсыпки полотна является дальность возки строительного материала, обычно не превышающая 15 км.

Таким образом, практически вне зависимости от геокриологических условий строительства того или иного участка железнодорожной линии для отсыпки железнодорожного полотна используется узкий спектр природного камня в качестве строительного материала – это местные грунты, целесообразность использования которых на некоторых участках линии Томмот-Кердем согласно исследованиям ставится под сомнение.

Это вызвало, например, просадки насыпи на км 680 и, соответственно, дополнительный объем земляных работ (рис. 6). Стоит отметить, что степень разрушенности применяемого одного и того же типа горной породы в качестве строительного материала существенно различалась уже через первые десятки километров. Большинство наблюдавшихся последствий негативного влияния выветривания на устойчивость железнодорожной насыпи приурочены главным образом к участкам пути проходящие в пределах долин рек и ручье, и их «частота» увеличивалась с продвижением железной дороги на Север. Тогда, по результатам полевых и лабораторных исследований (работы в этом направлении авторами уже ведутся) становится возможным районировать АЯМ по условиям криогенного выветривания с выделением особо неблагоприятных областей по природно-климатическим, физико-географическим и другим характеристикам, и, тем самым, спрогнозировать «поведение» железнодорожного пути на отдельно взятом участке, обеспечивая таким образом безаварийную работу железнодорожного транспорта с минимальными материальными затратами.

Анализ состояния железнодорожной линии Томмот-Кердем выявил недоучет разрушения строительного материала в суровых климатических условиях, а отсутствие количественных критериев классификации пород по степени их выветривания, делает принципы строительства АЯМ неверными. Поэтому, вопрос выявления закономерностей разрушения грунтов, слагающих земляную насыпь под воздействием выветривания, на сегодняшний день остается открытым, его решение позволит повысить устойчивость протяженных сооружений в обстановках экстремального климата, в частности, следующих объектов АЯМ.

Список литературы

1. Кондратьев В.Г., Позин В.А., Шолин В.В. Об эксплуатационной надежности земляного полотна железнодорожной линии Беркакит - Томмот - Якутск на вечномерзлых грунтах // Трансп. стр-во. - 1997. - № 11.

2. Белозеров А.И. проблемы и методы достройки железнодорожного участка Томмот – Нижний Бестях Амуро-Якутской магистрали. – Новосибирск: НИИЖТ, 1988.

3. Алексеев В.Р., Каменский Р.М., Самохин А.В. Геокриологический мониторинг на железнодорожном транспорте. Методические рекомендации. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 1999.

4. Забелин А.В., Павлов С.С. Влияние криогенного выветривания на геотехнические системы Южно-Якутского региона // Горнодобывающая Якутия на рубеже 111-го тысячелетия. Сборник научных трудов. - Якутск: Изд-во Якутского ун-та, 2000. - С. 40 - 44.

5. Выркин В.Б. Климатические факторы криогенного выветривания горных пород в Сибири и на дальнем Востоке // Гляциология Восточной Сибири.- Иркутск: Изд. Ин-та географии СО РАН, 1983.

6. Южная Якутия. М. Изд-во МГУ, 1975.

7. Геология Якутской АССР. М., «Недра», 1981.

8. Выркин В.Б. Климатические факторы криогенного выветривания горных пород в Сибири и на дальнем Востоке // Гляциология Восточной Сибири. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 1983.

9. Тектоника, геодинамика и металлогения территории республики САХА (Якутия). – М.: МАИК «Наука/ Интерпериодика», 2001.

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ ЗДАНИЙ ЯКУТСКОЙ ТЭЦ

С.И. Заболотник, П.С. Заболотник

Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН, г. Якутск
e-mail: zabolotnik@mpi.ysn.ru

Проведён анализ многолетних (с 1982 по 2009 гг.) исследований состояния криолитозоны на территории Якутской ТЭЦ. Для получения кондиционных результатов в отдельные периоды осуществлялись ежемесячные измерения температуры грунтов более чем в 40 скважинах глубиной от 4 до 16 м. Измерения проводились как под зданиями, так и вдоль стен на прилегающих к ним участках. В настоящее время под всеми зданиями имеются таликовые зоны. Наиболее высокая температура (до 12°С) и мощность (до 23 м) талика установлена около циркуляционной насосной станции. Талик распространяется вокруг неё на 25-30 м и захватывает южный угол главного корпуса. Под зданием водогрейных котлов мощность талика не превышает 17-20 м, а средние годовые температуры были не выше 2,5°С. Этот же талик узкой полосой простирается до углекислотного цеха, распространяясь под его южную половину. Вокруг этой части здания многолетнемёрзлые грунты оттаяли до 12,0-19,5 м, а средняя годовая температура в оттаявшем слое достигала 1,7-1,8°С. Около восточной части здания химводоочистки и под ней оттаявшие ранее грунты к 2009 году промёрзли сверху до 7,0-8,2 м. Ниже сохранился талый горизонт, средняя годовая температура которого на глубине 10-11 м достигала 1,0-1,5°С. Несмотря на большое количество таликов, на большей части ЯТЭЦ грунты находятся в многолетнемёрзлом состоянии. Средняя годовая температура их в интервале 4-10 м под главным корпусом изменялась от близких к нулю значений до -3,9°С. В последние годы площади таликовых зон немного сократились, что свидетельствует о постепенном восстановлении температурного режима грунтов в основании сооружений.

Введение

Якутская центральная электрическая станция (ЯЦЭС) была введена в постоянную эксплуатацию 7 ноября 1937 года и с тех пор обеспечивает город Якутск электроэнергией, а с 1961 г. и теплом [1].

Здание ЯЦЭС является первым промышленным объектом страны, построенным по принципу сохранения вечномёрзлых грунтов в качестве его основания. Не случайно поэтому её первая очередь возводилась под постоянным контролем и при участии мерзлотоведов, среди которых были ведущие учёные страны: член-корреспондент АН СССР профессор Н.А. Цытович; кандидат технических наук (в дальнейшем доктор, профессор) Н.И.Салтыков; кандидат технических наук В.Ф. Жуков и кандидат геолого-минералогических наук (впоследствии – академик АН СССР, директор Института мерзлотоведения СО АН СССР) П.И. Мельников.

Сохранение многолетнемёрзлого состояния грунтов основания было обеспечено путём установки здания на колонны, поднимающие его над поверхностью земли. Между поверхностью грунта и зданием было оставлено сквозное проветриваемое подполье высотой 1,2-1,8 м, предназначенное для защиты грунтов основания от глубокого оттаивания под воздействием внутреннего тепла здания, а также для накопления запасов холода в них в зимнее время.

Фундаменты первой очереди ЯТЭЦ представляют собой отдельно стоящие (через 5-7 м) железобетонные колонны с башмаками. В зависимости от запроектированной нагрузки колонны имеют сечение от 30х30 до 80х80 см, а башмаки основания – от 130х130 до 317х317 см. Фундаменты установлены на глубину 4,5 м от поверхности площадки на ростверк, состоящий из двух рядов лиственничных брусьев сечением 20х20 см, уложенных в перекрёстном направлении. Фундаменты под турбогенераторы выполнены в виде сплошных бетонных плит площадью около 60 м^2 и толщиной 1 м, уложенных на ростверк из расположенных в перекрёстном направлении пяти рядов лиственничных брусьев. Кирпичные стены здания покоятся на мощных железобетонных монолитных рандбалках, которые жёстко связаны с колоннами [2].



Рисунок 1 - Проветриваемое подполье под юго-восточной частью главного корпуса. Фото С.И. Заболотника, 5 ноября 2009 г.

Все работы по подготовке котлованов, установке фундаментных колонн и плит, а также засыпке их грунтом производились в зимнее время. Одновременно происходило и промораживание вскрытых котлованов. Засыпка котлованов производилась мёрзлым грунтом из отвалов слоями по 20-25 см. Пустоты между комьями мёрзлого грунта заполнялись сухим песком, а образовавшаяся после этого масса утрамбовывалась. Непосредственное пространство вокруг колонн заполнялось песчано-гравийным грунтом.

В связи с постоянным увеличением сети тепловых магистралей в 1969 г. ЯЦЭС была реорганизована в Якутскую теплоэлектроцентраль - ЯТЭЦ. Кроме того, с ростом города ему требовалось и больше электроэнергии. Поэтому неоднократно

проводилось расширение и реконструкция зданий ТЭЦ, комплекс которых приведён в соответствие с современными требованиями. Во время этих работ неукоснительно соблюдался первый принцип строительства – сохранение многолетнемёрзлого состояния грунтов основания.

Инженерно-геокриологическая характеристика территории ЯТЭЦ

Якутская ТЭЦ находится в северо-восточной части Якутска на берегу городской протоки р. Лены. Она расположена на аллювиальной террасе, возвышающейся над уровнем меженных вод на 9-10 м и имеющей ширину около 3 км (рис.2).



Рисунок 2 - Общий вид Якутской ТЭЦ. Фото С.И. Заболотника, 5 ноября 2009 г.

Центральная Якутия, в пределах которой находится г. Якутск, относится к области сплошного распространения многолетнемёрзлых пород (ММП), мощность которых в регионе изменяется от 100 до 300 м, а средняя годовая температура их на глубине 20 м - от -2 до -4°С [3].

В районе ЯТЭЦ по данным Н.И. Салтыкова мощность вечномёрзлой толщи достигала 180-200 м, а средние годовые температуры грунтов на глубине 15 м непосредственно на площади застройки до возведения сооружений изменялись от -3 до -5°С. Через десять лет после заложения фундаментов по наблюдениям П.И. Мельникова температура грунтов на глубине 5 м изменялась от -3,2 до -3,6°С, а мощность сезоннопротаивающего слоя уменьшилась на 0,8 м и не превышала 1 м [2].

Площадка вокруг главного корпуса ЯТЭЦ и ряда других служебных помещений частично асфальтирована и до глубины 1-4 м представлена насыпным грунтом из разнозернистых песков, реже суглинков с примесью щебня, гальки и шлака. Ниже повсеместно залегают аллювиальные отложения, представленные мелкозернистыми песками, часто переслаивающимися со средне- и крупнозернистыми. В верхней части разреза (до 11-15 м) встречаются отдельные горизонты супесей, линзы и прослои суглинков, супесей и тонкозернистых песков, а также включения растительного детрита.

Влажность песчаных грунтов преимущественно изменяется от 20 до 30%, а плотность их – от 1700 до 2040 кг/м3. В прослоях с большим количеством растительного детрита, а также в супесчано-суглинистых грунтах влажность возрастает до 40, а иногда и до 60-70%, а плотность уменьшается до 1460-1500 кг/м3. Плотность частиц грунтов является достаточно стабильной величиной. Для песков и супесей она была равна 2640-2660, а для суглинков – 2690 кг/м3 [4].

Грунты на площадке ЯТЭЦ незасоленные. Химический анализ водной вытяжки образцов, отобранных на таликовых участках, показал, что сумма минеральных веществ в них составляет всего 0,02-0,07%. Солевой состав талых и мёрзлых грунтов неоднороден. Водные вытяжки талых грунтов преимущественно хлоридно-гидрокарбонатные натриевые, слабощелочные (pH = 7,4-7,7), а поровые растворы мёрзлых грунтов – гидрокарбонатные смешанные по составу катионов и более щелочные (pH = 7,5-9,0). Это обусловлено по–видимому криогенной метаморфизацией водных растворов.

За исключением участков локальных таликов отложения на территории ЯТЭЦ находятся в многолетнемёрзлом состоянии. Мощность слоя сезонного промерзания в зависимости от степени растепления участков изменяется от 1,5 до 4 м. Глубина сезонного протаивания грунтов составляет 2,2–2,8 м около северной стороны зданий и возрастает до 2,5–4,6 м вблизи южной. Непосредственно под главным корпусом она изменялась от 1,0 до 3,0–4,4 м.

Результаты и их обсуждение

В течение первых 29 лет эксплуатации Якутской ТЭЦ под зданиями, а также на примыкающих к ним участках сформировалась обширная таликовая зона (рисунок 3).

Основные причины образования талика – это тепловыделение от заглубленных объектов и утечки горячих производственных вод непосредственно в грунты основания, а также вдоль линии их сброса из дефектных дренажных труб, канализационной сети и других коммуникаций.

Для промораживания грунтов основания под главным корпусом около части его стены, в непосредственной близости от которой находится циркуляционная насосная станция, в 1967 году были установлены и пущены в работу 6 многотрубных сезоннодействующих охлаждающих установок (СОУ) системы С.И. Гапеева с объёмом по 500 л керосина каждая (см. №№ 1-6 на рис. 3). В 1973 г. уже с трёх сторон этого здания были установлены ещё 17 аналогичных установок. СОУ были размещены на расстоянии 1,7-3,5 м от стен здания с шагом от 2,9-3,1 до 5-7 м. Согласно заключению «Сибтехэнерго» [6] установленные на ЯТЭЦ СОУ за две зимы понизили температуру грунтов на глубине 6 м

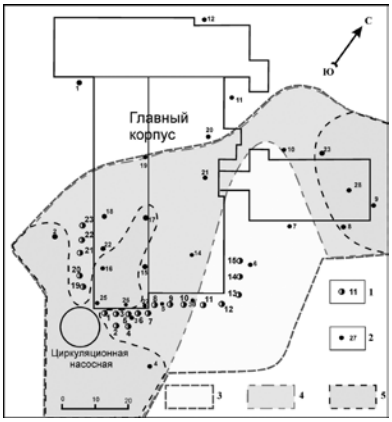


Рисунок 3 - Схема расположения СОУ, наблюдательных скважин и границ таликов. 1 – СОУ и её номер, 2 – скважина и её номер, 3 – границы талика в 1976 г.[5], 4 - граница талика в 1978 г.[6], 5 – границы таликов в 1986 г.[7].

от положительных значений до -3°С. Сам автор изобретения в статье, опубликованной в 1983 году, сообщает, что: «Внедрение … многотрубных автоматически действующих охлаждающих установок позволило … восстановить мёрзлое основание и усилить его под деформирующимися зданиями ЯТЭЦ» [8, с. 54].

Ввод в действие СОУ действительно усилил мерзлотный режим грунтов в непосредственной близости от них. Однако полного ожидаемого эффекта по промораживанию оснований фундаментов получить не удалось. Одной из главных причин этого является то, что установки были установлены на достаточно большом расстоянии, как от стен здания, так и между ними. На основе результатов многочисленных опытных данных Л.Н. Хрусталёв, О.М. Янченко и Л.А. Наумова сделали вывод, «что в зависимости от климатических и мерзлотно-грунтовых условий удаётся достичь замораживания грунта в радиусе от 1 (Красноярск) до 2,5 м (Воркута)» [9, с.5]. Аналогичные сведения по радиусу промораживания грунтов с помощью СОУ за один зимний сезон приводят Ю.С. Миренбург, Ю.Г. Федосеев [10] и Ю.А. Александров [11]. Следовательно, было мало шансов проморозить талик под зданием, так как большинство СОУ находились или около, или за пределами радиуса их действия.

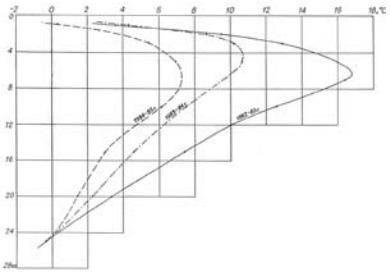


Рисунок 4 - Изменение средних годовых температур грунтов около торца здания водогрейных котлов с октября 1982 по сентябрь 1985 г.

Подтверждение тому, что талик под главным корпусом проморозить полностью не удалось, мы получили во время проведения собственных исследований на территории ЯТЭЦ. Измерения температуры грунтов в скважинах №№ 3, 5 и 30, находящихся в непосредственной близости от СОУ (около 1 м), показали, что с октября 1982 по февраль 1986 г. температура грунтов в интервале глубин от 5 до 14 м изменялась от -0,5 до -6,9°С. Тем не менее, непосредственно под южным углом главного корпуса, вокруг которого с наружной стороны установлены СОУ, талик сохранился (см. рис. 3), а температура грунтов с мая 1985 по апрель 1986 года на глубине 4 м изменялась от -0,4 до +1,8°С [7].

Промораживанию талика в этом месте в значительной мере препятствовали постоянные тепловыделения от заглубленной более чем на 10 м циркуляционной насосной станции и полузаглубленных трубопроводов, а также периодически продолжавшиеся утечки горячей воды и заполнение льдом проветриваемого подполья.

Утечки горячей воды из различных систем и агрегатов оказывают довольно сильное воздействие на многолетнемёрзлые породы, как в основании сооружений, так и на прилегающей к ним территории. Они наблюдались нами из торца пристроя к главному корпусу под котельное отделение во время исследований с 1982 по 1985 годы. В результате мёрзлые породы в этом месте (см. рис. 3, скв.9) оттаяли на глубину 24,5 м, а талик распространился далеко под здание и вокруг него. Периодические поступления горячей воды в грунты под здание приводили к значительному повышению температуры грунтов. В отдельные сроки на глубине 9 м она превышала 20°С и изменялась в широком диапазоне: от +20,4 до +50,7°С! В итоге средняя годовая температура грунтов повысилась от отрицательных значений до +17°С. После ликвидации продолжительных утечек происходило постепенное восстановление температурного режима грунтов. Тем не менее, за три года наблюдений оно было ещё достаточно далеко от завершения. Средняя годовая температура грунтов за период с октября 1984 по сентябрь 1985 г. на глубине 6 м была ещё выше + 7°С (рисунок 4).

Предотвращение и своевременное устранение утечек воды было одной из главных задач для руководства ЯТЭЦ в течение всего периода её эксплуатации. При этом основная проблема состоит в том, что утечки воды были практически неизбежны, поскольку все коммуникации были выполнены из железных труб. А такие трубы довольно быстро ржавеют и выходят из строя (особенно при транспортировке горячей воды). Кроме того утечки зачастую возникают в малозаметных и в труднодоступных местах. Конечно, химическая очистка воды удлиняет срок службы труб, однако не гарантирует длительную безаварийную их эксплуатацию.

Отепляющий эффект от утечек воды непосредственно под здания проявлялся не только в летнее время, но и зимой, так как замерзающая вода постепенно заполняла проветриваемое подполье. В результате образующаяся наледь с одной стороны действовала как изолятор, предохраняя основания от охлаждения наружным воздухом, а с дугой – перекрывая подполье, вообще исключала циркуляцию воздуха под зданием. В 80-ые годы прошлого столетия наледи достигали значительных размеров. По нашим наблюдениям в конце марта 1986 г. наледь под главным корпусом составляла единое поле, общий объём льда в котором превышал 600 м3, и она практически полностью заполняла проветриваемое пространство (рис. 5, 6).

В результате воздействия многих факторов на территории ЯТЭЦ сформировалась довольно сложная мерзлотная обстановка. Для выяснения степени влияния каждого сооружения и возможности восстановления предпостроечного состояния грунтов в их основаниях Институт мерзлотоведения СО АН СССР (ИМЗ), как уже упоминалось выше, ещё с 1982 года начал проводить там в отдельные периоды систематические измерения температуры грунтов. С 1982 по 2007 гг. работы проводились ежемесячно лишь в отдельные периоды: июнь 1982 – март 1986 гг., май – июнь 2002 г., август 2005 – январь 2007 гг. С ноября 2007 года температуры грунтов измеряются каждый месяц

без перерыва до настоящего времени. Для этих целей буровой бригадой ИМЗ вокруг главного корпуса ТЭЦ и около здания химводоочистки в 1982 г. было пройдено 12 скважин глубиной от 14 до 26 м, в 1985 г. – ещё 4 скважины глубиной от 9 до 15 м. Кроме того, было пройдено ещё 9 скважин глубиной от 6 до 15 м непосредственно под главным корпусом. В 2005-2006 гг. были пробурены ещё 17 скважин глубиной от 11 до 25 м. Кроме того, 20 скважин были пройдены ЯкутТИСИЗом и другими организациями, в том числе 12 – под зданием водогрейных котлов глубиной по 4 м.



Рисунок 5 - Заполненное льдом подполье под восточной частью главного корпуса. Фото Н.И. Новикова, 27 марта 1986 г.



Рисунок 6 - Наледь под центральной частью главного корпуса около скв. 19 (см. рис.3). Фото Н.И. Новикова, 27 марта 1986 г.

Все скважины были подготовлены нами для долговременных геотермических измерений. Для этого они были обсажены герметично заваренными (снизу и на стыках) металлическими трубами диаметром 40-50 мм. Сверху обсадные трубы закрыты изготовленными в мастерских ЯТЭЦ нарезными крышками. Для предотвращения попадания наружного воздуха, особенно в зимнее время, затрубное пространство засыпано сухим песком. Во избежание случайного повреждения скважин, обсадные трубы заметно (на 0,5-1,2 м) выступают над поверхностью грунта.

Измерения температуры грунтов в скважинах проводились с помощью полупроводниковых терморезисторов, смонтированных в специальные термоустановки в соответствии с разработанным в ИМЗ СО РАН Руководством [12].

К настоящему времени сохранились далеко не все скважины. К сожалению, во время очистки проветриваемого подполья ото льда, проведения ремонтных работ и возведения пристроя к зданию водогрейных котлов были уничтожены 25 скважин, в том числе 12 – под зданиями. Тем не менее, оставшиеся в рабочем состоянии 37 скважин (рис. 7) позволяют дать оценку изменений температурного поля грунтов.

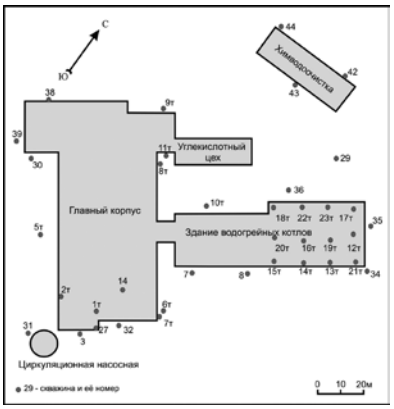


Рисунок 7 - Схема расположения скважин, в которых проводились измерения в 2008-2009 гг.

Современное представление о температурном режиме грунтов в основаниях и вокруг основных производственных сооружений можно получить по результатам наблюдений в 2008-2009 гг. Двухгодичный цикл ежемесячных измерений позволил не только установить состояние криолитозоны на территории ЯТЭЦ, но и определить динамику развития мерзлотных процессов. К концу периода измерений на большей части её сохранилось или было восстановлено мёрзлое состояние грунтов.

Наиболее низкие температуры грунтов были выявлены вокруг западного угла главного корпуса. В интервале глубин 4-10,5 м в 2008 году они изменялись от -3,5 до -2,4°С, а в 2009 году – понизились на 0,9-0,2°С и варьировали от -3,9 до -2,8°С (рис. 8). Это свидетельствует о том, что под этой частью здания и вокруг неё почти восстановилось предпостроечное состояние многолетнемёрзлых пород. Такие низкие температуры обусловлены тем, что в этой части главного корпуса располагаются только административные службы, и здесь нет агрегатов с большим тепловыделением. Естественно, что в этом месте влияние здания на подстилающие грунты минимально.

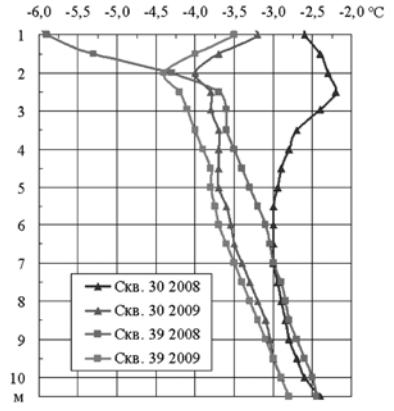


Рисунок 8 - Средние годовые температуры грунтов около западного угла главного корпуса.

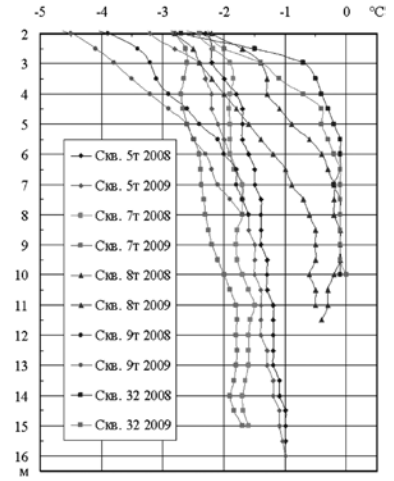


Рисунок 9 - Средние годовые температуры грунтов вокруг основной части главного корпуса.

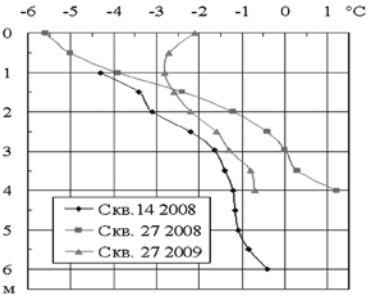


Рисунок 10 - Средние годовые температуры грунтов под главным корпусом вблизи таликовой зоны.

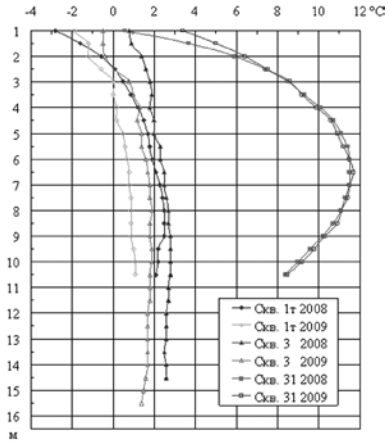


Рисунок 11 - Средние годовые температуры в талике вокруг насосной станции.

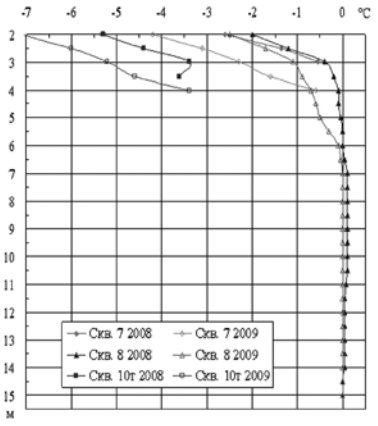


Рисунок 12 - Средние годовые температуры грунтов около примыкающей к главному корпусу части здания котельной.

Понижение температуры в течение второго года в основном обусловлено тем, что средняя годовая температура воздуха в 2009 году стала на 0,7°С ниже, чем в 2008.

Вокруг бóльшей части главного корпуса, где расположено основное технологическое оборудование, средние годовые температуры стали существенно выше. Глубже 4 м они изменялись от -2,9 до 0°С в 2008 г., а в 2009 г. минимальные температуры понизились до -3,2°С (рис. 9).

Непосредственно под главным корпусом в мёрзлых грунтах сохранились только скважины 14 и 27 глубиной 4-6 м (см. рис. 7), расположенные вблизи границы с таликовой зоной, которая образовалась под его южным углом. Естественно, что температуры грунтов под этой частью здания более высокие. Ниже уровня расположения основания фундаментных опор температура ММП в 2008 г. изменялась от -1,2 до -0,4°С (рис.10, скв. 14). К сожалению, вмороженные в скважине 14 в грунт термисторы, в ноябре 2008 г. вышли из строя. Скважина 27 вскрыла талик на глубине 3 м, средняя годовая температура которого в 2008 году на глубине 4 м достигала +1,2°С. В 2009 г. площадь этого талика сократилась, и средняя годовая температура на подошве слоя сезонного протаивания понизилась до -0,7°С (рис 10, скв. 27).

К южному углу главного корпуса примыкает здание циркуляционной насосной станции, подземная часть которой заглублена более чем на 10 м. Отапливаемое заглубленное помещение станции является постоянным источником тепла большой мощности. Длительное тепловое излучение из неё привело к тому, что грунты вокруг оттаяли на значительную глубину. В июле 2005 г. при бурении скважины 31, расположенной в непосредственной близости от станции было установлено, что грунты оттаяли до глубины 23 м, а таликовая зона вокруг неё распространилась не менее чем на 25 м и захватила южный угол главного корпуса. В 2008 и 2009 годах средняя годовая температура грунтов в 1,5 м от насосной станции была положительной во всём диапазоне измерений. В интервале 4-10,5 м она была постоянно выше +8°С и достигала почти +12°С (рис. 11, скв. 31).

Под южным углом главного корпуса и около внешней стороны стены, скважины расположены в 10-20 м от циркуляционной насосной станции. Естественно, что там средние годовые температуры грунтов уже не столь высокие. В 2008 году они не превышали +2,8°С, а в 2009 г. были ниже +2,0°С (рис. 11, скв. 1т и 3).

Пристроенное в 1978 г. к юго-восточной стене главного корпуса здание водогрейных котлов также расположено на мёрзлых и на талых грунтах. Многолетнемёрзлые породы сохранились только под примыкающей к главному корпусу частью здания. К сожалению, в скважинах 7 и 10т, расположенных снаружи около стен здания, с глубины 3-4 м образовались пробки, что не позволило определять температуру грунтов ниже оснований фундаментов. Тем не менее двухгодичный цикл наблюдений позволяет оценить мерзлотную обстановку и в местах их расположения.

Как и следовало ожидать, наиболее низкие температуры грунтов были установлены около стены котельной, затенённой с запада, юга и востока. Ниже слоя сезонного протаивания, максимальная мощность которого не превышала 3 м [4], средние годовые температуры грунтов изменялись от -3,4 до -5,2°С (рис.12, скв. 10т).

Около юго-восточной стены здания водогрейных котлов средние годовые температуры грунтов в скважине № 7, расположенной вблизи главного корпуса, были на 2,7-2,9°С выше. По мере приближения к пристроенной в 1989 году части здания, под которой расположены скважины 12т – 23т (см. рис. 7) температуры грунтов в 2008 году оставались в отрицательном диапазоне только до глубины 5,5 м. В интервале от 5,5 до 15 м грунты были талыми, однако средняя годовая температура их была не выше +0,1°С. В 2009 году в верхнем пятиметровом слое произошло понижение температуры на 0,5-0,7°С, ниж-

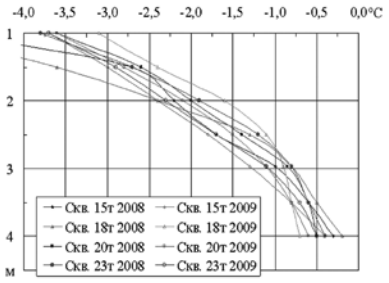


Рисунок 13 - Средние годовые температуры мёрзлых грунтов по краям талика под пристроем к зданию водогрейных котлов.

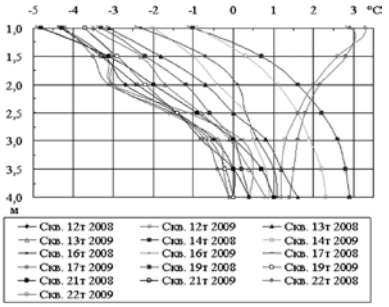


Рисунок 14 - Средние годовые температуры талика под пристроем к зданию водогрейных котлов.

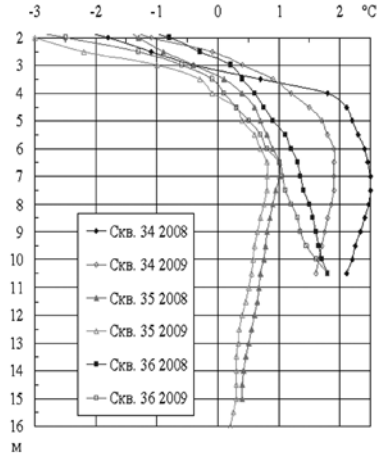


Рисунок 15 - Средние годовые температуры талых грунтов вокруг здания водогрейных котлов.

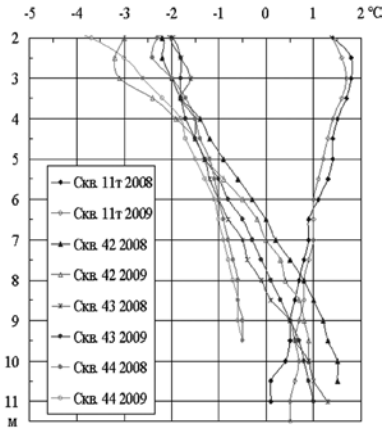


Рисунок 16 - Средние годовые температуры грунтов около УКЦ (скв. 11т) и вокруг здания химводоочистки (скв. 42-44).

няя граница мерзлоты опустилась до 6,5 м, а глубже образовалась нулевая зона (см. рис. 12, скв. 8).

Под упомянутым выше пристроем к зданию водогрейных котлов талик сформировался ещё до начала его строительства. Хотя перед возведением нового корпуса котлован промораживался в зимнее время, талик сохранился здесь и до настоящего времени. К сожалению, при подготовке котлована 25-метровая скважина 9 и скважина 28 (см. рис. 3) были уничтожены. Вместо них были пробурены 12 новых скважин, но только 4х-метровой глубины (см. рис. 7, скв. 12т-23т).

Вокруг таликовой зоны под этой частью здания средние годовые температуры мёрзлых грунтов оставались достаточно высокими. На глубине 4 м в 2008 г. они изменялась от -0,2 до -0,5°С, а в 2009 г. – понизилась до -(0,4-0,7)°С (рис. 13).

Непосредственно в талике средние годовые температуры грунтов в 2008 году на глубине 4 м изменялись от 0 до +2,9°С. В 2009 году они уже не превышали +2,3°С, а под северным углом здания в (см. рис. 7, скв. 17т, 12т и 19т) понизились до -0,1°С (рис. 14). На основании этого можно сделать вывод о том, что под зданием водогрейных котлов началось промерзание талой толщи сверху.

Мощность талика по таким мелким скважинам определить невозможно. Однако мы можем оценить её по 10-16-метровым скважинам, пробуренным нами в 2005 г. вокруг этой части здания (см. рис. 7). Установлено, что здесь максимальные значения средних годовых температур грунтов были в интервале 6,5-8,0 м и не превышали +2,5°С в 2008 году и +1,9°С – в 2009 г. Что касается мощности талика, то можно с большой долей вероятности утверждать, что она составляет 17-20 м (рис. 15).

Таликовая зона от здания водогрейных котлов узкой полосой протягивается до углекислотного цеха (УКЦ) и захватывает его южную часть. Непосредственно под УКЦ скважин нет, однако две (скв. 37 и скв. 11т), расположенные с двух сторон в непосредственной близости от его стен, были пройдены в талых грунтах.

При бурении скважины 37, расположенной около восточного угла здания, в августе 2005 г. до глубины 19,5 м был вскрыт талик, температура которого на глубине 8-10 м в 2005-2006 гг. изменялась от +1,0 до +2,0°С. К сожалению, в июне 2006 г. по неосторожности работников ЯТЭЦ эта скважина была уничтожена. В месте примыкания углекислотного цеха к главному корпусу средняя годовая температура грунтов в 2008 г. в интервале 2-11 м изменялась от +1,8 до +0,1°С, а верхняя граница многолетнемёрзлых пород находилась предположительно на глубине 12 м. Однако в 2009 году в месте примыкания УКЦ к главному корпусу произошло очередное растепление грунтов. На глубинах 11-11,5 м температура грунтов повысилась до +0,5°С и, следовательно, мощность талика снова увеличилась (рис. 16, скв 11т).

Здание химводоочистки (ХВО) находится на удалении от основных производственных корпусов. Измерения температуры в расположенных вокруг него трёх скважинах (см. рис. 7), показали, что под слоем сезонного протаивания на всю глубину мёрзлые грунты находятся только под его западной частью. Однако средняя годовая температура грунтов достаточно высокая. Кроме того, она повышается с глубиной, достигая -0,5°С на глубине 9,5 м (рис. 16, скв. 44).

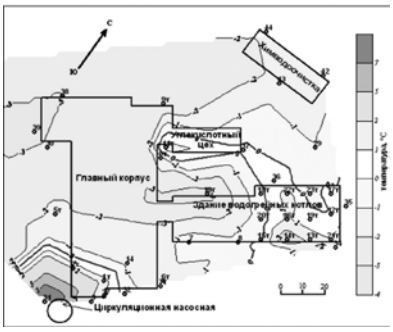


Рисунок 17- Средние годовые температуры грунтов на глубине 4 м в 2008 году.

Вокруг восточной части здания ХВО мёрзлые породы в 2008 году залегали под слоем сезонного протаивания, составляющего 2,9 м [13] , только до глубины 6,5-8,2 м. В 2009 году около северной стены температуры грунтов понизились, а около южной, наоборот, повысилась. В результате нижняя граница ММП стала находиться на глубине от 7 до 7,8 м. Средняя годовая температура подстилающих талых грунтов в интервале глубин от 9,5 до 11 м достигала +1,0-1,5°С (см. рис. 16, скв. 42-43).

Двухгодичный цикл измерений позволил определить характер изменения состояния криолитозоны на территории ЯТЭЦ. Анализ средних годовых температур грунтов показывает, что площади распространения таликов под зданиями до настоящего времени остаются достаточно большими. В 2008 году фундамен-

ты южного угла главного корпуса, восточной части здания водогрейных котлов и юго-восточной части углекислотного цеха опирались на талые грунты (рис. 17).

Как уже указывалось выше средняя годовая температура воздуха в 2009 г. стала на 0,7°С ниже, чем в 2008 году. Это отчасти повлияло на изменение температурного режима грунтов в основании фундаментов всего комплекса сооружений. В частности, понизились температуры грунтов под восточной частью главного корпуса, а под южным его углом немного сократилась площадь таликовой зоны (рис. 18).

Следует отметить, что отепляющее влияние циркуляционной насосной станции настолько велико, что оттаявшие грунты под примыкающей к ней частью главного корпуса можно проморозить только в случае проведения специальных мероприятий. По расчётам Г.П. Кузьмина при устранении причин, вызвавших образование и распространения талика, только за счёт воздействия проветриваемого подполья он промёрзнет через 20 лет. Если же применить дополнительное зимнее охлаждение грунтов основания наружным воздухом через заглубленные трубы, то промерзание талика может произойти уже через 15 лет. То же самое произойдёт, если здание циркуляционной насосной перенести на достаточное удаление от главного корпуса, а в освободившееся помещение в зимнее время обеспечить доступ холодного наружного воздуха. В этом случае заглубленная в грунт насосная станция будет действовать как сезоннодействующее охлаждающее устройство, и мощный талик вокруг неё промёрзнет уже через 15 лет [14].

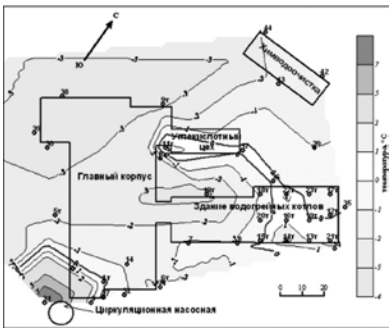


Рисунок 18 - Средние годовые температуры грунтов на глубине 4 м в 2009 году.

Под зданием водогрейных котлов также произошло небольшое сокращение площади талика. Частично он промёрз в верхней части со стороны примыкания к главному корпусу, а, кроме того, под северным углом здания (рис. 18).

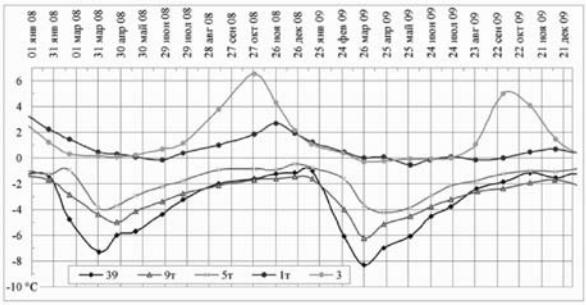


Рисунок 19 - Изменения температуры грунтов на глубине 4 м под главным корпусом с января 2008 г. по декабрь 2009 г.

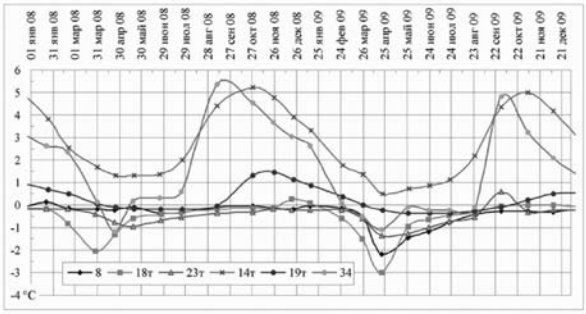


Рисунок 20 - Изменения температуры грунтов на глубине 4 м под зданием водогрейных котлов с января 2008 г. по декабрь 2009 г.

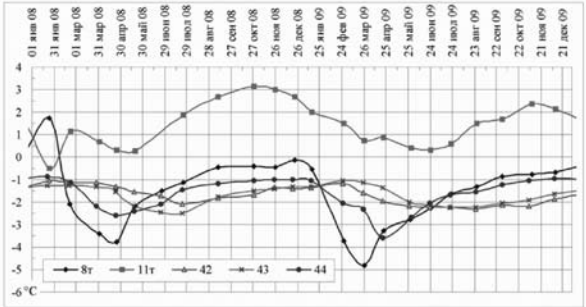


Рисунок 21 - Изменения температуры грунтов на глубине 4 м под зданиями углекислотного цеха и химводоочистки с января 2008 г. по декабрь 2009 г.

Что касается здания углекислотного цеха, то существенных изменений в температурном режиме прилегающих грунтов за два года не обнаружено. В основном это обусловлено периодически происходящими утечками воды в грунты основания.

Для решения вопроса о возможности промораживания грунтов в основании фундаментов УКЦ и заглубленного талика под зданием ХВО необходимо в первую очередь полностью исключить утечки производственных вод и перекрыть пути их транспортировки с других участков. В дальнейшем следует провести целый комплекс дополнительных исследований для выявления наиболее эффективного и наименее затратного способа восстановления мёрзлого состояния грунтов под этими сооружениями.

Результаты многолетних исследований показывают, что вокруг основных производственных зданий и под ними произошло значительное растепление грунтов. Несмотря на то, что площади таликов к 2009 году существенно сократились по сравнению с наблюдаемыми с 1976 по 1986 гг. (см. рис. 3, 17 и 18), их размеры остаются ещё достаточно большими. Естественно, что всё это сказалось на несущей способности грунтов в основании зданий и сооружений. Даже под западным углом главного корпуса, где почти сохранилось предпостроечное состояние грунтов, на глубине 4 м (близкой к глубине заложения фундаментов) в 2008-2009 гг. температура грунтов с марта по май понижается до - 5,0 - 8,3°С, а с сентября по декабрь, то есть в тот период года, когда достигаются её максимальные значения, она повышается до -1,4 -1,0°С (рис. 19, скв 39 и 9т).

Под остальной частью главного корпуса в мёрзлых грунтах температура на глубине 4 м

колеблется от -4,2 до -0,5°С (рис. 19, скв. 5т), а в талике под его южным углом – от -0,5 до +6,5°С (рис. 19, скв. 1т и 3).

Здание водогрейных котлов расположено как на мёрзлых, так и на талых грунтах (см. рис. 17 и 18). Под той его частью, где сохранились ММП температура на глубине 4 м изменяется от -3,0 до +0,6°С (рис.20, скв. 8, 18т и 23т). В таликовой зоне диапазон колебания температур на этой глубине намного больше, а именно: от -1,2 до +5,5°С (рис. 20, скв. 14т, 19т и 34).

Почти половина углекислотного цеха также располагается на талике. Мерзлота сохранилась только под северной её частью (см. рис. 17 и 18). Здесь температуры грунтов на глубине 4 м изменяются от -4,8 до -0,2°С (рис.21, скв.8т). В таликовой части они находятся в основном в положительном диапазоне и колеблются от -0,5 до +3,2°С (рис.21, скв.11т).

Фундаменты здания химводоочистки полностью опираются на многолетнемёрзлые грунты, хотя под восточной его частью с глубины 7,0-8,2 м находится таликовая зона. Поэтому колебания температур под ним на глубине 4 м небольшие, от -3,6 до -0,9°С (рис.21, скв. 42-44).

Заключение

Таким образом, к настоящему времени на территории Якутской ТЭЦ произошли довольно сильные изменения геокриологической обстановки. Значительное растепление грунтов на застроенной территории не могло не сказаться на состоянии сооружений. Оттаивание многолетнемёрзлых пород под частями зданий приводило к неравномерным осадкам отдельных элементов конструкций, а последующее промораживание грунтов, наоборот, к их выпучиванию. По нашим наблюдениям с 1982 по 2002 гг. соблюдалась общая тенденция вертикальных перемещений фундаментов: южный угол главного корпуса и примыкающие к нему части здания, под которыми был талик, постоянно оседали, а на промерзающих участках происходило выпучивание конструкций. Хотя в годовом цикле осадки не превышали 3 мм, а выпучивание – 1,1 мм [15] подвижки фундаментов приводили к различного рода деформациям, наиболее характерными из которых являются трещины стен, частичное разрушение оголовков свай и сколы с оголённой арматуры, прогибы рандбалок.

Несмотря на всё это состояние всего комплекса сооружений остаётся достаточно стабильным. В последние годы благодаря ряду превентивных мероприятий наблюдается постепенное восстановление температурного режима грунтов в основании зданий и на примыкающим к ним участках. Однако происходит оно очень медленно и на полное восстановление мёрзлого состояния грунтов понадобятся многие многие годы. Поэтому необходим постоянный контроль температурного режима грунтов, позволяющий на его основе своевременно проводить инженерные мероприятия для обеспечения устойчивости всех сооружений Якутской ТЭЦ.

Список литературы

1. Над Леной ТЭЦ – как бригантина / В. Андриевский, О. Ступак, В. Леонов, Л. Быкова, Н. Корнилова, Е. Новоселова, А. Акимов, С. Тюнин. Под ред. Л. Завацкой, Т. Данилевской. – Красноярск: Платина, 2007. – 136 с.

2. Цытович Н.А., Салтыков Н.И., Жуков В.Ф. и Мельников П.И. Фундаменты электростанции на вечной мерзлоте (опыт проектирования, возведения и эксплоатации Якутской центральной электростанции по принципу сохранения вечной мерзлоты). – Москва-Ленинград: Изд-во Академии наук СССР, 1947. – 104 с.

3. Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. – Новосибирск: «Наука», Сибирское отделение, 1991. – 194 с.

4. Zabolotnik S.I. & Zabolotnik P.S. Ground Temperatures beneath the Buildings of the Yakutsk CHP Plant // EISOPE 2009. Proceedings of the eighth international symposium on Permafrost Engineering. 15-17 October, 2009, Xi'an, China. Resent Development of Research on Permafrost Engineering and Cold Region Environment. Ming Huo, Wei Ma & Fujun Niu (eds.). – Lanzhou University Press, 2009, p. 318-323.

5. Технический отчёт по результатам инженерно-геологических изысканий на участке расширения Якутской ТЭЦ. – Красноярск-Якутск: Объединение «Стройизыскания», КрасТИСИЗ, Якутское отделение, 1976. – 43 с.

6. Заключение по результатам обследования зданий и сооружений и изготовлению контрольного цикла наблюдений Якутской ТЭЦ / Гилевич В.Г., Неупокоев Г.Н. – Москва-Новосибирск: Производственное объединение по наладке, совершенствованию и эксплуатации электростанций и сетей «Союзтехэнерго» Министерства энергетики и электрификации СССР, предприятие «Сибтехэнерго», 1978. – 37 с.

7. Заболотник С.И., Новиков Н.И. Динамика температурного режима, сезонного и многолетнего протаивания (промерзания) грунтов и осадки фундаментов Якутской ТЭЦ. – Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1986. – 355 с.

8. Гапеев С.И. Опыт использования охлаждающих установок в районах распространения вечной мерзлоты // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1983, с. 41-58.

9. Хрусталёв Л.Н., Янченко О.М., Наумова Л.А. Опыт и перспективы использования автономных парожидкостных охлаждающих устройств в строительстве на вечномёрзлых грунтах // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1983, с. 3-12.

10. Миренбург Ю.С., Федосеев Ю.Г. Взаимодействие термосвай с промораживаемым основанием // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств. Якутск:

Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1983, с. 82-88.

11. Александров Ю.А. Опыт использования термосвай при строительстве в Воркутинском районе // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1983, с. 88-94.

12. Балобаев В.Т., Володько Б.В., Девяткин В.Н., Левченко А.И. Руководство по градуировке терморезисторов и использованию их при геотермических измерениях. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1977. – 39 с.

13. Заболотник С.И., Заболотник П.С. Температура, сезонное протаивание и промерзание грунтов под зданиями Якутской ТЭЦ и на прилегающей к ним территории. – «НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ». Якутск: АН РС (Я), 2009, № 4 (56), с. 70-75.

14. Кузьмин Г.П., Заболотник С.И., Заболотник П.С. Ефремов В.Н., Нерадовский Л.Г.. Температурный режим грунтов и деформации основания и фундаментов сооружений на территории ЯТЭЦ. – Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2007. – 265 с.

15. Заболотник С.И., Новиков Н.И. Осадка и выпучивание фундаментов Якутской ТЭЦ в процессе 35-50-летней её эксплуатации // Обеспечение надёжности, долговечности зданий и сооружений в холодных регионах: Материалы научно-практической конференции (к 40-летию ЯкутПНИИС) 15-16 августа 2002 г. – Якутск: Изд-во ЯкутПНИИС, 2002, с. 51–56.

ОПАСНОСТЬ ПУЧЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

А.К. Васильчук

ОАО ВНИИСТ, г.Москва, e-mail: VasilchukAK@vngp.ru

Рассмотрены аспекты изменения состояния бугров пучения в связи со строительством и эксплуатацией трубопроводов, а также в связи с колебаниями основных природных факторов, определяющих стабильность, рост и разрушение выпуклых бугров пучения. Продемонстрированы повсеместное распространение процесса пучения, широкий диапазон существования бугров, схемы формирования бугров, особенности криогенного строения, динамика бугров пучения в Западной Сибири, Забайкалье, Канаде и Исландии.

Введение

Строительство и эксплуатация магистральных трубопроводов в пределах криолитозоны приводит к трансформации геокриологических процессов, развивающихся как в зоне непосредственного взаимодействия с трубопроводом, так и на прилегающей к нему территории. Возникает сложное механическое и тепловое взаимодействие собственно трубопроводов с геологической и гидрогеологической средой на многолетнемерзлых грунтах и заболоченных территориях. Часто происходит нарушение динамического равновесия, сопровождающегося активацией опасных природных процессов с негативным влиянием на техническое состояние трубопроводов, приводящим нередко к аварийным ситуациям. К подобным «реакциям отторжения» природной средой техногенного воздействия относятся: пучение и просадка промерзающих, протаивающих грунтов, выпучивание (всплывание) участков трубопроводов, активация деструктурных мерзлотных процессов (термокарст, солифлюкция, морозобойные трещины, бугры пучения и др.), эрозионных, оползневых процессов и процессов обводнения и заболачивания трасс трубопроводов.

Процесс промерзания горных пород – сложный физический и физико-химический процесс. В дисперсных горных породах, широко распространенных на территории криолитозоны, наряду с переходом воды в лед без заметного ее перемещения с образованием льда-цемента наблюдается миграция влаги и ее последующее замерзание с образованием шлирового (сегрегационного) льда. Особая роль сегрегационного льдообразования состоит в том, что именно с ним обычно связана пучинистость промерзающих дисперсных отложений. Причём пучинистость – одно из наиболее широко распространённых явлений в криолитозоне, и даже вне криолитозоны в пределах территорий сезонного промерзания, где она часто связана с сегрегационным льдовыделением зимой в деятельном слое. В связи с этим можно говорить о почти повсеместном в пределах России развитии сегрегационного льдообразования и. следовательно. повсеместным проявлением процесса пучения.

Цель настоящей статьи продемонстрировать распространенность этого процесса и его динамику.

Различают сезонное и многолетнее пучение, хотя физико-механические процессы, их вызывающие, и последствия имеют одинаковый характер. При промерзании происходит увеличение грунта в объеме, что вызывает подъем земной поверхности с последующей просадкой при протаивании. Процессы криогенного пучения опасны для трубопровода прежде всего неравномерностью проявления по трассе, изменчивостью, связанной с закономерностью климата, почвенно-растительным покровом, ландшафтными особенностями, генезисом, минералогическими составом и строением промерзающих пород. Эти процессы могут оказать существенное влияние на работоспособность трубопровода и нарушить экологическую устойчивость природной среды. За критерий неравномерности пучения согласно Э.Д.Ершову [1] принимается процентное соотношение величины пучения одной точки над величиной пучения другой к расстоянию между ними. В естественных условиях неравномерность площадного пучения может изменяться от 3-4% до 10-15%.

Как правило. на севере Западной Сибири примерно 25% трубопроводов приходится на участки с буграми пучения, а грунты с пучинистыми свойствами встречаются более чем на 60% площади, отводимой под строительство трубопроводов.

Особенно подвержены процессам пучения газопроводы, которые относятся к теплым (Tср>0єС) и холодным (Tср<0єС) трубопроводам. Это. например подтвердил крупномасштабный натурный эксперимент, поставленный совместно французскими и канадскими исследователями в Каннах, который длился около 10 лет. Этот эксперимент включал изучение промерзания грунта вокруг холодного трубопровода, который пересекает два вида грунта, один из которых (каннская глина) сильнопучинистый. В течение периода промерзания, который длился 358 дней, промерзание и пучение грунта происходило как от дневной поверхности, так и от поверхности трубы. Уже через три месяца слой пучение составило около 10% мощности пучинистого слоя, а через год 18-27%. В результате чего в трубопроводе возникли опасные напряжения на границе пучинистого и непучинистого грунтов [2].

Укажем и на такой потенциально опасный процесс, как образование бугров пучения на дне морей при охлаждающем влиянии газопроводов. Необходимо особо подчеркнуть, что промерзающие под действием охлаждающей газовой трубы первоначально талые донные отложения, например, на Балтике, практически по всем показателям идентичны современным мёрзлым донным грунтам Баренцева и Печорского морей. Известно, что на Печорском шельфе на мелководьях на глубинах до 50-70 м обнаруживаются гидролакколиты с ледяными ядрами вблизи донной поверхности. На сейсмо- и эхограммах они похожи на конусообразные холмы высотой от 3-5 м до 12 м и шириной в основании до 120-140 м. Расстояние между холмами 300-400 м. В Карском море (на Русановской площади) такие же холмы встречены на глубинах 80-150 м. По мнению В.П.Мельникова и В.И.Спесивцева [3] эти холмы – следствие современных криогенных процессов пучения водонасыщенного грунта, промерзающего в субаквальных условиях. Такие же холмы высотой до 30 м на дне моря Бофорта, приуроченные к глубинам не более 70 м, по мнению исследовавших их Дж.Шерера с соавторами [4], также являются результатом пучения.

При образовании бугров пучения значение неравномерности площадного пучения пучения возрастает с 3–4% до 30–40% и более. При этом многолетние бугры пучения являются одной из самых распространенных форм мерзлотного рельефа. Поэтому при выборе трасс трубопроводов необходимо учитывать особенности процесса пучения в целом и особенности бугров пучения в частности.

Бугры пучения широко распространены во всем мире, встречаясь чаще в районах с более высокими среднегодовыми температурами (около нуля) прерывистых по площади многолетнемёрзлых пород, но также нередки и в зоне сплошных с поверхности многолетнемёрзлых пород с низкими среднегодовыми температурами (вплоть до –15, –16оС).

Принятые определения пучения грунтов и бугров пучения

Морозное (криогенное) пучение, согласно СП 11-105-97[5] определяется как процесс, вызванный промерзанием грунта, миграцией влаги, образованием ледяных прослоев, деформацией скелета, приводящих к увеличению объема грунта, поднятию дневной поверхности. По определению объединенного комитета по инженерно-геологическим и геотехническим исследованиям США [6] пальза рассматривается как “торфяной мёрзлый бугор, имеющий ядро, состоящее из переслаивающихся горизонтов сегрегационного льда и торфа или минерального грунта”. Многочисленные исследования показали, что сегрегационный лёд формируется также и в минеральных отложениях, лишенных торфяного покрова, с образованием форм, сравнимых по размерам и форме с пальза. Такие бугры получили название “минеральные пальза” [2].

Термин «пальза» (бугор пучения) – это финское слово для обозначения холма или бугра округлой или вытянутой формы в болотистой местности максимальной высотой около 10 м, состоящего из торфяного слоя, перекрывающего минеральный грунт.

Формы типа пальза включают бугры площади пучения, относительно прямые гряды и извилистые гряды. В Исландии описаны горбовидные, дайковидные, платообразные, кольцевые и куполовидные пальза, в Норвегии – платообразные, эскерные, вытянутые, конические или куполовидные пальза, а также пальза-комплексы [7]. Ширина пальза обычно равна 10-30 м, длина 15-150 м. Однако известны эскеровидные пальза-гряды длиной до 500 м, располагающиеся параллельно наклону поверхности болота.

Если пальза как правило представляет собой торфяной бугор, включающий многолетнемёрзлое ядро с ледяными шлирами, толщина которых, часто не более 2-3 см, хотя встречаются шлиры толщиной 10-40 см (нам встречались и линзы мощностью более 1 м). Напротив, пинго содержат мало торфа, если он вообще есть, а их ядра в основном сложены массивным чистым льдом. Но и в этом случае возможны переходные формы, а в некоторых пинго есть хорошо развитые ледяные шлиры [8].

Распространение и температурный режим бугров пучения

Распространена точка зрения, что выпуклые миграционные бугры пучения на торфяниках (пальза) приурочены исключительно к южным районам криолитозоны, где многолетнемёрзлые породы распространены прерывисто или спорадически [7]. В Норвегии область распространения миграционных бугров пучения, ограничена на севере среднегодовой температурой воздуха от 0 до –1оС. Бугры пучения в Канаде ограничены зоной прерывистого распространения многолетнемёрзлых пород, где минимальные и максимальные температуры воздуха равны соответственно –40оС и +27-32оС. Южный предел распространения миграционных бугров пучения в Финляндии примерно совпадает с изотермой среднегодовой температуры –1оС бугры также обнаружены на северо-западе Лапландии, на юге области прерывистого распространения многолетнемёрзлых пород, где среднегодовая температура ниже –1оС [7]. Бугры пучения (пальза) нередко встречаются и в районах сплошного распространения многолетнемёрзлых пород [9] и выходят за пределы прерывистого или даже островного распространения многолетнемерзлых пород. Дж.Браун [10] отмечает, что появление пальза в области прерывистого распространения многолетнемёрзлых пород часто является единственно достоверным геоморфологическим свидетельством существования многолетнемёрзлых пород. Бугры пучения практически всегда обнаруживаются в тех северных ре-

гионах, где есть торфяники, и обычно распространены в районах с продолжительными зимами и маломощным снежным покровом.

Изучение сочетания морозобойных трещин, ледяных жил и миграционных бугров пучения в пределах единого массива, а также радиоуглеродные датировки, полученные нами [7,9], и другими исследователями позволили нам заключить, что возраст бугров пучения почти не зависит от широты и температуры многолетнемёрзлых пород. Как в областях прерывистого и спорадического, так и в области сплошного распространения многолетнемёрзлых пород встречены древние и молодые бугры пучения. Значит, они формируются в существенно различном температурном режиме.

Мы выделяем несколько способов образования многолетнемёрзлых бугров пучения [9]:

1) медленное промерзание при быстром осушении массива в условиях относительно высокой температуры грунта (от 0 до –3оС);

2) **медленное промерзание при постепенном осушении в условиях относительно высокой температуры грунта;**

3) быстрое промерзание при быстром осушении в условиях относительно низкой температуры грунта (<–3оС);

4) **медленное промерзание при постепенном осушении в условиях относительно низкой температуры грунта.**

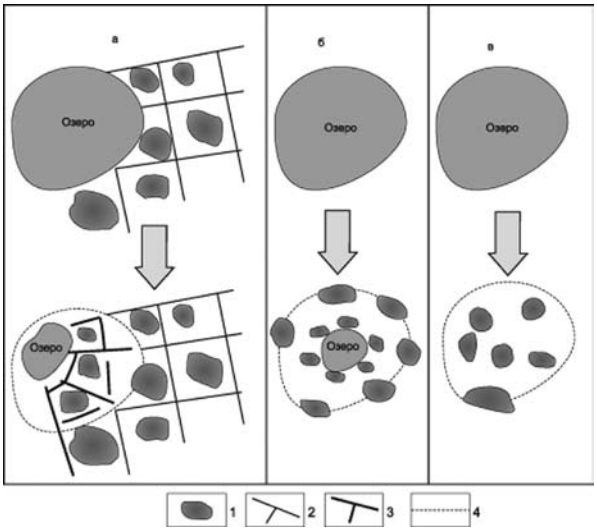


Рисунок 1 - Принципиальная схема формирования миграционных бугров пучения типа пальза в разных мерзлотно-фациальных условиях [9]: 1 – бугры пучения; 2 – полигональный рельеф, образованный морозобойными трещинами; 3 – морозобойные трещины новой генерации, возникшие при осушении озера; 4 – область осушения

При промерзании аласов и хасыреев в условиях суровых зим, в которые активно происходит интенсивное морозобойное растрескивание, на расположении бугров пучения сказывается полигональность, образованная морозобойными трещинами. Бугры в этом случае также естественно располагаются по сетке, образуя шахматный, или полигональный рисунок в плане (рис. 1,а).

В условиях низких температур при осушении озёр по прямым полевым наблюдениям Дж. Росса Маккая может происходить быстрое промерзание и формирование одного или нескольких бугров смешанного типа пинго-пальза [8]. Независимо от расположения бугров может формироваться сеть полигонально-жильных льдов, образующаяся в результате активного морозобойного растрескивания рис.1,б).

Сочетание низких температур и медленного осушения приводит к формированию бугров смешанного типа пинго-пальза, концентрическому промерзанию, а также к формированию полигонально-жильных льдов (рис.1,в).

По мере образования бугров на их поверхности сохраняется прежняя и/или формируется новая полигональная сеть трещин. В разрезе этих бугров можно обнаружить сегрегационные или сегрегационно-инъекционные линзы льда, рассеченные ледяной жилой. Такую комбинацию мы наблюдали в разрезе молодого (современного) бугра пучения, расположенного в пределах молодой озерной котловины недалеко от оз.Кооленьна Чукотке. В разрезах таких бугров часто встречается немного органики в основном в осевой и периферических частях. Однако, мощность торфа может быть и существенной, какую мы наблюдали при исследовании бугра пучения смешанного типа пальза-пинго высотой 8 м и 50 м диаметром, окруженного полигональным торфяником в прибрежной части медленно осушающегося озера в пойме р.Еръяха на Восточном Ямале.

Льдистость и криогенное строение.

Характеристика криогенного строения бугров пучения и их льдистость имеют прямое практическое значение для оценки свойств грунтов, а также позволяют выявить генезис и условия их формирования, особенно при исследовании бугров в районах со сплошным распространением многолетнемёрзлых пород, поскольку здесь наряду с миграционными буграми распространены бугры смешанного миграционно-инъекционного и инъекционного генезиса.

Льдистость является важной инженерно-геологической характеристикой бугристых массивов. Известно, что общее содержание льда в грунте характеризуется суммарной льдистостью (i), выражаемой в процентах или долях единицы. Она определяется вкладом порового льда (iц) и льда включений (iв), т.е. i = iц + iв. Существует несколько показателей суммарной льдистости [11].

Весовая льдистость (ip) – это отношение массы всего льда (mi) к массе сухой породы (ms): ip = mi/ms.

Относительная льдистость io – это отношение весовой льдистости (ip) к суммарной влажности

(wtot): io = ip/wtot.

Объемная льдистость (iv) – это отношение объема всего льда (Vл) к объему мерзлой породы (V): iv = Vл/V.

Суммарная объемная льдистость мерзлого грунта iv может быть также рассчитана по формуле: iv = iв + iц = c(wtot – wн)/ci (1 + wtot), где c – плотность мерзлого грунта, ci – плотность льда, принимаемая равной 0,9 г/см3, wн – влажность мерзлого грунта за счет содержащейся в нем при данной температуре незамерзшей воды (табл. 2). Содержание незамерзшей воды Wн в торфе определяется исходя из его суммарной влажности и температуры (табл.1).

Таблица 1 - Зависимость влажности торфа за счет незамерзшей воды от его температуры и начальной суммарной влажности (по данным Л.Т.Роман [12])

W_{tot}, %	Температура, °С			
	0	–1	–2	–3
	Содержание незамерзшей воды, $W_{н.з.}$ (%)			
100	100	80	75	50
200	200	160	140	100
400	400	380	280	190

Так, например, при температуре 0оС вся влага в торфе находится в виде незамерзшей воды; при температуре –1оС и Wtot торфа 100% количество незамерзшей воды составляет 80%, при Wtot 200% Wн.з. = 160% [12].

Бугры пучения формируются в результате образования сегрегационного льда в дисперсных пучинистых грунтах. Лёд выделяется в виде шлиров (прослойков и прожилков) при промерзании пород и миграции воды к фронту промерзания, образуя слоистые и сетчатые криогенные текстуры в мерзлых породах. Факторами, определяющими рост ледяных шлиров и линз и их толщину, являются гранулометрический состав промерзающих отложений, их влажность и температурный режим. Типы криогенных текстур и мощность шлиров льда могут говорить о скоростях и условиях промерзания. Пространственное расположение ледяных включений может в какой-то степени указать направление миграции влаги и движение фронта промерзания.

Известно, что основными литологическими разностями, слагающими бугры пучения, являются торф, супеси, суглинки, глины, пески. Криогенное строение торфа может быть различным. Если промерзал неводонасыщенный торф, то в нем образуется только поровый лёд, формирующий массивную криотекстуру, если торф был водонасыщенным перед промерзанием, в нем формируются ячеистая, лизовидно-пленчатая, линзовидная криотекстура, при этом мощность линз льда в торфе может увеличиваться вниз по разрезу до 10-20 см. Они могут отличаться причудливыми очертаниями и часто разветвляться на несколько расходящихся линз. Нередко на контакте торфа и подстилающего его минерального грунта формируется горизонтальный прослой льда, мощностью от нескольких сантиметров до 0,5 м, который является характерным признаком криогенного строения бугров пучения.

В суглинисто-глинистых грунтах формируется сетчатая, неполносетчатая, линзвидно-плетенчатая криотекстуры. Если бугор минеральный, то подобные криотекстуры отмечаются до глубины 2-3 м. Супесям и опесчаненным суглинкам свойственны ячеистые, слоистые криотекстуры. Реже встречается массивная криотекстура. Подобная криотекстура, как правило, характерна для песков, однако льдистость песков может варьировать от 5 до 20-30% в зависимости от их первоначальной влажности и условий промерзания.

Бугор пучения характеризуется наличием льдонасыщенного ядра, которое может быть приурочено как к торфу, так и к подстилающим его минеральным грунтам. Нередко в разрезе бугров пучения отмечалось, что значительная масса льда формируется на контакте торфа и подстилающего грунта. Общим для этого горизонта при некоторых отличиях гранулометрического состава является очень высокое содержание льда, иногда превышающее объем вмещающего его грунта. Для льдистого ядра бугров пучения характерны, в основном, слоистая (шлировая), базально-параллелепипедальная и атакситовая криотекстуры. В том случае, когда прослои льда по мощности меньше грунтовых прослоев, образуются разные типы слоистых текстур, в обратном случае, когда льда больше, чем грунта и разъединенные блоки грунта как бы «плавают» во льду, текстура базально-параллелепипедальная. Формирование высокольдистого ядра в буграх пучения обусловлено различными факторами. Большая часть льда в льдонасыщенном ядре миграционных бугров пучения формируется за счет внутригрунтовой влаги окружающей территории. Размер бугра в определенной степени зависит от ширины зоны, откуда эта влага поступает.

В эпикриогенных торфяниках юга криолитозоны льдонасыщенное ядро, как правило, соответствует мощности мерзлых пород. В разрезе бугров нередко закономерная картина увеличения толщины ледяных шлиров и их разреживания с глубиной искажается присутствием прослоев с базальной, микролинзовидной или микрошлировой криотекстурами, а иногда довольно мощных (толщиной более 0,1 м) прослоев чистого льда. Соответственно, распределение льдистости мерзлого ядра бугра пучения по глубине может быть различным. При этом встречаются случаи, когда льдонасыщенное ядро прослеживается до подошвы мерзлоты; в некоторых случаях под льдонасыщенным ядром залегает малольдистый горизонт, формирование которого можно объяснить наличием довольно высоких температур (около 0оС) и отсутствуем градиентов, в результате чего льдовыделение за счет рыхло связанной воды не происходит. В разрезе бугров, расположенных в северных районах их распространения довольно часто встречается постепенный переход льдонасыщенного ядра в менее льдистые породы, имеющие разреживающуюся решетку с глубиной [7].

Большинство исследователей предполагали, что высота бугров пучения уменьшается с юга на север вследствие уменьшения количества рыхлосвязанной влаги и соответственно миграционного потока к фронту промерзания. Однако, приводилась и противоположная аргументация, например, то, что в зоне приенисейской тайги высота бугров уменьшается с юга на север, достигая максимальных размеров в районе г.Игарки. Наши полевые исследования не подтвердили ни ту, ни другую точки зрения. Бугры высотой более 4 м мы исследовали и в районе ст.Бугры и Уса вблизи южной границы восточно-европейской криолитозоны, где среднегодовая температура грунтов около 0оС и в районе ст.Елецкая и близ г.Воркута, где среднегодовая температура пород ниже –2.. –3оС, что, скорее всего, говорит о том, что локальные факторы, обусловливающие льдовыделение, оказывают более существенное влияние, чем региональный фон, т.е. бугры наибольшей высоты формируются там, где к началу промерзания существовала достаточной мощности торфяная залежь (не менее 0,3–0,4 м) и обширная сильноувлажненная депрессия.

Принято считать, что в современной динамике бугров пучения типа пальза преобладает деградационная тенденция. Однако имеется множество примеров, свидетельствующих и о стабильном состоянии бугров, и об их активном современном формировании. Причем вновь образующиеся бугры отмечаются не только в тех же районах, где установлена деградация бугристых массивов, но даже в пределах единого массива часть бугров может распадаться, а некоторые одновременно вновь формируются. Это относится, как к северным, так и к самым южным местонахождениям пальза. Причиной такого контрастного развития является формирование торфа, которое обычно, находится в "противоходе" к общемерзлотным тенденциям. Тогда как при потеплении мёрзлые породы активно деградируют, торф, же, напротив, начинает интенсивно нарастать, а теплофизические изоляционные свойства торфа способствуют активному охлаждению участков его повышенного накопления зимой и консервации холода летом, что приводит к глубокому промерзанию и пучению, которое тем более выразительно, поскольку происходит в термокарстовых протаявших сильновлажных болотных котловинах [7].

В течение последних десятилетий тенденция к распаду бугров пучения (пальза) у южной границы распространения многолетнемерзлых пород отмечалась многими авторами в России, в Фенноскандии и в Северной Америке . В этих районах, где среднегодовая температура многолетнемерзлых пород близка к 0оС, даже незначительные изменения климата небольшой продолжительности могут быть существенны для роста и распада мерзлотных форм рельефа и поэтому бугры пучения могут быть хорошими геоморфологическими индикаторами изменения климата.

Необходимость знания причин и скорости изменений состояния криогенных явлений усиливается в связи с продолжающимися дебатами о потеплении климата и парниковом эффекте. Предполагается, что эффект возможного глобального потепления особенно сказывается в высоких широтах, где он, как на первый взгляд может показаться, особенно выразителен в области прерывистого распространения многолетнемерзлых пород, где среднегодовые температуры близки к 0оС.

Учитывая то, что миграционные бугры пучения здесь наиболее часто встречаемая и морфологически прекрасно выражающаяся форма мезорельефа, сравнение динамики бугров пучения с климатическими трендами может быть наиболее результативным для лучшего понимания и прогноза грядущих природных изменений.

Следует подчеркнуть и то, что морфология бугров пучения (пальза) очень физиономична и легко дешифрируется как на аэрофотоснимках, так и на местности, поэтому организация мониторинга за буграми пучения с одной стороны достаточно проста, с другой – весьма эффективна. Однако не следует думать, что рост и деградация бугров есть исключительно функция температурных изменений и неверно ожидать прямой корреляции тенденций изменения температуры воздуха с динамикой бугров пучения.

На самом деле, связь эта значительно сложнее, и повышение летних температур далеко не всегда сопровождается ростом зимних температур воздуха, а тем более, ростом температур мерзлых грунтов, поскольку улучшение условий вегетации ведет к бурному росту мохово-травяного покрова, который служит хорошим изолятором тепла.

Таким образом, даже при росте температур воздуха может значительно усиливаться выхолаживание грунта, и, как результат, вместо деградации мерзлых пород будет наблюдаться их активное развитие и интенсивный рост бугров пучения на торфяниках. На это указывают и результаты прямого мониторинга в разных регионах северного полушария.

Вопрос о современном состоянии бугров – один из узловых в мерзлотоведении. По мнению одних исследователей, бугры в настоящий момент деградируют [13], по мнению других – растут [14]. Основываясь на полученном нами материале по строению и состоянию бугров на различных геоморфологических элементах в разных зонах криолитозоны Западной Сибири, мы предположили, что в одних мерзлотно-фациальных условиях бугры растут, в других – деградируют, в-третьих, являются стабильными [7].

Современная динамика бугров пучения в отдельных районах криолитозоны

Описывая современное состояние и время формирования бугров пучения необходимо иметь в виду, что бугор – это не застывший во времени «монолит», что на протяжении голоцена бугры пережили достаточно сложную историю развития, следуя естественному климатическому тренду

и изменению фациальной обстановки. Осцилляции поверхности бугра в голоцене читаются сейчас по чередованию (в осевой части бугров) слоев со спектрами, насыщенными древесной пыльцой, слоями с обилием кустарников и трав в породах субаквальной и субаэральной фаций соответственно, по переслаиванию низинного и верхового торфа, чередованию различных аллювиальных фаций в разрезах и т.д. [7].

Данные Л.И.Вейсмана [15] по долине р.Надым свидетельствуют о сложной динамике развития бугров пучения. По его наблюдениям, бугры, не контактирующие непосредственно с заболоченными обводненными участками, но имеющие возможность подпитки за счет грунтовых вод, находились в 70-е годы XX века, преимущественно, в стадии роста. На буграх, окруженных заболоченными понижениями, преобладали процессы термокарста. Скорость роста бугров в высоту за 20 лет в долине р.Надым достигает 1,4-1,5 метров, т.е. 7-7,5 см/год.

По нашим наблюдениям в этот же период [7] бугры вблизи с.Азовы, окружённые заболоченными понижениями и имеющие значительные размеры (до 8 м в высоту), находились в стадии стабилизации, достигнув критической для существующих ландшафтных условий высоты, так как высоко приподнятая вершина бугров теряет связь с увлажненными понижениями и нижележащими породами. Дернина сильно иссушается в летнее время, накопление торфа резко замедляется, поверхность расчленяется трещинами усыхания, способствующими развитию ветровой эрозии и термокарста, рост бугров прекращается.

В этом же районе бугры меньших размеров (высота 3-5 м), отделенные небольшими слабо увлажнёнными понижениями, очевидно, находились в стадии роста, о чём говорит то, что у этих бугров по периферии наблюдаются террсовидные «ступеньки» высотой 0,5-1 м, шириной 1-3 м, морфология которых свидетельствует об их недавнем происхождении.

Наблюдения за динамикой поверхности бугров пучения вдоль трассы газопровода Надым-Пунга были выполнены О.Е.Пономаревой [16]. Район работ расположен в 30 км к югу от г. Надым, в краевой части III озерно-аллювиальной равнины. Многолетнемёрзлые породы имеют островное распространение. Острова мёрзлых пород, имеющие среднегодовые температуры от 0 до –2оС, приурочены к торфяникам, буграм и грядам пучения.

В 1972 г в районе исследований была проложена трасса газопровода Надым-Пунга. При ее строительстве растительный покров и частично торфяной горизонт были сняты. Для изучения изменений, вызванных антропогенным вмешательством, Ю.Л.Шуром и В.Л.Невечерей организован мониторинг положения поверхности бугров на постоянных, фиксированных на местности профилях. Профили для проведения мониторинга расположены перпендикулярно трассе газопровода, оборудованы марками через 2 метра. В ходе работ выполнялось повторное нивелирование поверхности.

На рассматриваемых участках многолетнемёрзлые породы залегают на глубине 3-4 м. В 2004 г. их температура на глубине 3-5 м составляла 0оС, на глубине 10 м – –0,2оС. В начале исследований температура многолетнемерзлых пород на глубине 10 м составляла –0,5 оС.

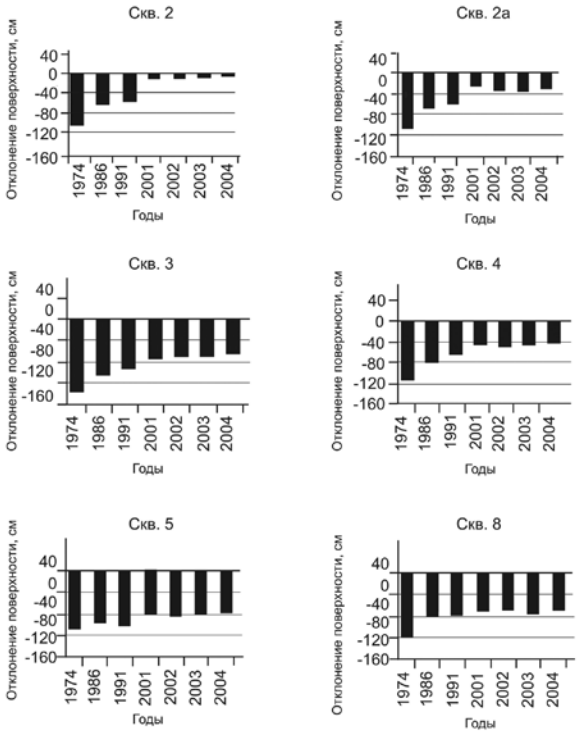


Рисунок 2 - Диаграммы отклонения поверхности бугров пучения вдоль трассы газопровода Надым-Пунга (по профилю «14 км») за период с 1972 по 2004 гг. по данным повторных нивелировок. Отклонение поверхности показано относительно ее положения в 1980 г. (по О.Е.Пономаревой [16])

Анализ результатов наблюдений показал, что за 24 года (с 1980 по 2004 гг.) на рассматриваемой территории произошел общий подъем поверхности по сравнению с ее положением в 1980 г. в среднем на 18 см.

Наблюдения по профилю “14 км”(рис.2) показали, что в развитии поверхности можно выделить 3 этапа: 1972-1974 г.г. – период просадки поверхности, наступивший после строительства, 1975-1991 гг. – период медленного подъема поверхности, с 1992 г - период стабилизации. В течении первого периода просадки поверхности составили в среднем 104 см. Максимальная просадка составила 134 см, минимальная – 70 см (см. рис.2).

Медленное пучение в течение второго периода привело к подъему поверхности в среднем на 29 см, но при этом он не компенсировал произошедшую ранее осадку. В течение третьего периода подъем поверхности составил в среднем 21 см, однако компенсации первоначальной просадки, так и не произошло. К настоящему времени максимальная просадка поверхности относительно ее положения в 1971 г., составляет у скв. 5 – 75 см, а минимальная у скв. 2а – 27 см [16].

За 32 года со времени укладки трубопровода поверхность испытала проседание, подъем,

стабилизацию, но так и не вернулась к исходному положению, оставаясь ниже него в среднем на 54 см. Интенсивность просадок убывает по мере удаления от трубопровода, но не достигает нулевых значений даже на расстоянии 50 м от трубопровода. На ненарушенных участках близ профиля 1-1 и профиля «14 км» наблюдается рост бугорков пучения, возникших 3 и 30 лет назад. Максимальная высота этих бугров достигла 75 см.

Мониторинг поверхности бугров пучения вдоль трассы газопровода Надым-Пунга показал, что в современных условиях северной тайги Западной Сибири, на участках с высокотемпературными многолетнемерзлыми породами, несмотря на потепление климата и снятие растительного покрова продолжается рост уже существующих бугров пучения на участках, окруженных обводненными ложбинами стока. Зафиксировано образование новых бугров на ненарушенных территориях.

В этом же районе, в условиях отсутствия обводненных ложбин происходит частичная деградация бугров пучения, на которых растительный покров был уничтожен в процессе строительства газопровода. Максимальная осадка на деградирующих буграх происходила в течение первых двух лет после строительства и составила более 1 м. По мере зарастания поверхности, просевшие участки постепенно начали подниматься, но за 32 года их отметки так и не достигли прежних значений [7].

В 2005 г. после замены трубы и отсыпки новой насыпи профиль приобрёл иной характер и в дальнейшем по прогнозу Н.Г.Москаленко и др [17] можно ожидать активизации просадок, которые вновь вскоре сменятся пучением.

Здесь также изучалось изменение рельефа бугров по материалам повторного картографирования форм по аэрофотоснимкам разных лет и наземных маршрутных работ, проводимых с интервалом 3–5 лет.

Сравнение двух разновременных карт, для 1970 г и для 2005 г. по Надымскому стационару, с использованием аэроснимков, залётов разных лет, демонстрирует очень незначительное изменение площади массивов пальза с кедрово-лиственничными багульниково-лишайниковыми рединами на торфяно-подзолистых почвах. Во всяком случае, сравнивая контура пальза, отрисованные с интервалом в 35 лет, нет оснований говорить о сокращении их площади даже в приконтактовой с газопроводом зоне. При этом, здесь же, на ненарушенных болотных массивах к 1988 г., через 18 лет после сооружения газопровода местами появились небольшие бугры и площади пучения высотой до 1 м [18].

Данные Забайкальского межрегионального территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды свидетельствуют, что во второй половине XX века среднегодовые температуры воздуха повысились на 1,5-2°С, а количество осадков в среднем за год увеличилось на 20-30%. Вследствие этого в Центральном Забайкалье изменилась пучиноопасность грунтов. Пучиноопасность грунтов территории Читино-Ингодинской впадины за период с 1960 по 2002 гг. повсеместно изменилась – сопоставление пучиноопасности грунтов на период до начала потепления климата (1890-1960) и на период потепления климата (1960-2002) показало, что пучиноопасность грунтов при деградации многолетнемерзлых пород усиливается [18]. На 60% территории Читино-Ингодинской впадины грунты из пучинистых перешли в категорию сильнопучинитсых и чрезмернопучинистых. В результате исследований, проведенных Д.Д.Шестерневым [18] в Центральном Забайкалье установлено, что максимальные изменения пучиноопасности грунтов произошли там, где суглинистые породы сезонного оттаивания перешли в сезонномёрзлые породы в связи с формированием несливающегося типа мерзлых толщ или полным оттаиванием многолетнемерзлых пород.

Интересные исследования динамики бугров проводятся в Канаде. Исследование Ш.Вэлли и С.Пайетта [19] посвящено анализу динамики пальза под влиянием изменения уровня субарктической реки Бонифейс в северном Квебеке. Ими было выполнено картографирование положения пальза и термокарстовых водоемов для 44-летнего периода, с 1957 (по аэрофотоснимкам) до 2001 гг. (по полевым наблюдениям), для того, чтобы оценить изменения в распределении в морфологии мерзлотного рельефа на пойме р.Бонифейс (57°45' с.ш., 76°20' з.д.), в 130 км к югу от пос.Инукъяк и в 35 км к востоку от Гудзонова залива на северном пределе зоны прерывистого распространения многолетнемёрзлых пород. Район относится к подзоне кустарниковой лесотундры и расположен приблизительно в 10 км к югу от северной границы леса. На вершинах холмов произрастают лишайники и отдельные экземпляры угнетенной черной ели (Picea mariana). Ближайшая метеостанция расположена в пос.Инукъяк. Среднегодовая температура на станции –7оС. Средняя температура самого теплого месяца (июль) +9оС, самого холодного месяца (февраль) –26оС. Средняя продолжительность безморозного периода 60 дней, вегетационный период длится от середины июня до конца августа. Среднегодовое количество осадков варьирует от 500 до 550 мм, при этом 40% из них выпадает в виде снега.

Используя дендрохронологическое датирование времени отмирания черных елей была оценена деградация 14 бугров. Область, занятая пальза с 1957 по 2001 гг. уменьшилась на 23%. Не отмечено ни одного нового бугра возникшего после 1957 г.

Деградация 14 изученных бугров пучения началась в конце 19-го столетия и ускорилась в течение 20-го столетия. Степень деградации пальза связана с расстоянием от реки. Площадь бугров пучения, расположенных на пойме реки близ русла, сократилась на 48%. Деградация была менее

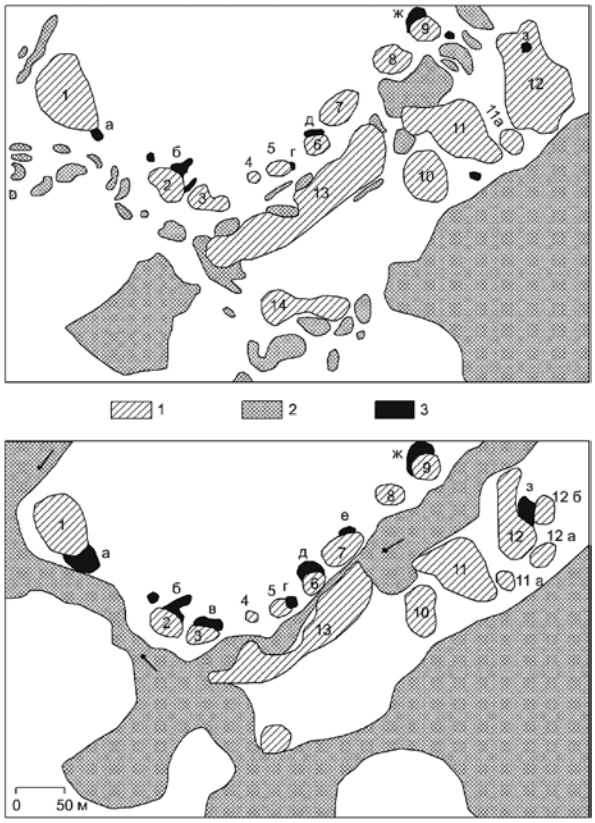


Рисунок 3 - Взаиморасположение бугров, реки и прудов в 1957 г. (а) и в 2002 г. (б) (по S.Vallee, S.Payette, [20].): 1 – бугры пучения; 2 – река; 3 – термокарстовые водоемы

серьезна для бугров, которые располагались на расстоянии от 1 до 15 м от речного русла, их площадь сократилась только на 19% (рис. 3). Пространственно-временное распределение бугров пучения говорит о том, что изменения водного уровня являются одним из наиболее важных факторов, влияющих на динамику прибрежных бугров, особенно для тех, которые непосредственно контактируют с речной водой. В течение последних 50 лет в районе исследования площадь, занятая пальза, сократилась на 23%, в то время как площадь термокарстовых водоемов увеличилась на 76%, и новые пальза не образовались. Такое сокращение площади залегания приповерхностных многолетнемерзлых пород менее выраженное, чем в других субарктических районах Квебека, где более 80% бугров пучения в пределах торфяников исчезло за последние 50 лет [20]. Сравнение карт 1957 и 2001 гг. указывает, что пальза и участки, непосредственно контактировавшие с рекой (пальза 11, 13, и 14) деградировали в большей степени, чем те, которые защищены береговыми валами, поросшими густыми кустарниками ивы (рис. 3). Паводки, зарегистрированные для р.Бонифэйс начиная с 1970-ых, разрушили краевые части пальза, что привело к увеличению теплопроводности слагающих их грунтов, способствуя их протаиванию в течение лета [19].

Таким образом, региональные гидрологические условия, по-видимому, являются одним из факторов, объясняющих динамику пальза, расположенных непосредственно на контакте с рекой.

Деградация этих пальза проявляется преимущественно в виде образования термокарстовых водоемов, которые, как правило, расположены на северо-восточных склонах пальза. Пространственное распределение водоемов позволяет предположить, что важную роль в деградации пальза и их преобразовании в термокарстовые водоемы играет распределение снежного покрова. Исследуемый район характеризуется преобладающими ветрами западных направлений, которые сдувают снег с вершин пальза и западных склонов и способствуют аккумуляции мощного снежного покрова на подветренных северо-восточных склонах. Такое дифференцированное распределение снежного покрова изолирует защищенные стороны пальза в течение зимы и оставляет открытые участки пальза незащищенными от проникновения зимнего холода.

Увеличение количества зимних осадков после 1970 г., зафиксированное по метеостанции в Инукъяке, и также вероятно происходившее на исследуемом участке, было возможной причиной современного сокращения площади распространения пальза. Хотя снежный покров и является важным фактором, влияющим на деградацию пальза, температура воздуха здесь также играет определенную роль. Согласно метеорологическим данным по метеостанции в Инукъяке, среднегодовая температура была относительно стабильной в течение 20-ого столетия и начала повышаться недавно, в течение 1990-х гг.

Эти данные позволяют предположить, что зимние осадки играют важнейшую роль в деградации многолетнемерзлых пород, способствуя повышению уровня воды в реках и увеличению мощности снега на защищенных от ветра склонах пальза. Существенное повышение температур воздуха в течение 1990-х гг. вероятно, также усилило процесс деградации пальза.

Динамику бугров пучения, помимо климатического фактора, часто определяют локальные факторы. Так, например, в работе Э.Левковича и Т.Култиш [20] рассмотрен дополнительный экологический фактор развития бугров пучения – зоологический, а именно влияние бобровых плотин на динамику бугров. Ими были изучены пальза на ручье Волчьем. Волчий ручей располагается в 20-30 км к югу от Уайтхорс в районе Юкона (60о30 с.ш., 135о13 в.д.), в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. Бассейн располагается в субарктическом климате, характеризующимся большими сезонными амплитудами температур, низкой относительной влажностью и малым количеством осадков. Долина р.Волчий расположена на высоте 1235 м над уровнем моря, ориентирована с северо-востока на юго-запад, имеет корытообразную форму и находится в субальпийской зоне. В пределах ее границ (в 800 м от русла главной реки) было обнаружено 36 бугров пучения. На вершине одного из бугров с апреля 2001 по август 2003 гг. велись наблюдения за температурой воздуха. С мая 2001 по апрель 2002 гг. средняя температура составила –4,2оС, с мая 2002

по апрель 2003 гг. –2,2о, средний диапазон температур в течение суток составляет 12оС. Экстремальные значения температур –25оС и –36оС. Зимой в бассейне имеет место температурная инверсия. По всей видимости, инверсия нарушила положение высотной границы леса: белая ель (Picea Glauca) отсутствует в нижней части долины и произрастает на склонах. Растительность на дне долины представлена кустарниковой ивой, карликовой березой, а также луговыми и травянистыми видами (они приурочены к зонам, которые покрываются льдом зимой).

В своих исследованиях Э.Левкович и Т.Култиш [20]. проанализировали аэрофотоснимки 1946, 1966, 1987, 1995 и 2001 гг. Восемь бугров были пробурены до льдистого ядра при помощи ручного бура диаметром 75 мм.

Бугры пучения изучены в двух областях и обозначены как северная и южная группы. Отдельные пальза имеют длину от 5 до 50 м, ширину – от 5 до 30 м, и по высоте варьируют от 0,5 до 3,5 м. В 2001 г. 21 бугор находился в стадии роста, 8 – в стабильном состоянии и 7 разрушались [20].

В большинстве бугров пучения отложения стратифицированы и представлены несортированными илами и песками с включениями глины и гравия. Криотекстуры чаще всего массивные и шлировые. Содержание органики в минеральных породах варьировало от 2 до 16%, составляя в среднем 6% (не включая поверхностный торф), веточки и корешки встречались иногда на 2 м ниже границы сезонного протаивания. Э.Левкович и Т.Култиш [20]. считают, что эти отложения сформировались в бобровых запрудах. Доказательство этому – большие различия в размерах зерен, органические включения и локализованное распределение отложений в пределах этого участка дна долины в тех местах, где отмечена бобровая деятельность.

Наличие бобровых плотин в долине приводит к ухудшению дренажа, что способствует аккумуляции торфа. Таким образом, деятельность бобров напрямую связана с формированием пальза в этом районе, способствуя созданию условий глубокого промерзания отложений.

За период наблюдений [20]. было отмечено существенное изменение в количестве воды на поверхности даже в тех случаях, когда рассматривались аэрофотоснимки приблизительно одного и того же времени года. Различия в состоянии воды на поверхности отмечены между северными и южными группами пальза в трех из пяти стереопар (1946, 1987 и 1995 гг.). В 1966 и 1995 гг. были обнаружены 2 нарушенные плотины, расположенные ниже по течению реки, по сравнению с северной группой пальза. В 2001 г. все плотины были повреждены, и уровень воды был весьма низок.

Следовательно, создание и нарушение бобровых плотин провоцируют основные изменения в поверхностном стоке. Бобровые плотины могут воздействовать на бугры пучения двумя способами: 1) когда уже существующие пальза подпруживаются водой и из-за этого разрушаются; и 2) новые пальза могут развиваться в отложениях, появившихся в результате появления запруды. Сопоставляя аэрофотоснимки разных лет, исследователи заключают, что в районе отмечены оба этих эффекта.

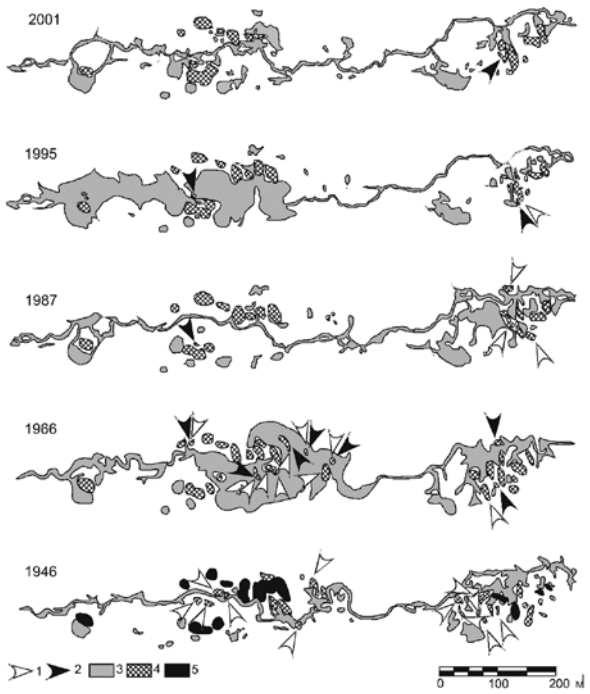


Рисунок 4 - Расположение пальза в разные годы, отдешифрированное по аэрофотоснимкам Национальной библиотеки аэрофотоснимков Канады (по A.Lewkowicz, T.Coultish [20]): 1 – бугры, деградировавшие до выполнения следующего обследования, 2 – бугры, сформировавшиеся до выполнения предыдущего обследования, 3 – вода; 4 – бугры; 5 – бугры, существовавшие в 1946 г. и еще сохранившиеся в 2001 г.

Минимальная продолжительность подпруживания для того, чтобы пальза полностью деградировал, может быть оценена по одному бугру, который вырос между 1987 и 1995 гг. Он исчез в 2001 г., что указывает на то, что даже полная деградация пальза может происходить менее чем за 10 лет. Частичное разрушение пальза также возможно: один из бугров был наполовину окружен водой в 1995 г. и в 2001 г. частично разрушился. При этом более десяти небольших пальза выросли на участках, которые за прошедшие 55 лет время от времени затоплялись. Одними из самых последних выросли два бугра высотой менее 1 м, покрытые торфом, сформировавшиеся на участке, который был затоплен в 1995 г., а осушился до 2001 г. Как видно из рис. 8.15 бугры пучения у ручья Волчий очень динамично развиваются и деградируют, при этом бугры, сохранившиеся с 1946 г. по сей день в течение этого периода меняли свою конфигурацию заметно и быстро.

Исследования пальза показали, что деградация форм, значительно превышающая рост, отмечена в течение холодного периода с 1943 по 1972 гг. (среднегодовые, летние и зимние температуры были ниже среднемноголетних), а в течение самого теплого периода за прошедшие 50 лет (в конце 1980-ых) рост и разрушение пальза были сбалансированы.

Деградация пальза превалировала над их

ростом в период с 1946 по 1995 гг. В 2001 г. в районе исследований отмечены многочисленные растущие формы пальза. Из этого следует важнейший вывод, что нет никакой прямой связи между температурами воздуха и динамикой пальза в районе ручья Волчьего.

В этом районе зафиксировано увеличение снежности с 1945 по 1966 гг., снижение к 1981 г., затем снова увеличение до 1995 г. Увеличение количества снегопадов до 1966 г. не привело к уменьшению числа пальза. Корреляция между снегопадами и количеством пальза не отмечена и в последующие годы. С другой стороны, количество снега не может быть исключено как фактор, влияющий на развитие пальза. Видимо, реакция пальза на климатические изменения нивелируется здесь локальными факторами, такими как распределением поверхностной воды, имеющим прямую зависимость от деятельности бобров [20].

Согласно данным, полученным Э.Левковичем и Т.Култиш, скорости роста и разрушения пальза не связаны с трендами температуры воздуха в районе исследований. Деградация, измеренная для пальза всего района их распространения, преобладает над их ростом с 1940-ых гг. до начала 1970-ых гг., когда летние, зимние и годовые температуры были ниже средних. Рост и разрушение крупных бугров сбалансированы по значениям в настоящее время, когда сезонные и среднегодовые температуры воздуха выше средних. Кроме того, область распространения пальза увеличилась и отмечены многочисленные растущие пальза [20]. Следовательно, динамика бугров пучения в этом районе не может рассматриваться как индикатор потепления климата, если только потепление не достигнет таких масштабов, при которых полностью исчезнут многолетнемёрзлые породы и пальза.

Отметим и интересные данные по наблюдениям за ростом и деградацией бугров на центральном нагорье Исландии близ ледника Ховсйокуль, полученные Т.Торхальсдоттир [21] в течение 9 лет с 1983 по 1991 гг. Был осуществлён мониторинг за динамикой 12 бугров пучения, расположенных на массиве Тьёрсарвер на абсолютной высоте около 600 м (64о с.ш., 18о40 з.д.) Климатические характеристики по данным станции Торисос, расположенной в 20 км южнее (64о22 с.ш., 18о40 з.д.) на абсолютной высоте 582 м и станции Хвераведлит, расположенной в 55 км западнее (64о52 с.ш., 18о34 з.д.) на абсолютной высоте 640 м таковы: среднегодовая температура воздуха –0,8оС, среднеянварская температура –6,6оС, среднеиюльская 7,7оС. Годовое количество осадков 800 мм. Мощность снега между буграми варьирует от 50 до 150 см, на буграх снег зимой часто отсутствует и обнаруживается лишь тонкий слой льда и фирна.

Был изменен гидрологический режим реки и создано мелкое обширное (площадью 5 км2) озеро (глубиной 15-30 см) занявшее депрессию с 5 буграми пучения. Озеро частично затопило массив с буграми. Эффект этого затопления наблюдался в течение 5 лет с 1983 по 1987 гг. и был несколько неожиданным. Все 5 бугров выросли за этот период. Приращение высоты бугров составило от 14 до 43 см, в среднем 27 см. Бурение одного из наиболее выросших бугров прямо продемонстрировало, что приращение высоты бугра произошло за счёт прироста чистого сегрегационного льда [21].

Необходимость учета пучения при эксплуатации трубопроводов

Поскольку процесс пучения развит практически повсеместно, там, где имеются грунты с пучинистыми свойствами, то этот процесс необходимо отслеживать для предотвращения опасных ситуаций. Натурные крупномасштабные эксперименты и наблюдения за действующими нефте- и газопроводами в криолитозоне демонстрируют принципиальную важность учета процессов пучения при эксплуатации трубопроводов, т.к. наблюдается выпучивание и всплытие трубопроводов, даже при наличии утяжелителей. Согласно данным приведенным на одном из заседаний ОАО «Газпромнефть» за 10 лет эксплуатации на одном из участков сплошной балластировки пригрузами в лесотундре Западной Сибири началось пучение. Поднявшийся участок первоначально имел длину 40 м. К 2007 г. его длина достигла 250 м, и число пригрузов увеличилось с 20 до 170. Газопровод изменил свое положение и поднялся на высоту 1,7 м. На вершине одного из бугров пучения начали трескаться пригрузы. Геолокация показала, что выросло ледяное ядро в диаметре около 6 м. Это типичный участок, каких, например, на газопроводе Ямбург - Ныда более шестисот.

Существенные изменения бугров пучения в большинстве районов криолитозоны происходят за десятки лет, но иногда существенные изменения происходят за 1-2 года, при этом скорости деградации и роста бугров обычно отличаются. Рост бугров в среднем происходит со скоростью от 2-3 до 25 см в год, а скорость деградации может превышать 10-15 см в год. Высокие скорости роста бугров характерны для начальной стадии, когда в течение нескольких сезонов бугры могут вырасти на 1-1,5 м.

Прямыми инструментальными наблюдениями установлены скорости деградации и роста бугров пучения в ряде районов криолитозоны:

-на севере Западной Сибири в районе Надыма приращение бугров в высоту за 24 года наблюдений (с 1980 по 2004 гг.) характеризовалось разными скоростями – для периода с 1988 по 1998 гг. в среднем 4 см/год, с 1995 по 1998 гг. – 10 см/год, а на одном из участков величина пучения в период между 1998 и 2000 гг. составила 45 см. На привершинных участках бугров подъем поверхности относительно уровня 1980 г. в среднем составляет 37 см, а максимальный достиг 73-78 см в 1999 г.;

-в Канаде в северном Квебеке с 1993 по 2003 гг. высота некоторых бугров составила около 40% от первоначальной высоты.

Причинами роста и деградации бугров как в зоне сплошного, так и в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород являются как общие климатические изменения (температура воздуха и снежность зим), так и локальные факторы – изменение дренажной системы, колебания уровня рек, осушение озер и наоборот подтопление, и даже такой экологический аспект, как деятельность бобров, местами влияющая на гидрологические условия.

Поскольку не всегда возможно обойти участки с буграми пучения и ли с грунтами с сильнопучинистыми свойствами необходимо проводить инженерно-геокриологический мониторинг для того, чтобы превентивно защитить трубопровод от последствий морозного пучения в разных формах. В задачи инженерно-геокриологического мониторинга входят: своевременное установление в процессе строительства и эксплуатации сооружений отклонений от принятых в проекте параметров состояния грунтов оснований; оперативный контроль температурного и гидрогеологического режима в зоне взаимодействия грунтов с инженерными объектами, краткосрочное и долгосрочное прогнозирование развития геокриологических процессов и возможных деформаций сооружений; разработка мероприятий, направленных на поддержание эксплуатационной пригодности трубопроводов.

Список литературы

1. Ершов Э.Д. Общая геокриология.М.Недра.1990.559с.
2. Pissart A. Les traces de lithalses et de pingos connues dans le monde // Hautes Fagnes. 2000 Vol. 239. P. 74 – 83.
3. Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Сибирская издательская фирма РАН. 1995. 198 с.
4. Shearer J.M., Macnab R.F., Pelletier B. R., Smith T.B. Submarine Pingos in the Beaufort Sea // Science. 1971. Vol. 174. N. 4011. P. 816 – 818.
5. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. 4. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.
6. Associate Committee on Geotechnical Research, Glossary of permafrost and related ground ice terms. National Research Council of Canada, Associate Committee on Geotechnical Research, Technical Memorandum 142. 1988.
7. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. Под редакцией действительного члена РАЕН, профессора Ю.К.Васильчука. – М:.Изд-во МГУ. 2008. 571с.
8. Mackay J.R. Pingo collapse and paleoclimatic reconstruction // Canadian Journal of Earth Sciences. 1988. Vol. 25. N4. P. 495 – 511.
9. Vasil□chuk Yu.K., Vasil□chuk A.C. The 14C Age of Palsas in Northern Eurasia // Radiocarbon. 1998. Vol. 40. N 2. P. 895 – 904.
10. Brown J., Nelson F., Brockett B., Outcalt S.I., Everett K.R. Observations on ice-cored mounds at Sukakpak Mountain, southcentral Brooks Range, Alaska // Proceedings, Fourth International Conference on Permafrost, vol. I: Washington, D.C.: National Academy Press. 1983. P. 91 – 96.
11. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа. 1973. 447с.
12. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК "Наука/Интерпериодика". 2002. 425 с.
13. Попов А.И. Мерзлотные явления в земной коре (криолитология). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. 304 с.
14. Тыртиков А.П. Лес на северном пределе в Азии. М. 1995. 144 с.
15. Вейсман Л.И. Исследования криогенных процессов методом ландшафтных индикаторов и вопросы их дешифрирования (на примере севера Западной Сибири) / Автореферат дисертации на соискание ученой степени кандидата геолого- минералогических наук. Зеленый. 1977. 24 с.
16. Пономарева О.Е. Мониторинг динамики поверхности бугров пучения вдоль трассы газопровода Надым-Пунга (северная тайга Западной Сибири) / Материалы третьей конференции геокриологов России. МГУ им. М.В. Ломоносова, 1-3 июня 2005 г. Том 2. Часть 3. Динамическая геокриология. Изд-во Моск. ун-та. 2005. С. 141 – 146.
17. Москаленко Н., Пономарева О., Устинова Е. Мониторинг экзогенных геологических процессов на трассе газопровода Надым-Пунга // Инженерные изыскания. 2007. №1. С. 34 – 36.
18. Шестернев Д.Д. Оценка пучиноопасности сезонно-промерзающих и сезонно-оттаивающих грунтов в условиях деградации многолетнемерзлых пород (на примере Читино-Ингодинской впадины) / Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандадата геолого-минералогических наук М.: МГУ. 2008. 24 с.
19. Vallee S., Payette S. Contrasted growth of black spruce (Picea mariana) forest trees at treeline associated with climate change over the last 400 years // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2004. Vol. 36. N 4. P. 400 – 406.
20. Lewkowicz A.G., Coultish T.L. Beaver Damming and Palsa Dynamics in a Subarctic Mountainous Environment, Wolf Creek, Yukon Territory, Canada // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2004. Vol. 36. N 2. P. 208 – 218.
21. Thorhallsdottir Th.E. Effects of Changes in Groundwater Level on Palsas in Central Iceland // Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography. 1994. Vol. 76. N 3. P. 161 – 167.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОСИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАГЛУБЛЕННОГО ТРУБОПРОВОДА С МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ

А. Б. Шабаров, П. Ю. Михайлов, А.А. Вакулин, М.Н. Вилков, И.А.Суровцев

ФГБОУ ВПО "Тюменский государственный университет", e-mail: kaf_mms@utmn.ru

Целью работы являлось создание расчетного метода, позволяющего прогнозировать высотное положение и напряжения в стенке подземного трубопровода в условиях морозного пучения грунта с учетом изменения по времени полей температуры, влажности и льдистости грунта.

Эксплуатационная надежность подземных трубопроводов во многом зависит от их напряженно-деформированного состояния, которое в свою очередь определяется, в частности высотным положением трубопровода. Высотное положение подземного трубопровода может изменится в результате силового взаимодействия с мерзлым пучинистым грунтом. Опубликовано значительное число работ, посвященных тепломассопереносу в пористых средах[1- 3 и др]. Проблема заключается в том, что до настоящего времени не существует надежных расчетных методов учитывающих взаимосвязь высотного положения трубы, температуры транспортируемого продукта, нестационарных полей температуры, влажности и льдистости грунта, окружающего трубопровод.

Ключевым вопросом для определения высотного положения трубопровода при морозном пучении является определение нестационарных полей температур, влажности и льдистости грунта вблизи . Авторами разработана физико-математическая модель [4,5] и компьютерная программа "Heatmassgrunt", основанная на уравнении тепломассопереноса в пористой многофазной среде, состоящей из 6 компонент (i=1, 2..., 6): из материала скелета грунта (i=1), свободной (i=2) и связанной (i=3) воды, льда (i=4), паров влаги (i=5), воздуха в поровом пространстве (i=6).

Морозным пучением грунтов называется увеличение их объема, вызванное как переходом части содержащейся в них воды в лед, так и вследствие поступления воды к фронту промерзания извне.

Основными количественными характеристиками пучинистых грунтов являются:

1) величина (деформация) морозного пучения: h_f.

2) интенсивность пучения: $\cdot_f = \frac{dh_f}{dz}$

При промерзании пучинистых грунтов происходит увеличение их объема. Если существуют какие-либо внешние ограничения, препятствующие увеличению объема, то в промерзающем грунте возникают напряжения. Связь между нормальными силами пучения и деформациями может быть аппроксимирована степенной функцией вида:

$$p_{\text{н}} = p_{\text{н}}^{\max} U^2 \qquad (1)$$

где $p_{\text{н}}^{\max}$ –максимальное давление развиваемое морозным пучением, а $U = \frac{h_f^{\max} - h_f}{h_f^{\max}} = 1 - \frac{h_f}{h_f^{\max}}$ – степень стесненности деформации пучения по вертикали.

Давление морозного пучения грунта приложено не только к нижней части трубопровода (рис. 1), но и к талому грунту, находящемуся в непосредственной близости к фронту промерзания. Это означает, что максимальное давление пучения, реализуемое при U=1, не может превысить сопротивления талого грунта, которое зависит от типа грунта:

$$p_{\text{н}}^{\max} \le R_0 \qquad (2)$$

$$EIW^{IV} + NW^{II} - q_n = 0 \qquad (3)$$

где EI – изгибная жесткость трубопровода, N – продольное усилие в его стенки, qn – погонное значение нормальных сил морозного пучения.

Высотное положение грунта описывается дифференциальным уравнением на участке трубопровода $(-L_0, L_0)$ [6]:

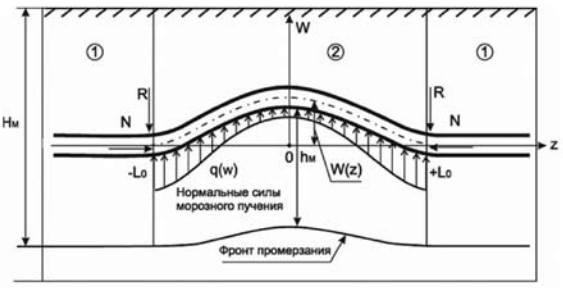


Рисунок 1 - Расчетная схема силового взаимодействия трубопровода с грунтом.

$$EIW^{IV} + NW^{II} - D_{\text{н}} p_{\text{н}}^{\max}\left(1 - \frac{W}{\Delta H_\tau}\right) = 0, \qquad (4)$$

с граничными условиями:

$$W(\pm L_0;\tau) = W'(\pm L_0;\tau) = 0, \qquad (5)$$

где W – вертикальное смещение оси трубопровода. Величина свободного пучения грунта под трубопроводом определяется нами по результатам расчета нестационарных полей льдистости:

$$\Delta H_\tau = \frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\Delta h_{ij\tau}}{m}, \qquad (6)$$

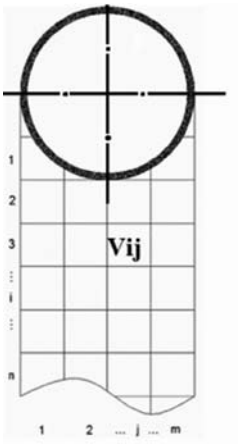


Рисунок 2 - Схема контрольных объемов для вычисления пучения грунта вблизи трубопровода.

где $\Delta h_{ij\tau}$– величина пучения грунта в контрольном объеме (рис. 2).

$$\Delta h_{ij\tau} = \begin{cases} 0, \text{при} & e \geq \dfrac{\rho_{Wij\tau}}{\rho_W^{(0)}} + \dfrac{\rho_{Iij\tau}}{\rho_I^{(0)}} \\ \dfrac{V_{ij}}{S_{ij}}\left(\dfrac{\rho_{Wij\tau}}{\rho_W^{(0)}} + \dfrac{\rho_{Iij\tau}}{\rho_I^{(0)}} - e\right), & e \leq \dfrac{\rho_{Wij\tau}}{\rho_W^{(0)}} + \dfrac{\rho_{Iij\tau}}{\rho_I^{(0)}} \end{cases} \quad (7)$$

где: e– пористость грунта; ρ_{0w} ρ_{0l}- истинная плотность воды, льда; $\rho_{Wij\tau}$, $\rho_{Iij\tau}$– приведенная плотность воды, льда; V_{ij}, S_{ij} – объем и площадь основания контрольного объема.

Расчет вертикального смещения трубопровода делаем с помощью программы, написанной на кафедре. Через 50 часов (рис. 3) вертикальное смещение трубы в центре (при z=0 м) равно 0,0017388м.

Через 80 часов (окончание эксперимента рис. 4) вертикальное смещение трубы в центре (при z=0 м) равно 0,0022996м.

Достоверность разработанной физико-математической модели и компьютерной программы была проверена на экспериментальном стенде, на физическом факультете в ТюмГУ. На рис. 5 в качестве примера приведено изменение по времени высотного положения оси трубопровода в условиях морозного пучения.

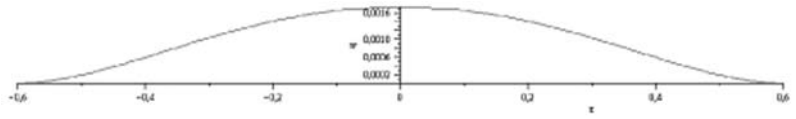


Рисунок 3 - Вертикальное смещение трубы в центре.

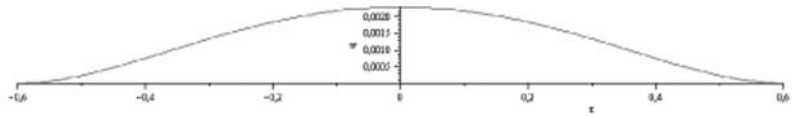


Рисунок 4 - Вертикальное смещение трубы в центре.

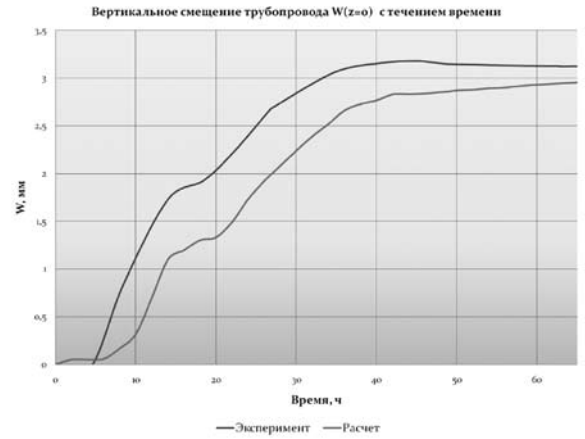


Рисунок 5 - Вертикальное смещение модельного трубопровода.

Основные выводы могут быть сведены к следующему:

1)Разработан расчетный метод, алгоритм и компьютерная программа "Heatmassgrunt", позволяющие определять высотное положение подземного трубопровода в условиях морозного пучения грунта и основанные на вычислении полей температур, влажности и льдистости грунта.

2)Проведено расчетно-экспериментальное исследование. Относительная приведенная погрешность в определении максимального вертикального смещения модельного трубопровода составила не более 20%.

Список литературы

1.Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.I. М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 464с.

2.Теория тепломассообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высш. шк., 1979. 495с.

3.Цытович И.А. Механика мерзлых грунтов: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1973. 448с.

4.Шабаров А.Б., Михайлов П.Ю., Пульдас Л.А., Вакулин А.А. Физико-математическое моделирование полей температуры и льдистости в мерзлых грунтах вокруг заглубленного трубопровода // Вестник ТюмГУ. №6. 2010. С. 14-19.

5. Пульдас Л.А. Нестационарные тепловые режимы в гражданских зданиях: автореф. дис. канд. техн. наук. Тюмень, 2008. 20с.

6. Горковенко А. И. . Основы теории расчета пространственного положения подземного трубопровода под влиянием сезонных процессов: автореф. дис. доктора техн. наук. Тюмень, 2006. 31с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО КРИОГЕННОГО РЕСУРСА, ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА, ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЧНОСТЬЮ И УСТОЙЧИВОСТЬЮ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ, КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ГРАЖДАНСКИХ ОБЪЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В КРИОЛИТОЗОНЕ

А.П. Попов[1], В.В. Самсонова[2]

[1]ООО «Старый Дом», [2]Институт криогенных ресурсов ТюмГНГУ, ТФСО РАН

Актуальность.

Вопросам обеспечения механической безопасности зданий и инженерных сооружений уделяется все больше и больше внимания вследствие повышения риска возникновения техногенных катастроф в связи с актуализацией факторов как объективного, так и субъективного характера.

Об этом свидетельствуют не только выступления первых лиц государства, но и нормотворчество соответствующих госорганов за истекшие 3-4 года. К такого рода документам следует отнести Постановление Правительства РФ № 87 от 16 февраля 2008 г. «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию», ГОСТ Р 21.1101-2009 «Основные требования к проектной и рабочей документации», Федеральный Закон № 384 от 30.12.2009 г. «Технический регламент «О безопасности зданий и сооружений», СП 22.13330-2010 «Основания зданий и сооружений».

С учетом того, что более 60 % территории России приурочено к зоне распространения многолетнемерзлых пород, а перспектива промышленного освоения недр связана с освоением Приполярных регионов, Восточной Сибири и Якутии, приведенные выше тезисы свидетельствуют о повышении актуальности решения научных и практических задач надежного фундаментостроения в криолитозоне для обеспечения механической безопасности грунтового основания, фундамента и надфундаментной конструкции.

Криогенные ресурсы территории России.

История создания надежного фундамента в пределах территорий распространения многолетнемерзлых пород тесно связана с индустриальным освоением Крайнего Севера и восточных территорий России в XX веке и представляет собой, по сути, «историю рационального использования криогенного ресурса территории строительства» [5] (Инженерные изыскания № 10, 2009 г.).

Естественные условия теплообмена грунтов инженерно-геокриологического разреза потенциальной площадки строительства с квазирегулярным (ежегодным) воздействием температуры атмосферного воздуха «формирует один и только один» тип многолетнемерзлого разреза, однозначно описываемый тремя характерными параметрами – мощностью слоя сезонного промерзания-протаивания, температурой на глубине нулевых теплооборотов и местоположением границ, маркирующих заглубленную кровлю многолетнемерзлых пород.

Указанные параметры обычно фиксируются при проведении инженерно-геологических изысканий площадки строительства, и «определяют», так называемый, «природный инвариант» (природный криогенный ресурс) площадки будущего строительства. Результатом осуществления процесса рационального проектирования инженерного сооружения должна быть, по сути своей, численно обоснованная замена «природного инварианта» (ресурса) на техногенный (изменение условий теплообмена на площадке и в пределах пятна застройки, локальная замена грунтов оснований посредством строительства искусственной насыпи), приводящая за 2-3 года эксплуатации, как минимум, «к восстановлению» природного инварианта после строительного воздействия.

Термин «природный инвариант» в рассматриваемом случае, вероятно, использован не совсем корректно, но автор хотел «обозначить» именно то свойство криогенной инженерно-геологической системы, которое позволяет ей вернуться к квазирегулярному состоянию нестационарного температурного поля сформированного (на момент проведения инженерных изысканий) под воздействием природных криогенных факторов, при «единичном (одномоментном) воздействии» минимального техногенного теплового импакта. Нестационарное температурное поле, описывающее «природный инвариант» будем называть «естественным» или «нулевым».

С точки зрения решения численной задачи теплообмена «природный инвариант» описывается одним и только одним набором значений параметров воздействия (например, среднемесячной температуры окружающей среды и коэффициентом теплоотдачи с единицы поверхности) при фиксированных теплотехнических параметрах инженерно-геологического разреза. «Вычисление»

значений этих характеристик «природного ресурса территории строительства» должно предшествовать собственно «численному поиску» адекватных теплотехнических решений, «заменяющих» природный инвариант. Иными словами должно быть «доказано», что естественное нестационарное температурное поле криогенной инженерно-геологической системы на момент начала техногенного строительного и эксплуатационного воздействия находится в «устойчивом», квазирегулярном состоянии.

Описанные выше мероприятия позволяют осуществить своеобразную проверку массива исходных сведений о криогенной инженерно-геологической системе, которые были собраны инженер-геологом при осуществлении инженерных изысканий для строительства. В случае некорректности этого массива сведений, естественное квазирегулярное состояние нестационарного температурного поля может быть «достигнуто» лишь при таких параметрах теплообмена, которые не характерны для выбранной площадки строительства. Например, для достижения значений, измеренных в процессе изысканий, температур грунтов среднезимний снег на площадке (коэффициент теплоотдачи) приходится «брать» эквивалентным трехметровой его величине при метеопараметре 0,4-0,5 м. Это позволяет усомниться в корректности исходных сведений и осуществить их своевременную критичную корректировку.

Механическая безопасность инженерных сооружений.

Механическая безопасность определена Федеральным законом № 384 от 30.12.2009 г. «Технический регламент «О безопасности зданий и сооружений» (Статья 2 п. 8) как состояние грунтовых оснований зданий и сооружений, строительных конструкций при котором отсутствует риск, связанный с причинением вреда жизни и здоровью граждан, имуществу физических и юридических лиц, окружающей среде вследствие разрушения или потери устойчивости строительного сооружения или его части.

Законодательные требования к составу и содержанию проектной документации для строительства обязывают проектные организации не только «…обосновать прочность и устойчивость грунтовых оснований, пространственную неизменяемость строительных конструкций в процессе строительства и последующей эксплуатации…» (п. 14 и п. 36 Постановление правительства № 87 от 16.02.2008 г. «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию»), но и обоснованно назначить количественные и качественные показатели свойств грунтов оснований, конструкций и материалов, элементов систем инженерно-технического обеспечения, которые обеспечивают соответствие здания и сооружения требованиям безопасности (ФЗ № 384).

Упомянутые показатели предложено именовать «параметрами и характеристиками безопасности зданий и сооружений» (Статья 2 п. 28 , ФЗ № 384 от 3.12.2009 г.), а **механическую безопасность** предписано обеспечивать посредством «**установления** соответствующих требованиям безопасности **проектных значений параметров** зданий и сооружений и качественных **характеристик в течение всего жизненного цикла** здания или **сооружения, реализации указанных значений** параметров и характеристик **в процессе строительства**, реконструкции, капитального ремонта **и поддержания** состояния таких **параметров и характеристик** (Статья 5 п. 1).

Проектирование (численное обоснование) температурного режима многолетнемерзлых грунтов в процессе техногенного строительного разрушения природного криогенного инварианта и дальнейшего теплового воздействия в процессе эксплуатации как раз и является процессом обоснованного **«установления соответствующим требованиям механической безопасности проектных значений параметров и характеристик зданий и сооружений в течение всего жизненного цикла»** в части прочностных и деформационных характеристик многолетнемерзлых грунтов.

Процесс **«поддержания состояния ... параметров и характеристик на требуемом уровне в период эксплуатации»** требует планирования (регламентирования), уже на стадии проектирования, периодической натурной фиксации абсолютных значений физических величин, определяющих сам процесс восстановления «природного инварианта» или перехода последнего на более стабильный (проектный) уровень. Таким образом, речь может идти о создании специализированного раздела проектной документации, в котором определяются (регламентируются) требования, принципиальные информационные решения и конкретные технические устройства для создания (строительства) специализированной инженерно-информационной системы обеспечивающей службы эксплуатации и эксплуатационного надзора информацией о текущем состоянии механической безопасности здания или сооружения. Требования к созданию и «эксплуатации» такого рода систем (систем геотехнического мониторинга) в настоящее время уже «заявлено» в отраслевой нормативной документации (СТО Газпром) образца 2006 года и в настоящий момент нашло свое развитие, и не только для зоны распространения многолетнемерзлых пород, в государственных стройнормативах (СП 22.13330-2010)

Параметры и характеристики механической безопасности.

Сохранение «устойчивости положения», а, следовательно, и «устойчивости формы», потеря которой есть начальная фаза разрушения сооружения, преимущественно обеспечивается динамикой прочностных и деформационных характеристик грунтов оснований в процессе строительства и

эксплуатации. Безусловно, «устойчивость формы конструкции» может быть обеспечена и «значительным запасом прочности», заложенным в надфундаментную часть здания и сооружения, однако материальные затраты, на такого рода мероприятия, заставляют проектировщика «поискать» другие, альтернативные пути решения поставленной задачи.

Как известно, прочностные и деформационные характеристики грунтов оснований зданий и инженерных сооружений определяются преимущественно динамикой 2-х природных параметров «влажность» и «температура». При этом на территориях распространения талых пород преимущественный фактор – динамика влажностного режима, а в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, где наличие воды в жидкой фазе имеет место лишь в слое сезонного промерзания-оттаивания, механические и деформационные характеристики многолетнемерзлых грунтов определяются, в основном, их температурой в процессе строительства и эксплуатации. Кроме этого динамика техногенных температур грунтов оснований определяет наличие и скорости проистекания опасных природных криогенных процессов, чье влияние может сказаться на «эксплуатационных» параметрах безопасности зданий и инженерных сооружений.

Технологии проектирования (численного обоснования) параметров и характеристик механической безопасности.

Действующие в настоящее время строительные нормы и правила для территории криолитозоны регламентируют, по сути, реализацию следующей цепочки технологических операций:

• анализ материалов инженерных изысканий (механические и деформационные характеристики грунтов на момент проведения инженерных изысканий);

• анализ конструктивной схемы, особенностей строительства, технологического режима эксплуатации инженерного сооружения (механические и тепловые эксплуатационные нагрузки);

• расчет теплового режима грунтов оснований в процессе эксплуатации (обоснование принципа использования грунтов оснований);

• выбор и расчета устройств и мероприятий, обеспечивающих соблюдение обоснованного расчетом теплового режима грунтов в основании сооружения в процессе его строительства и эксплуатации;

• расчет механического взаимодействия объекта с многолетнемерзлыми грунтами оснований с возможным изменением этого взаимодействия в процессе строительства и последующей эксплуатации;

• расчет напряженно-деформированного состояния надфундаментных конструкций, позволяющего компенсировать возможные эксплуатационные деформации фундаментов.

К сожалению, прогноз теплового режима грунтов основания в настоящее время определен к выполнению на стадии «инженерные изыскания», когда инженер-геолог просто еще не располагает достаточной информацией о значениях техногенных нагрузок, ни в процессе строительства, ни в процессе эксплуатации. Тем не менее, в его распоряжении «имеется» стандартизированный «математический аппарат» для решения задачи численного геокриологического прогноза. (РСН 67-87 «Инженерные изыскания. Составление геокриологического прогноза численными методами»). Упомянутые нормы «реализуют» алгоритм решения нестационарного неоднородного уравнения теплопроводности в анизотропной среде с наличием в последней источников тепла (холода) и подвижных границ раздела фаз воды. Решение систем дифференциальных уравнений предлагается производить методом конечных разностей с использованием явной схемы аппроксимации исходного дифференциального уравнения, записанного в энтальпийной форме.

Процесс строительства и последующей эксплуатации инженерного сооружения в криолитозоне есть «преобразование» температурного поля грунтов под действием последовательного изменения природных (граничных) и искусственных (преимущественно внутренних) тепловых источников воздействия. Такая «последовательная» смена источников температурного воздействия и теплофизических свойств материалов (естественных грунтов оснований, грунтов искусственных насыпей, теплоизолирующих материалов, термостабилизирующих устройств и пр.), позволяют реализовать в процессе проектирования численное обоснование теплового воздействия на ММП не как единичный расчет, а как «вычислительный эксперимент», моделирующий процесс строительства, последующей эксплуатации, техногенных отказов термостабилизирующих устройств, «строительного брака» при обустройстве теплоизолирующих покрытий, последствий техногенного снегонакопления и глобального потепления климата, результативности технических тепломелиоративных мероприятий при последующей реконструкции инженерного сооружения.

Технология «проведения такого вычислительного эксперимента» разработана в развитие НИР «Разработка и внедрение методики прогнозирования теплового взаимодействия объектов газового комплекса с многолетнемерзлыми грунтами. Научно-технический уровень подтвержден дипломом лауреата премии ОАО «Газпром» за лучшую научно-техническую разработку. Постановление Правления ОАО «Газпром» № 61 от 29 августа 2002 г.

Методологические основы постановки и проведения непосредственно в процессе проектирования такого вычислительного эксперимента – криогеотехнологического прогнозирования – признаны в 2005 г. ВАКом России «новым научным направлением» в заключении на диссертационную работу по соисканию степени доктора технических наук [1].

Криогенный ресурс территории и способы эффективного его использования при строительстве безопасных зданий и сооружений.

Вся история строительного освоения территории распространения многолетнемерзлых пород связана с рациональным использованием природного (атмосферного и литологического) криогенного ресурса. Основа устойчивости фундамента на многолетнемерзлых грунтах – сохранение в процессе эксплуатации неизменных температур грунтов (литологический ресурс). Примером этому могут служить многочисленные решения по тепловой изоляции полов зданий и сооружений, строительство «холодных» подвалов, «охлаждающие» отсыпки и пр. Атмосферный ресурс стали активно использовать с 20-х годов прошлого века посредством обустройства проветриваемых подполий (Якутск) и вентилируемых каналов (Магадан). Последующие этапы промышленного освоения Севера привнес в арсенал строителей такие решения, как жидкостные охлаждающие естественнодействующие системы (Норильск, Воркута, «сваи Гапеева»), различные модификации энергоемких рассольных охлаждающих систем и парожидкостных трубчатых естественнодействующих термостабилизаторов (Воркута, Мирный, Аляска, сезонно-охлаждающие устройства (СОУ)), горизонтальных и вертикальных сезоннооохлаждающих систем (Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Якутия, Чукотка, (ГЕТ (ВЕТ) СТС)).

Наиболее перспективными в настоящее время являются способы управления криогенным ресурсом, связанные с использованием комбинированной (пассивно-активной) теплоизоляцией, основанной на применении современных теплоизолирующих материалов и трубчатых сезоннодействующих неэнергоемких охлаждающих систем, в которых используются в качестве теплоносителя жидкости, кипящие при низких температурах.

Именно на этом основана серия способов управления тепловым состоянием грунтовых оснований, вмещающих устья кустовых добывающих скважин, фундаменты трубопроводных обвязок, производственных и административных зданий, а именно:

патент РФ 2127356 от 16.02.1998 г, «Способ теплоизоляции устьевой зоны добывающей скважины в многолетнемерзлых породах и устройство для его осуществления».

патент 2158353 от 10.03.1999 г., «Способ стабилизации теплового состояния устьевой зоны скважины в многолетнемерзлых породах»;

патент РФ 2209934 от 15.06.2002 г., «Способ стабилизации системы скважина-породы в криолитозоне;

патент РФ 2159308 от 10.03.1999 г., «Способ повышения устойчивости свайных фундаментов в криолитозоне»;

патент 2157872 от 26.12 1996 г., «Конструкция насыпного охлаждаемого основания сооружений и способ температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов».

Способы были использованы в проектных решениях ОАО «ВНИПИГаздобыча» при разработке ПСД для обустройства месторождений полуострова Ямал. Стабильный и управляемый температурный режим грунтов, позволил, в том числе, обосновать «…прочность, устойчивость … пространственную неизменность конструкций зданий и сооружений в процессе их строительства и дальнейшей эксплуатации…», что в свою очередь позволило получить положительное решение Главгосэкспертизы на проекты «Обустройство сеноман-аптских залежей Бованенковского НГКМ» и «Система магистральных газопроводов Бованенко-Ухта»

Развитие технологий управления криогенным ресурсом тесно связано с освоением проектным сообществом способов расчета температурного режима многолетнемерзлых грунтов оснований инженерных сооружений. Математический аппарат для моделирования упомянутого физического процесса достаточно глубоко проработан не одним поколением ученых-геокриологов. Тем не менее, до 80-х годов прошлого века в нормативные правила были «включены» лишь методики оценки теплообмена инженерного сооружения с ММП, основанные, преимущественно на способе теплового баланса (СНиП 2.02.04-88) или на решении стационарной задачи для одномерных однородных сред («Рекомендации по проектированию и применению в строительстве охлаждающих установок, работающих без энергетических затрат», НИИОСП – 1984).

Объективной причиной этому являлось недостаточность развития компьютерной техники, обеспечивающей применение приближенных (сеточных) способов решения исходного уравнения теплопроводности в пористых средах с наличием подвижной границы раздела фаз (задача Стефана). Единственный норматив, позволяющий корректно описать тепловое взаимодействие сезонно-охлаждающего устройства с многолетнемерзлыми породами, разработан ФГУП «Фундаментпроект» в выпущен в конце 80-х годов. По-видимому, именно эти годы следует считать началом «осознанного» проектирования способов искусственного управления температурным полем грунтов оснований и широкомасштабного применения в строительстве трубчатых сезонно-охлаждающих систем (СОУ) малого диаметра.

Действительно, одномерная постановка, вследствие симметрии температурного поля позволяла «просчитать» работу отдельного термостабилизатора, определить радиус промораживания в зависимости от длительности его работы, тем не менее, оставались «открытыми» вопросы «летнего простоя» СОУ и «тепловой интерференции» соседних испарительных колонок при использовании в техническом решении отдельных СОУ в единой охлаждающей системе.

Следует отметить ключевой момент в процессе использования инженерами-проектировщиками

способов расчета нестационарного температурного поля многолетнемерзлых пород под воздействием, как природных факторов, так и сезонно-охлаждающих систем. В 90-х годах в МГУ им. Ломоносова коллективом авторов под руководством проф. Л.Н. Хрусталева была разработана программная среда, позволяющая достаточно легко производить постановку и решение двумерных стефановских задач для декартовой и цилиндрической симметрии анизотропной (плоскопараллельной) расчетной среды (области). Самым важным в этом процессе было даже не то, что появился реальный способ обоснования динамики прочностных и деформационных характеристик многолетнемерзлых грунтов оснований в эксплуатационный период, а «дружественный интерфейс программной среды», позволивший «построить» на этой программной среде семинарный курс геотехники в криолитозоне и обучить несколько поколений студентов-геокриологов практическим навыкам моделирования. Инженерному сообществу была предоставлена своеобразная «простенькая логарифмическая линейка» позволившая даже студенту разобраться в особенностях теплообмена геотехнических систем и «строительного формирования проектного инварианта пятна застройки».

Конечно, двумерная постановка исходной задачи не предусматривала корректного расчета для конкретных инженерных сооружений, тем не менее, «закрывала» вопросы оценки воздействия вне зоны влияния «краевых эффектов». Например, программная среда МГУ успешно использовалась для моделирования геотехнических систем, симметрия температурного поля которых позволяла «пренебречь» третьей пространственной координатой, например, для сооружений с длиной в разы большей, чем ширина, для подземных и наземных систем трубопроводного транспорта, горизонтальных трубчатых сезонно-охлаждающих систем, вертикальных, в случае «равномерного» расположения испарителей в пространстве грунтового массива, наклонных и вертикальных мерзлотных завес и пр. По оценке автора двумерной постановкой можно «закрыть» до 70% инженерных задач фундаментостроения в криолитозоне.

Одновременно с простыми двумерными постановками были предприняты попытки «освоить промышленное применение» 3D задач. Здесь следует отметить усилия коллектива авторов ФГУП «Фундаментпроект» под руководством д.г.м.н. М.А. Минкина и коллектив кафедры механики мерзлых грунтов Тюменской архитектурно-строительной академии во главе с д.т.н. Дубиной М.М. Разработанные ими 3D программные комплексы вот уже больше десяти лет являются основой для успешного продвижения на рынок услуг по проектированию оснований и фундаментов для ММП инновационных технических решений.

И «заграница» не стоит на месте. В 2005-2007 г.г. канадскими инженерами выпушен на рынок программный продукт «GeoStudio», позволяющий выполнять 2D постановки. Автору не известны примеры успешного применения среды на российских объектах, тем не менее, в информационном интернет-пространстве существует соответствующий сайт, на котором появляются сведения о его успешном использовании в инженерном деле.

Изложенное выше позволяет сформулировать следующий промежуточный вывод - процесс рационального проектирования (обоснование необходимых пространственных, технических и технологических характеристик термостабилизирующих систем) теплового воздействия на грунты оснований инженерных сооружений и систем, управляющих криогенным ресурсом связан с возможностью решения уравнения теплопроводности в 2D и 3D постановке с наличием в исследуемой области подвижной границы раздела фаз.

Программный комплекс для создания баз данных расчетных сценариев теплового взаимодействия геотехнических систем «многолетнемерзлые грунты оснований – средства управления криогенным ресурсом – инженерное сооружение – окружающая среда»

В 2010 г. коллективом авторов под руководством д.т.н. А.П.Попова была закончена разработка программной среды «TermoStab 67-87», предназначенной для создания баз данных расчетных сценариев нестационарного температурного взаимодействия геотехнической системы «фундамент – многолетнемерзлый грунт основания – термостабилизирующие устройства» с окружающей средой.

Основным достоинством программного продукта является использование в качестве математического алгоритма, нормированного в РСН 67-87 «Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами». В основе алгоритма решение нестационарного уравнения теплопроводности с подвижными фазовыми границами методом конечных разностей с использованием явной схемы аппроксимации исходного дифференциального уравнения, записанного в энтальпийной форме.

Для корректности описания вопроса следует отметить, что практическая реализация традиционного алгоритма (РСН 67-87) сопряжена с техническими трудностями, обусловленными с недостаточной вычислительной мощностью компьютерной техники. Для решения сложных трехмерных задач требуется время работы персональной вычислительной машины равное 10-15 суткам непрерывной работы. Способы интенсификации расчетов с помощью организации «распределенного процесса вычислений» на многоядерных процессорах, хоть и «закрывают» потребности существующие «сегодня», однако не являются перспективным направлением развития «на завтра».

Вместе с тем, алгоритм постановки задачи, реализованный группой проф. Л.Н. Хрусталева в МГУ позволяет надеяться на возможность ускорения процесса вычислений. По имеющимся в на-

шем распоряжении сведениям, упомянутым коллективом, в декабре 2011 года будет выпущена и сдана Заказчику трехмерная версия программного продукта.

Еще один, «более быстрый» алгоритм решения стефановской задачи в трехмерной постановке разработан коллективом сотрудников МВТУ им. Баумана в рамках реализации разработки ведомственного стандарта по моделированию техногенного температурного воздействия на ММП. Сведения, будет ли этот алгоритм реализован авторами в форме программного продукта, и когда это произойдет, отсутствуют.

Процесс разработки и коммерческого использования в проектном комплексе «более лучших алгоритмов» не может не радовать, тем не менее, государственная сертификация программных комплексов на предмет соответствия строительным нормам и правилам, по нашему мнению, будет достаточно проблематичным вопросом. Выход из сложившейся ситуации мы видим в совмещении новых алгоритмов с традиционным (РСН 67-87) в едином программном комплексе с альтернативным их запуском.

В 2011 году в рамках развития программного пакета «TermoStab 67-87» выпущен на рынок обновленный модуль «TermoStabUniversal», в котором как раз и «реализовано» высказанное выше положение. Программа, по выбору пользователя, дает возможность на одних и тех же исходных данных реализовать 3, упомянутые выше, численные постановки, сравнить полученные решения и выбрать для разработки технических мероприятий наиболее адекватный результат.

В целом, реализованный подход позволяет в полном объеме выполнять требования пункта 6 статьи 15 ФЗ-384 «Технический регламент «О безопасности зданий и сооружений» по поводу использования при обосновании соответствия проектных параметров требованиям механической безопасности апробированных (сертифицированных уполномоченным государственным органом) расчетных методик.

Дружественный интерфейс позволяет снизить требования к квалификации специалистов, осуществляющих математическое моделирование и перевести упомянутое действие из разряда работ по «научно-техническому сопровождению проектирования» непосредственно в «проектное производство».

Инновационные конструктивные особенности средств управления криогенным ресурсом (парожидкостные охлаждающие системы) «мульти ГЕТ Протвино»

В настоящей статье мы уже обсудили один из факторов, «сдерживающих» практическое применение технических систем, управляющих температурным режимом грунтов оснований – недостаточное развитие «простых» алгоритмов, описывающих физический процесс теплообмена грунтового массива с окружающей средой. Настоящий раздел статьи мы хотели бы посвятить обсуждению второго фактора – надежности работы самого охлаждающего устройства.

История развития процесса внедрения охлаждающих устройств в практику строительного производства тесно связана с надежностью их работы, с «культурой» строительного производства, которая должна гарантировать работоспособность устройств при монтаже «собственными силами» на строительной площадке. Следует вспомнить, что изначально даже жидкостные охладители не пользовались популярностью у проектировщиков, поскольку даже минимальные утечки хладагента (керосина) в грунты основания существенно снижали силы смерзания сваи с многолетнемерзлым грунтом. Первый опыт массового применения парожидкостных систем (аммиак, углекислый газ, хладоны), вследствие необходимости заправки устройства на строительной площадке через специальный заправочный штуцер, так же не «приносил 100 % результата». Большинство устройств, вследствие утечек хладагента не «работали» больше одного сезона. Коренным образом изменить ситуацию помог выпуск изготовителями «охлаждающих устройств полной заводской готовности». Заправка хладоном производилась непосредственно на заводе с обеспечением соответствующего контроля качества продукции. Заправочный штуцер был исключен из конструкции СОУ.

Следующий «шаг», подтолкнувший к началу массового использования сезонно-охлаждающих систем в строительном производстве – разработка и использование портативных устройств автоматизированной сварки труб малого диаметра с одновременным инструментальным контролем качества сварного соединения. Это позволило существенно снизить требования к квалификации производственного персонала и добиться «строительной» надежности не только отдельных охлаждающих устройств (глубинные СОУ), но и целых сезонно-охлаждающих систем (ГЕТ и ВЕТ СТС). Пионером использования такого подхода является ООО НПФ «ФундаментСтройАркос» (г. Тюмень).

Однако, упомянутый маркетинговый ход «не очень понравился» обычным строительным организациям, поскольку «привязывает» процесс строймонтажа систем к «единственному, почти монопольному подрядчику», а в случае принятия решения о самостоятельном выполнении сварки и заправки охлаждающей системы на площадке строительства, снимает с завода-изготовителя ответственность за ее работоспособность в эксплуатационный период. Выходом из сложившейся ситуации может быть, опять же, «полная заводская готовность», но не одиночного изделия, а всей системы.

Таким образом, требования к инновационным парожидкостным сезонно-действующим охлаж-

дающим системам могут быть сформулированы следующим образом: конструкция должна состоять из отдельных элементов «полной заводской готовности» и система должна «собираться», а не «свариваться» на стройплощадке с помощью механических элементов крепления.

О принципиальной возможности разработки такой системы свидетельствуют известные технические решения по передаче тепла (холода) с помощью тепловых труб. Отличительной особенностью этого класса устройств от термосифона (СОУ) является использование для организации движения жидкой и парообразной фаз хладагента не гравитационных сил, а капиллярного напора. Для этого внутри элементов системы размещают различного рода устройства-«фитили» (капиллярно-пористые среды и системы). Именно эту особенность – теплообмен в условиях, когда «невозможно» использовать гравитацию, например в горизонтальных элементах испарителя традиционной охлаждающей системы, и следует использовать на практике.

Можно привести некоторые примеры использования тепловых труб в смежных отраслях техники. Так в техническом решении по системам отопления залов Третьяковской галереи использованы решения с тепловыми трубами. Это позволило исключить возможность отказа традиционных жидкостных систем (необходима стабильная влажность в помещениях) и исключить пожароопасность по сравнению с использованием электронагревательных решений. Следующий пример использования тепловых труб читатель может обнаружить в любом портативном компьютере (ноутбуке). Охлаждение процессора производится не с помощью традиционного для компьютерной техники вентилятора, а отвод тепла реализован с использованием «тепловой трубы». Далее, уникальные теплоизолирующие свойства покрытий летательных (в том числе и космических) аппаратов, ядерных реакторов во многом обусловлены применением такого устройства, как тепловая труба.

Весной 2011 года автором разработана проектная документация на сезонно-охлаждающую систему, реализующую описанные выше идеи. В качестве строительного объекта, на котором использована инновационная система, был выбран фундамент 4-х резервуаров РВС-5000 на нефтебазе г. Певек. Задача стояла в разработке альтернативного варианта (Рис. 1) горизонтальной аммиачной сезонно-охлаждающей «системе ГЕТ СТС – Фундаментстройаркос» с единым конденсаторным блоком и двумя контурами охлаждения (рабочим и резервным). Заказчик, получив серьезные замечания Главгосэкспертизы по вопросам безопасности применения аммиака в качестве хладагента прорабатывал возможные варианты решения проблемы. Кроме того Заказчиком были определены требования к геометрическим размерам поставляемого оборудования для его упаковки и транспортировки морским контейнером (длина элемента не более 11,8 м). Предложенное техническое решение включало в себя:

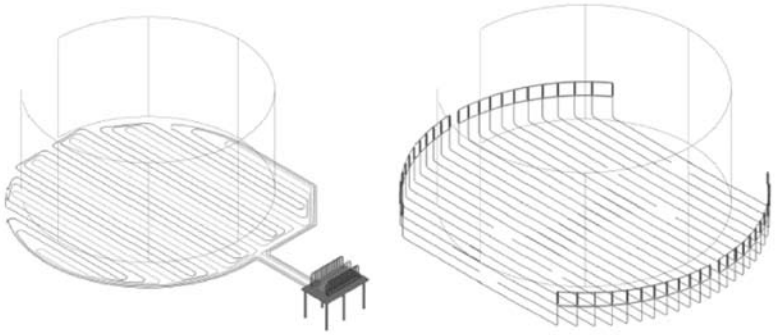


Рисунок 1 - Принципиальная конструкция охлаждающих систем «ГЕТ СТС Фундаментстройаркос» (а) и «мульти-ГЕТ ТСГ Протвино» (б)

• использование 48 отдельных слабонаклонных (субгоризонтальных) термостабилизаторов (СОУ) с заполнением фреоновым хладагентом взамен единого испарителя (2 контура, рабочий и резервный) и единого конденсаторного блока (3 батареи с заправкой аммиаком на строительной площадке)

• использование тепловых труб для «удлинения» субгоризонтальных СОУ;

• применение принципа «полной заводской готовности» с монтажом на строительной площадке элементов системы механическими зажимами, взамен сварных работ и работ, связанных с контролем качества сварных соединений;

• использование нержавеющей стали в качестве материала для изготовления систем, взамен мероприятий по коррозионной защите элементов заменяемой системы, выполняемых на строительной площадке в аномальных климатических условиях;

• применение для механического крепления вертикальных элементов (конденсаторных блоков) двух ложементов (эстакада крепежная верхний элемент и эстакада крепежная нижний элемент) минимизирующих возможные «ошибки при монтаже», взамен затрат по созданию фундамента для площадки конденсаторного блока;

• использование в конструкции автоматизированных средств контроля работоспособности охлаждающих систем параметров и характеристик эксплуатационной механической безопасности в целом по объекту строительства.

На рисунке 2 представлены некоторые результаты, позволяющие сделать вывод об эксплуатационной надежности грунтового основания, а, следовательно, и фундамента на котором размещены резервуары.

В качестве закономерного результата удалось достигнуть следующих показателей:

• существенно повышена устойчивость системы к вероятным отказам элементов испарителя.

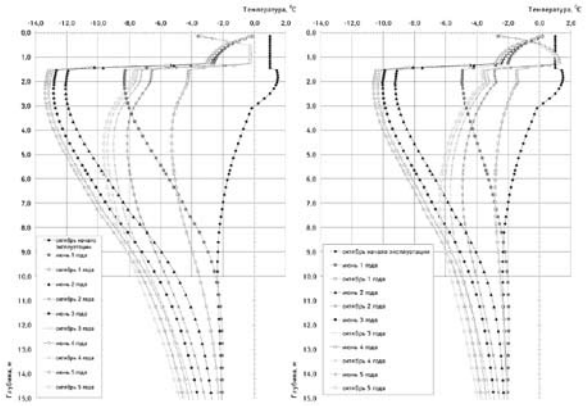


Рисунок 2 - Термограммы грунтов оснований при эксплуатации охлаждающей системы «мульти-ГЕТ ТСГ Протвино», а) – под центром резервуара, б) – под краем резервуара. Характерный «излом» термограмм на глубине 1,5 м приурочен к месту заложения теплоизолирующего экрана из пеноплекса.

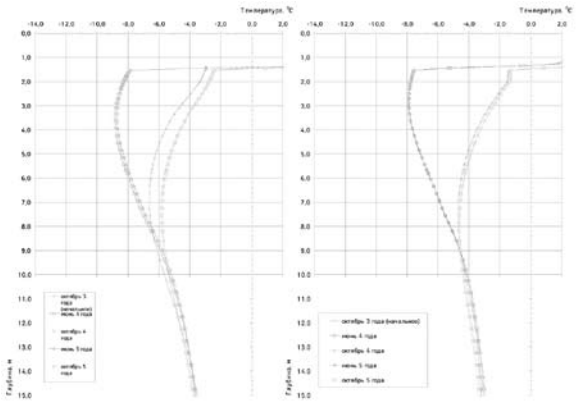


Рисунок 3 - Термограммы грунтов оснований. Отказ 50 % охлаждающих контуров после третьего сезона эксплуатации, а) – под центром резервуара, б) – под краем резервуара.

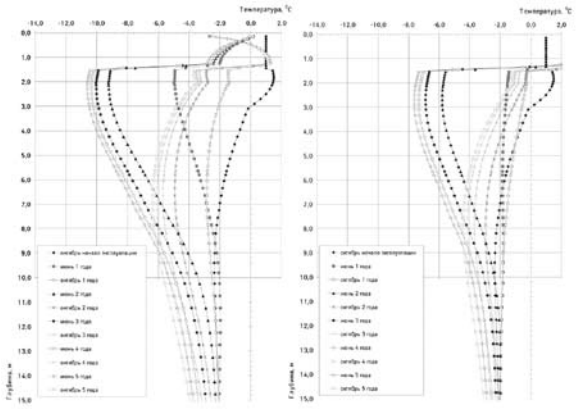


Рисунок 4 - Термограммы грунтов оснований. Отказ тепловых трубок охлаждающей системы «мульти-ГЕТ ТСГ Протвино», а) – под центром резервуара, б) – под краем резервуара.

Выполненное теплотехническое обоснование проектных решений свидетельствует о том, что выход из строя после третьего сезона эксплуатации половины из 48 «охлаждающих контуров» (субгоризонтальных СОУ) не приводит к отказу всей системы и существенно не влияет на ее работоспособность (рис.3). Выход из строя всех 30 тепловых труб после первого зимнего сезона работы охлаждающей системы (рис 4) не повлияет на поддержание проектных параметров и характеристик механической безопасности на проектном уровне в течение срока эксплуатации сооружения:

• использование в конструкции системы отдельных трубчатых элементов с максимальным размером 11,8 м позволили минимизировать затраты и создать транспортную упаковку (Рис 5.), которую возможно перевозить любым видом транспорта (автомобиль, железнодорожная платформа или вагон, морской транспортный контейнер) без ограничений. Например, доставка до порта Владивосток осуществлена автомобилем, а до Певека палубным грузом;

• строительно-монтажные операции, связанные с монтажом системы были настолько облегчены и не требовали от строительного персонала практически никакой квалификации, что Заказчик ограничился шеф-монтажными работами, выполненными двумя сотрудниками завода-изготовителя (ООО НьюФрост», г.Протвино);

• несмотря на использование более «дорогого» материала (нержавеющей стали) для изготовления элементов систем, включением в состав системы аппаратуры автоматизированного контроля ее работоспособности, увеличение затрат на проектирование в части создания расчетной пояснительной записки с результатами 3D теплотехнического обоснования проектных решений, общие затраты на строительство (проект + изготовление изделий + транспорт + строительно-монтажные работы) сокращены более чем на 30 % по сравнению с традиционной аммиачной «системой ГЕТ СТС - Фундаментстройаркос».

• созданная в процессе проектирования численная 3D модель теплового взаимодействия геотехнической системы с окружающей средой позволила «исследовать» резервы надежности технического решения. На рис.6 представлены результаты одного из расчетных вариантов «описывающий динамику температурного режима грунтов в случае увеличения высоты искусственной насыпи до 4,5 метров, нагрева хранящегося в емкостном парке дизельного топлива в летний период до максимальных климатических температур и «зимнем его подогреве, вероятного наличия в разрезе коренных пород засоленных грунтов, вскрытых при проведении инженерных изысканий на сопредельных территориях и увеличением до 2,5 метров слоя сезонного протаивания, захороненного под грунты искусственной насыпи в период строительства.

Автору представляется обоснованным по своему выбору определить наименование описанному выше и реализованному в практическом строительном производстве новому классу охлаждающих систем, использующих в качестве инновационного элемента тепловые трубы для достижения «полной заводской готовности» изделия к практическому использованию.

Предлагается именовать такие системы «мульти ГЕТ ТСГ Протвино» (горизонтальная естественно-действующая трубчатая система температурной стабилизации грунтов с «множе-



Рисунок 5 - Отгрузка 4-х охлаждающий систем мульти-ГЕТ-Протвино, июль 2011 г.

ственными» конденсаторными блоками и контурами испарителей, впервые изготовленная на заводе ООО «НьюФрост» в г. Протвино).

В заключение настоящего раздела статьи автору представляется целесообразным обсудить некоторые особенности проектирования «систем мульти ГЕТ ТСГ Протвино».

Практическое проектирование сезонно-охлаждающих систем тесно связано с развитием навыка решения многомерных задач теплообмена в пористой анизотропной среде с подвижной границей раздела фаз насыщающего среду флюида. Так для корректного обоснования технического решения, а под этим термином мы подразумеваем не только расчет радиуса промораживания в зависимости от хладонагрузки, но и полную динамику регулярного температурного поля отдельного (одного) термостабилизатора, формирующегося вокруг СОУ за весь период его эксплуатации, необходимо решить двумерную задачу Стефана с записью исходного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах.

Решения, включающие в себя бесконечный ряд горизонтальных охлаждающих контуров одинаковой производительности могут быть смоделированы опять же двумерной постановкой задачи, но уже в декартовых координатах. Этому «способствует» симметрия техногенного теплового поля сезонно-охлаждающих ГЕТ-систем.

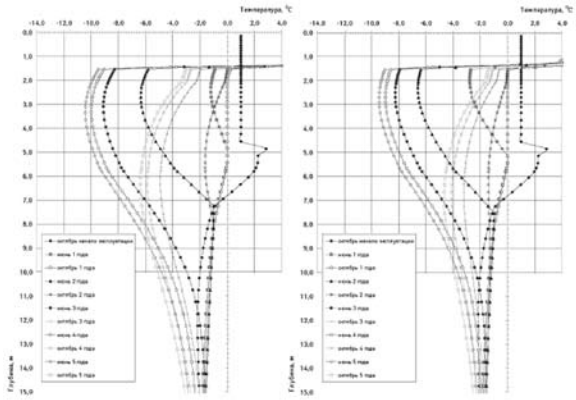


Рисунок 6 - Результаты численного исследования резерва надежности технического решения, а) – под центром резервуара, б) – под краем резервуара.

Теплотехническое моделирование нестационарного квазирегулярного температурного поля создаваемого бесконечным рядом отдельных, вертикально установленных в грунтовое основание термостабилизаторов (СОУ) можно свести к решению двумерной задачи в декартовых координатах, если «заменить» ряд вертикальных термостабилизаторов горизонтальными с соответствующей корректировкой «хладопроизводительности теплового источника» и теплофизических характеристик блоков расчетной области, расположенных между этими эквивалентными тепловыми источниками. Более подробную информацию о методике такой постановки читатель может обнаружить в работе [3].

Кольцевой контур из отдельных вертикальных СОУ, обеспечивающих механическую устойчивость грунтов приустьевой зоны добывающей скважины или, как эквивалент, решения по устьевым многоконтурным ВЕТ-системам, могут быть описаны двумерной постановкой задачи в цилиндрических координатах с заменой вертикальных СОУ на эквивалентные торообразные кольцевые охладители [2,3].

Технические решения по охлаждающим системам, предусматривающие размещение вертикальных охлаждающих элементов по сетке в пределах пятна застройки, нашедшие широкое применение в проектных решениях последнего пятилетия были обоснованы посредством теплотехнического моделирования с двумерной постановкой исходной задачи в декартовых координатах и использования подхода, аналогичного примененному автором при моделировании «мерзлотных завес» [4,5].

Двумерная постановка вполне «устраивала» проектировщика, когда он сталкивался с необходимостью описания единообразного воздействия соседних охлаждающих элементов применяемой системы, будь она горизонтальной, вертикальной или наклонной. Трехмерные задачи были достаточно редки. Примером этому могут послужить:

- интерференция кустовых добывающих скважин с устьевыми охлаждающими системами при решении задачи сближения устьев скважин;
- задача воздействия вертикального СОУ на несущую способность отдельной сваи;
- задача теплотехнического обоснования смены способа прокладки магистрального трубопровода (подземный, наземный, надземный);
- задача выхода газосборного коллектора на площадку переработки углеводородного флюида;
- задачи, связанные с теплотехническим обоснованием термостабилизации пространственно ограниченных подземных объектов (канализационные очистные сооружения, противорадиационные укрытия, подземные дренажные емкости);

• задачи, связанные с обоснованием «краевых эффектов» вблизи углов зданий промышленного и бытового назначения.

Отличительной особенностью постановки задачи теплотехнического обоснования воздействия на многолетнемерзлые грунты «системы мульти ГЕТ ТСГ Протвино» является то, что для нее параметр, описывающий холодильную мощность горизонтального охлаждающего элемента, анизотропен в пространстве (изменяется по третьей координате). Таким образом, задача теплотехнического обоснования параметров и характеристик механической безопасности в процессе строительства и дальнейшей эксплуатации не может быть сведена к двумерной постановке исходного уравнения теплопроводности. Требуется решение трехмерной задачи, что и было выполнено (Рис.7.) в процессе разработки проектной документации.

Именно эта особенность «увеличивает» затраты на проектирование с традиционных 5-7 % почти до 15 %.

Технология управления механической безопасностью зданий и инженерных сооружений в криолитозоне

Как упомянуто выше, механическая безопасность инженерных сооружений в криолитозоне определяется преимущественно прочностью и устойчивостью грунтов оснований, изменяющейся под воздействием «опасных» процессов природного и техногенного характера.

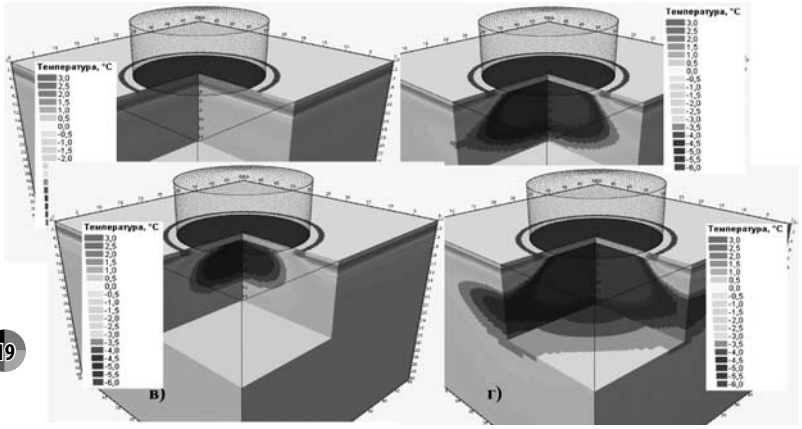


Рисунок 7 - Расчетное температурное поле грунтов в основании резервуаров с устройством теплоизоляционного экрана из пеноплекса мощностью 250 мм под основанием и использовании охлаждающей системы «мульти ГЕТ ТСГ Протвино» а) начало эксплуатации; б) на 1 октября после 1 года эксплуатации; в) на 1 октября после 2 года эксплуатации; г) на 1 октября после 5 года эксплуатации

Основными природными факторами, определяющими прочность, устойчивость грунтов и динамику криогенных процессов в криолитозоне являются температурные факторы, обусловленные нарушением природного теплового баланса на «дневной поверхности» и в грунтах оснований вследствие техногенной тепловой нагрузки со стороны инженерных сооружений;

Создание на этапе проектирования численной модели основного фактора-процесса (динамики температуры грунтов), приводящего к потере механической безопасности (деформациям) позволяет трактовать термин «мониторинг» уже не как «периодический контроль», а как «управление», т.е дополнить технологию инженерно-геологического мониторинга, регламентированную к выполнению СНиПом 2.02.04-88, «прогнозом» и «обоснованной численной проработкой управляющих воздействий».

Именно такую технологию авторы и предложили именовать геотехническим мониторингом (СТО «Газпром» 2-3.1-071-2006 «Регламент организации работ по геотехническому мониторингу объектов газового комплекса в криолитозоне», СТО «Газпром» 2-3.1-072-2006 «Регламент на проведение геотехнического мониторинга объектов газового комплекса в криолитозоне»).

Адаптация численной модели к результатам режимной эксплуатационной термометрии позволяет «учесть» все «не исследованные» и «не учтенные при проектировании» факторы температурного воздействия, выполнять достоверный прогноз развития негативных техногенных тепловых процессов, моделировать воздействие различных «управляющих» технических решений по реконструкции.

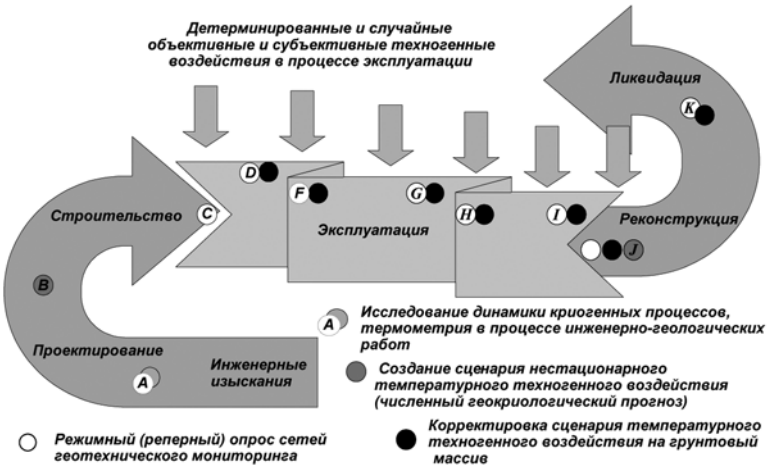


Рисунок 8 - Блок-схема организации работ по геотехническому мониторигу на этапах инженерные изыскания - проектирование - строительство – эксплуатация

Технология разработана в развитие НИР «Система обеспечения безопасности газопромысловых объектов, действующих в условиях криолитозоны, посредством проведения комплексного геотехнического мониторинга».

Научно-технический уровень подтвержден дипломом лауреата ежегодного конкурса ОАО «Газпром» за лучшую научно-техническую разработку № 91 от 9 августа 1999 г.

Заключение

В заключение автору представляется целесообразным отметить, что инновационные технологии были апробированы на X Международном салоне инноваций и инвестиций (7-10 сентября 2010 г., Москва, ВК Гостиный двор). Научно-техническая разработка «Инновационный метод обеспечения и целенаправленного управления механической безопасностью промышленных и гражданских объектов на территории реализации мегапроектов XXI века с использованием естественного криогенного ресурса», представленная совместно тремя компаниями ООО «Старый Дом», ООО «Ньюфрост» и ОАО «ВНИПИГаздобыча» была удостоена диплома победителя и отмечена серебряной медалью Салона.

Список литературы

1. Попов А.П. «Управление геотехническими системами газового комплекса в криолитозоне. Прогноз состояния и обеспечение надежности» журнал «Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.» №4, М.: 2005. с. 6 – 16.

2. Ремизов В.В., Дмитриевский А.Н., Тер-Саакян Ю.Г., Попов А.П., Харитонов А.Н. и др. «Совершенствование систем разработки, добычи и под-готовки газа на месторож-дениях Крайнего Севера» М.: «Наука», 1996 – 415 с.

3. Чугунов Л.С., Ермилов О.М., Попов А.П. и др. Моделирование теплового взаимодействия с многолетнемерзлыми породами геотехнической системы «Теплоизолированная добывающая скважина – сезоннодействующий парожидкостный термостабилизатор» вблизи поверхности земли. М.: ИРЦ Газпром, 1998 г.

4. Попов А.П., Милованов В.И., Жмулин В.В., Рябов В.А., Бережной М.А. «К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны», журнал «Инженерная геология» № 3, 2008г., с. 22-38.

5. Попов А.П., Милованов В.И., Жмулин В.В., Рябов В.А., Бережной М.А. и др., «Перспективы использования криогенного ресурса для строительства крупных центров добычи и систем транспорта газа в циркумполярных областях в случае подтверждения гипотезы о глобальном потеплении климата», журнал «Инженерные изыскания» № 10, 2009г., с. 18-37.

6. Хрусталев Л.Н. «Основы геотехники в криолитозоне», МГУ, 2005.

7. Постановление №87 Правительства РФ от 16 февраля 2008 г. «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию».

8. Федеральный закон № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», М. 2009 г.

9. СП 22.13330.2011 «Основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» М.: ОАО «ЦПП», 2011 г., 162 с.

10. ГОСТ Р 21.1101-2009 «Основные требования к проектной и рабочей документации», М.: Стандартинформ, 2009 г., 50 с.

11. РСН 67-87 Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами.

12. СНиП 22-02-2003 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения».

13. СНиП 2.02.04.-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».

14. СТО Газпром 2-3.1-071-2006 «Регламент организации работ по геотехническому мониторингу объектов газового комплекса в криолитозоне», М.: ИРЦ Газпром, 2006 г., 26с.

15. СТО Газпром 2-3.1-072-2006 «Регламент на проведение геотехнического мониторинга объектов газового комплекса в криолитозоне», М.: ИРЦ Газпром, 2006 г., 62с.

16. СТО Газпром 2-2.1-390-2009 «Руководство по проектированию и применению сезонно-охлаждающих устройств для термостабилизации грунтов оснований фундаментов», М.: ИРЦ Газпром, 2009 г., 62 с.

17. СТО Газпром 2-2.1-435-2010 «Проектирование оснований, фундаментов, инженерной защиты и мониторинга объектов ОАО Газпром в условиях Крайнего Севера»», М.: ИРЦ Газпром, 2010 г., 257 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ УЛАК – ЭЛЬГА НА УЧАСТКЕ 0 – 54 КМ

В.А. Исаков[1], М.С. Наумов[1], Ф.С. Телков[1]

[1]ОАО «Проекттрансстрой», г. Москва, e-mail: pts@ptst.ru

В 2010 г специалистами ОАО «Проекттрансстрой» были проведены работы по обследованию грунтов основания железной дороги Улак – Эльга на участке 0 – 54 км. Маршрутными обследованиями, проведёнными в 2005, 2006, 2008 и 2010 гг. были выявлены участки со значительными деформациями земляного полотна и рельсошпальной решетки. В связи с подготовкой данного участка к открытию рабочего движения было принято решение о проведении обследования грунтов с целью выявления причин деформаций и масштаба изменения геокриологических условий в основании железной дороги. В результате проведённых исследований были получены данные о геокриологической обстановке на 53 участках развития интенсивных деформаций («больных мест»). В 85% процентах случаев наблюдалось формирование различных по мощности, конфигурации и генезису таликовых зон. Исследования показали также, что температура грунтов в основании дороги изменяется преимущественно в пределах от -1 до +1оС, а мощность слоя сезонных колебаний температур составляет 4 – 8 м. Все эти факторы способствуют общей термо- и гидродинамической неустойчивости грунтовых массивов в основании сооружения. По результатам обследования был сделан вывод о недостаточной, на отдельных участках, несущей способности грунтов для обеспечения безаварийной эксплуатации железной дороги. Также был сделан вывод о необходимости расширения работ по наблюдению за состоянием грунтов в основании сооружения[1].

Участок железнодорожного пути, соединяющего разъезд Улак на БАМе и Эльгинское месторождение углей, на участке от 0 до 54 км был сооружен в 2001 г. В том же году дальнейшее строительство железной дороги было заморожено. В период с 2001 по 2008 гг. движение поездов по данному участку и его обслуживание не осуществлялось. После возобновления строительства в 2008 г появилась необходимость в оценке состояния земляного полотна на уже построенных участках железной дороги. Маршрутные наблюдения, проведённые в 2005 и 2006 гг. показали, что на значительном протяжении трассы наблюдаются значительные деформации земляного полотна. Общая протяженность деформированных участков по оценкам 2006 года составляла 17,5 км, или около трети от общей длины построенного отрезка дороги.

Основными видами деформаций земляного полотна на изучаемом участке железной дороги, выявленными в ходе маршрутных исследований, являются волнообразные деформации (рис 1), просадки основной площадки насыпи, а также отседание и эрозия откосов насыпи. Масштабы деформаций различны – на отдельных участках просадки основной площадки могут достигать величин 1 метра от проектного положения. В целом дальнейшая эксплуатация таких участков, без выправки положения железнодорожного полотна, возможна только в режиме существенного ограничения скорости и массы составов, а зачастую невозможна в принципе. В 2008 году была проведена выправка железнодорожного полотна и его подъем на балласт с доведением до проектного профиля. Тем не менее, уже в апреле-мае 2010 г. вновь были отмечены деформации земляного полотна и верхнего строения пути, в основном на участках где они были выявлены ранее. Повторяемость развития деформаций на одних и тех же участках показала необходимость более тщательного изучения инженерно-геокриологических условий в основании таких участков.



Рисунок 1 - Волнообразные деформации

Основной целью проводимых работ являлось получение информации, необходимой для оценки грунтовых условий в основании железной дороги с точки зрения дальнейшей безаварийной эксплуатации сооружения. Необходимо было определить обусловлены ли деформации железной дороги процессами стабилизации состояния грунтов земляного полотна и насколько высока вероятность достижения данной стабилизации в настоящий момент. Или же деформации вызваны развитием опасных экзогенных процессов и необходимы меры стабилизации состояния грунтов оснований и инженерной защиты сооружения. Важным вопросом являлось также, обладают ли грунтовые массивы в основании сооружения достаточной несущей способностью для обеспечения надёжного его функционирования в случае открытия рабочего движения по участку, что подразумевает резкий рост интенсивности перевозок и массы поездов? Корректный ответ на данные вопросы невозможен без подробного инженерно-геологического изучения грунтов и анализа

[1] Авторы выражают признательность Байковой Л.А. и Соколову А.А. за помощь в подготовке доклада

динамики изменения геокриологических условий в основании дороги.

Железнодорожный путь на участке км 0 – км 25 проходит по Верхнезейской равнине, расположенной в правобережье р. Зеи (Зейского водохранилища), затем, железнодорожный путь поднимается на Зейско-Удскую денудационную равнину с высотами водоразделов 400 – 650 м (км 25 – км 55). Крутизна склонов долин до 15о, ориентировка гидросети, преимущественно, субмеридиональная со стоком на юг. Трасса ж/д пути на рассматриваемом участке следует по плоским междуречьям и преимущественно пологим бортам речных долин. Климат района прохождения трассы железной дороги резко континентальный. Среднегодовая температура в районе минус 3°. Минимальные и максимальные температуры – январские до минус 50° июльские соответственно 27,7°. Среднегодовое количество осадков составляет 500-600 мм, при этом 70-80% осадков приходится на июль-сентябрь. Растительность представлена сообществами средней тайги – преимущественно лиственничными лесами с примесью берёзы и сосны. По долинам рек преобладают мелколиственные породы деревьев. Сравнительно широко распространены мари.

В геоструктурном отношении участок пересекает (с юга на север): Верхнезейскую мезокайнозойскую впадину (км 0 – км 25м) и южную часть Становой области протерозойской складчатости (км 25 – км 79 км).

Здесь развиты осадочные, метаморфические, магматические интрузивные (преимущественно гранитоидные) и вулканические породы мезозойского возраста.

Вся территория покрыта сплошным чехлом четвертичных отложений различных генетических типов и различной мощности. Это образования элювиально-делювиальные (преимущественно супесчано-суглинистого состава), пролювиальные (неоднородные по составу – от грубообломочных до тонкодисперсных грунтов), аллювиальные (песчано-галечные с прослоями супесей, илов и торфов), биогенные (торф).

По характеру распространения многолетнемерзлых пород (ММП) на рассматриваемом участке выделяются области преимущественно островного и прерывистого распространения. Первый тип распространения ММП характерен для отрезка трассы км 0 – км 25; второй – км 25 – км 54. В области островного распространения, отвечающей окраине Верхнезейской аккумулятивной равнины (км 0 – км 25), ММП приурочены в основном к днищам долин, замареным частям склонов и междуречий и занимают до 90% протяженности трассы подъ- ездного пути. Мощности ММП меняются в широких пределах – от нескольких до 90 и более метров. Температуры на подошве слоя годовых колебаний (to) изменяются от минус 0,2о до минус 1,1°С. Льдистость рыхлых ММП по трассе от 5 до 30%.

В области прерывистого распространения ММП непосредственно по трассе подъездного пути развиты почти повсеместно, кроме днищ крупных долин и зон крупных разломов, в том числе. Максимальная мощность ММП достигает 100 м в среднем составляет 10-100 м; to в пределах минус 1о – минус 2° на склонах и водоразделах; в днищах долин от минус 0,5 до минус 2,5°С.

Из неблагоприятных физико-геологических процессов в пределах участка распространены термокарст, полигонально-жильные образования, наледи, в т.ч. техногенные, курумы, болота и мари.

Программа обследования участков наиболее интенсивных деформаций («больных мест»), разработанная в ОАО «Проекттрансстрой», включала в себя бурение по поперечникам, лабораторные исследования грунтов, термометрические наблюдения в скважинах, а также изучение фондовых материалов ОАО «Мосгипротранс», проводившего изыскания для строительства железной дороги. Зимой – весной 2010 г был проведён основной объём полевых работ по изучению 53 «больных мест». Проведение работ в конце сезона охлаждения грунтов (основной объём бурения был проведён в марте – апреле) позволило максимально достоверно определить конфигурацию выявленных таликовых зон и провести термометрические наблюдения в конце периода охлаждения грунтов.

В результате проведённых работ было выявлено, что в большинстве случаев в основании «больных мест» произошло значительное понижение кровли многолетнемёрзлых пород. Примерно в 20% случаев кровля вечной мерзлоты понизилась настолько, что не была вскрыта скважинами глубиной 10 м. При этом средние зафиксированные мощности сезонно-мёрзлого слоя (СМС) не превышают 2,0 – 2,5 м. Практически на всех участках, где фиксировалось положение верхней границы мёрзлых грунтов, глубина её залегания была крайне невыдержанной. В большинстве случаев максимальной мощности таликовая зона достигает под насыпью или с нагорной стороны насыпи.

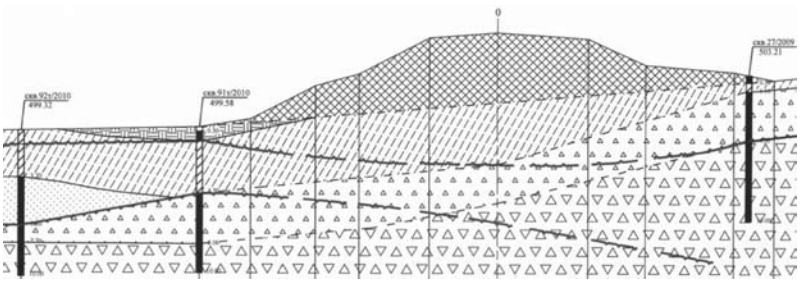


Рисунок 2 - Положение кровли ММП и подошвы СМС (март 2010 г.) на ПК 263+50

Неравномерности в положении кровли мёрзлых пород могут достигать нескольких метров (до 3-4) на сравнительно небольших (первые десятки метров) расстояниях (рис 2). Столь резкие колебания кровли мёрзлых пород, вызванные техногенным воздействием, несомненно, вносят свой вклад в развитие неравномерных де-

формаций сооружения. Только в 10% от обследованных «больных мест» зоны развития таликов сложены исключительно непросадочными или малопросадочными грунтами. В остальных же случаях имеет место оттаивание супесчаных и суглинистых грунтов, порой имевших значительную льдистость.

Исследования участков деформаций в выемках показали, что положение кровли многолетнемёрзлых пород в них зависит от экспозиции откосов. Так во всех изученных выемках наблюдается существенно большая глубина залегания кровли мерзлоты в откосах южной экспозиции. В отдельных случаях талики формируются только на склонах южной экспозиции. Непосредственно вблизи основной площадки выемки ни в одном из случаев кровля мёрзлых пород не была вскрыта (скважины глубиной 6 м), что может быть объяснено накоплением большого количества снега в выемке.

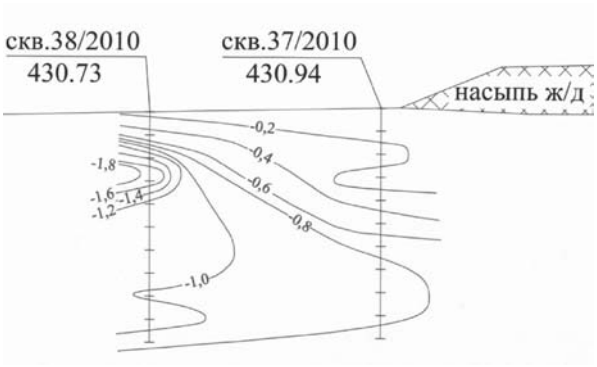


Рисунок 3 - Характер распределения температуры мёрзлых грунтов на ПК 145+00, апрель 2010 г.

Температура грунтов в основании «больных мест», по данным термометрических наблюдений не опускается ниже -1,5оС. Наиболее характерными значениями температуры мёрзлых грунтов являются -0,3 - -0,5оС. Здесь необходимо отметить, что для мёрзлых грунтов именно в диапазоне температур от 0 до -1оС характерна наибольшая интенсивность снижения несущей способности грунтов при повышении их температуры. Даже незначительные колебания температуры в десятые доли градусов могут вызвать существенное (до нескольких раз) изменение несущей способности мёрзлых грунтов [4]. Неравномерность изменения температуры в грунтовом массиве при равномерном распределении нагрузки также может вызвать деформации сооружения.

Температура талых грунтов даже в период максимального охлаждения может иметь значения до +3оС, но в среднем они находятся в диапазоне от 0 до +1оС. Это делает талые грунты в основании железной дороги неустойчивыми при сколько-нибудь значительных изменениях условий теплообмена на поверхности грунтов и создает возможность для частичного и даже полного промерзания талика, например при условии восстановления древесной растительности в полосе отвода и сокращении вследствие этого прихода прямой солнечной радиации на поверхность грунтов.

Замеры температур грунтов, проведённые в разных скважинах одного поперечника, выявили следующую закономерность: как правило, температуры грунтов тем выше, чем ближе к насыпи производится замер (рис 3). Это свидетельствует об отепляющем влиянии насыпи на подстилающие грунты. Такой характер температурного поля свойственен и мёрзлым и талым грунтам.

Природу отепляющего влияния насыпи на подстилающие грунты можно объяснить с нескольких позиций. Во-первых, в результате создания искусственных откосов большей крутизны, чем естественные поверхности, произошло увеличение прихода солнечной радиации на поверхность откосов. Увеличение суммы радиационного баланса на искусственно созданных откосах южной экспозиции может достигать в зависимости от месяца от 10 до 40% для крутизны откоса 20о [1]. Во-вторых, увеличению температуры грунтов вблизи насыпи способствует её подтопление непосредственно у подошвы откосов. И, в-третьих, накопление снега у линейно-вытянутого препятствия (насыпи) или в понижении рельефа (выемка) способствует теплоизоляции грунтов в зимний период охлаждения. Суммарный отепляющий эффект от насыпи в различных случаях может составлять от 0,1 и менее до 1,0оС (на глубине 5-8 м). Эффект же охлаждающего влияния насыпи на подстилающие грунты, обычно связываемого с конвекцией холодного воздуха в грубообломочных отсыпках, в большинстве исследованных случаях существенно снижен за счёт наличия в грунтах насыпей заполнителей, препятствующих свободной конвекции холодного воздуха в зимний период. Охлаждающее влияние насыпи на подстилающие грунты было отмечено только в 15% обследованных «больных мест» - на тех участках, где насыпь сложена грубообломочными грунтами без заполнителя. Принимая во внимание тот факт, что с течением времени грунты насыпей будут всё в большей степени засоряться мелкозёмом (в результате процессов криогенного выветривания, механического истирания), то можно сказать, что в дальнейшем охлаждающее влияние насыпей на подстилающие грунты основания будет снижаться. Согласно исследованиям [2], для формирования полноценной чаши оттаивания в основании насыпи требуется от 30 до 50 лет, поэтому в случае исследуемого участка железной дороги «Улак – Эльга» говорить о стабилизации температурного режима преждевременно.

Повторные измерения температуры грунтов, проведённые в конце весны – начале лета, а также анализ графиков распределения температуры по глубине позволили выявить примерную глубину нулевых годовых колебаний температур – в среднем она составляет 4-8 м, редко больше. Учитывая высокую температуру мёрзлых и сравнительно низкую температуру талых пород можно сказать, что верхние горизонты грунтовой толщи, служащие основанием для железной дороги, являются термодинамически неустойчивыми. Резкие изменения условий теплообмена через поверх-

ность, вызванные природными (экстремальные погодные условия, потепление климата, сукцессия растительности в полосе отвода) или техногенными факторами могут привести к значительному изменению физико-механических свойств грунтов, связанному с процессами промерзания/оттаивания в основании железной дороги.

Изучение всего массива информации по таликовым зонам в основании исследованных участков железной дороги не позволяют сделать вывода об их едином генезисе. Так, на участках подтопления насыпи, учитывая крайне незначительную для данного региона критическую глубину водоёмов (0,6 – 1 м) [3], можно с уверенностью говорить о формировании гидрогенных таликов (рис 4). Столь же незначительные критические величины толщины снежного покрова (0,6 – 1 м) [3], позволяют предполагать наличие тепловых таликов на основных площадках выемок, а также на участках насыпей высотой свыше 2 м, которые служат препятствием свободному перевеванию снега и, соответственно местами его избыточного накопления. Сравнительно южное широтное положение региона, вкупе с прохождением железной дороги преимущественно по склонам различной крутизны и экспозиции, а также ассиметричное протаивание мёрзлых грунтов в бортах выемок, имеющих экспозиции северных и южных румбов подтверждает наличие радиационной составляющей в генезисе таликов. Наиболее вероятным кажется предположение о том, что талики в основании железной дороги являются полигенетическими. Строительство железной дороги привело к тому, что на отдельных участках различные факторы отепления мёрзлых пород дали совокупный эффект в виде формирования мощных таликов в основании сооружения (рис 5). Выделение в обследованных таликовых зонах преобладающих генетических типов может помочь при выработке мер инженерной защиты и стабилизации основания железной дороги на участках «больных мест».

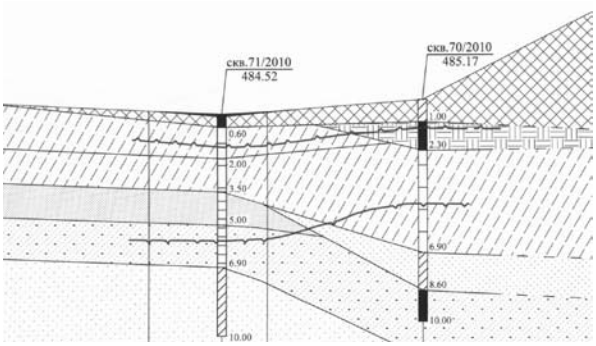


Рисунок 4 - Гидрогенный талик с нагорной стороны насыпи на ПК 225+00. Водоём в летний период формируется у оголовка скважины 71, во время её проходки (апрель 2010 г) с поверхности вскрывается лёд.

В то же время на отдельных участках (около 15% исследованных «больных мест»), где наблюдаются интенсивные деформации, в результате бурения не было вскрыто сколько-нибудь значимых таликовых зон. В таких случаях деформации вызваны, вероятнее всего, неравномерной стабилизацией и уплотнением грунтов насыпи, а также грунтов сезонно-талого слоя (СТС). Процессы стабилизации и уплотнения грунтов насыпи интенсивно протекают в первые годы эксплуатации железной дороги. Увеличение нагрузок на земляное полотно, которое произойдёт при открытии рабочего движения, ускорит процессы стабилизации состояния грунтов в насыпи и, при надлежащем обслуживании пути интенсивные деформации на таких участках могут прекратиться через несколько лет. Деформации, вызванные неравномерным уплотнением грунтов СТС под весом земляного полотна, также носят затухающий характер и могут быть ликвидированы после окончательной стабилизации их состояния.

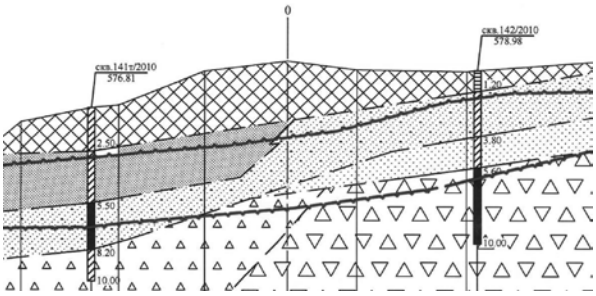


Рисунок 5 - Талик зафиксированный на ПК 413+00 (февраль 2010 г.)

Неравномерность изменения объёма грунтов СТС при промерзании/протаивании в основании железной дороги также могут служить причиной развития деформаций на участках слитного залегания мёрзлых пород. Фрагментация условий теплообмена через поверхность, а также изменение гидрологического режима окружающей территории в результате строительства земляного полотна может приводить к развитию сезонного криогенного пучения (рис 6) и последующей неравномерной осадке сезонно-мёрзлых грунтов при оттаивании.

Выводы:

В результате обследования состояния грунтов оснований железной дороги «Улак – Эльга» на участке 0 – 54 км было выявлено, что значительная часть грунтовой толщи в основании сооружения перешла из мёрзлого в талое состояние. Оттаиванию подверглись верхние горизонты мёрзлой толщи, которые должны были служить основанием для земляного полотна железной дороги. На отдельных участках дороги произошло интенсивное развитие деформаций земляного полотна и рельсошпальной решётки, что существенно затруднило эксплуатацию сооружения. Причинами этих деформаций являлось:

- снижение несущей способности мёрзлых грунтов в результате повышения температур в пределах отрицательных значений

- снижение несущей способности грунтов в результате оттаивания мёрзлой толщи и измене-



Рисунок 6 - Пучение грунтов у основания насыпи ж/д «Улак – Эльга»

ния состояния и консистенции грунтов (особенно супесчаных и суглинистых)

- объёмные изменения мёрзлой толщи при оттаивании

- неравномерная стабилизация и уплотнение грунтов насыпи и естественного основания дороги

- развитие неблагоприятных экзогенных, в том числе криогенных процессов – термокарста, пучения, эрозии, подтопления и др.

Ввиду планируемого увеличения нагрузки на грунты основания, в связи с открытием рабочего движения по железной дороге, следует признать, что состояние грунтов в основании сооружения не на всех обследованных участках удовлетворяет требованиям безаварийной эксплуатации. Установленные закономерности термо- и гидродинамической нестабильности в таликовых зонах, а также опыт эксплуатации железных дорог в криолитозоне позволяют сделать предположение о том, что стабилизация состояния грунтов в основании «больных мест» произошла ещё не в полной мере.

Сложность геокриологических условий региона прохождения трассы, термодинамическая нестабильность мёрзлых и талых грунтов, активность протекания природных процессов диктуют необходимость постоянного наблюдения за состоянием грунтов основания железной дороги для сохранения необходимой устойчивости сооружения.

Анализ материалов обследования грунтов оснований железной дороги «Улак – Эльга» на участке 0 – 54 км показал, что для составления целостной картины причин, масштабов и характера развития деформаций недостаточно проведённых работ. Бурение по поперечным профилям «больных мест» не дает необходимой информации в первую очередь по состоянию грунтов непосредственно в основании сооружения. Бурение скважин на откосах насыпей может дать информацию лишь об общем характере процессов, проходящих в грунтах. Бурение с насыпи зачастую невозможно по объективным причинам, поэтому наиболее рациональным шагом видится проведение геофизических изысканий с опорой на пробуренные скважины.

В результате проделанной работы были получены дополнительные знания о закономерностях изменения мёрзлых пород в основании линейных сооружений, которые могут быть применены для других объектов подобного рода на территории криолитозоны.

Список литературы

1. Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Романовский Н.Н., Максимова Л.Н., Чижов А.Б. Методика мерзлотной съёмки. М.: Изд-во Московского университета, 1979. 358 с

2. Лисицына О.М., Минайлов Г.П., Романовский Н.Н., Пармузин С.Ю. Линейное строительство. // В книге: Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. - М. «Недра» 1989. - С. 452-457

3. Пармузин С.Ю., Данько В.К., Шаталова Т.Ю. Изменение геокриологических условий при техногенных нарушениях. // В книге: Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. - М. «Недра» 1989. - С. 433-441

4. Строительные нормы и правила. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. М.: ЦИПТ Госстроя СССР, 1990. 56 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕМБРАННЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ОСНОВАНИЯХ, ПРОЕКТИРУЕМЫХ ПО II ПРИНЦИПУ

Я.А. Пронозин[1], Л.Р. Епифанцева[1], О.С. Порошин[1]., Ю.В Наумкина[1]

[1]Тюменский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Тюмень, e-mail: epifanceva@tgasu.ru

Рассмотрены рациональные типы фундаментов под 5-этажный жилой дом в Н.Уренгое. Приведены достоинства и недостатки традиционных видов фундаментов. Предложен новый эффективный вид фундаментов – мембранный.

Выбор типа фундамента в зависимости от состава грунтов на строительной площадке и конструктивной схемы здания - сложная задача, особенно при проектировании и строительстве зданий и сооружений в северных регионах страны, где необходимо учитывать динамику мерзлотно-грунтовых условий в течение всего расчетного срока их эксплуатации [1].

При проектировании оснований и фундаментов под малоэтажное жилое строительство с использованием многолетнемерзлых грунтов по первому принципу материальные затраты на сохранение мерзлого состояния слишком велики.

Второй принцип применяется при наличии малосжимаемых при и после оттаивания грунтов. При использовании этого принципа должны предусматриваться конструктивные мероприятия по уменьшению чувствительности зданий к неравномерным осадкам, увеличению жесткости и монолитности фундаментов, что требует выполнения дополнительных мероприятий по уменьшению деформаций основания или приспособления конструкций зданий к восприятию дополнительных осадок [2]. Рациональными видами фундаментов в этом случае являются ленточные и плитные фундаменты. Плитные фундаменты значительно снижают удельное давление на основание, хорошо воспринимают и перераспределяют усилия, вызванные неравномерной осадкой оттаивающего основания. Однако материальные и трудовые затраты на изготовление монолитной фундаментной плиты значительно превышают затраты на устройство ленточного фундамента, а их значения осадок зачастую превышают предельные значения.

В качестве альтернативы использования сплошных плитных фундаментов, а также в целях снижения затрат на их устройство и уменьшения неравномерности осадок ленточных фундаментов, повышения приспосабливаемости конструкции фундаментов к возможным неравномерным деформациям основания, подстилаемого слоем многолетнемерзлых грунтов предлагается использовать мембранный элемент в составе ленточных фундаментов (рис. 1). Мембранный фундамент состоит из ленточного опорного контура, спланированного по заданной кривой естественного основания под мембрану и силовой мембраны в виде двух слоев геосетки ГСК-120.

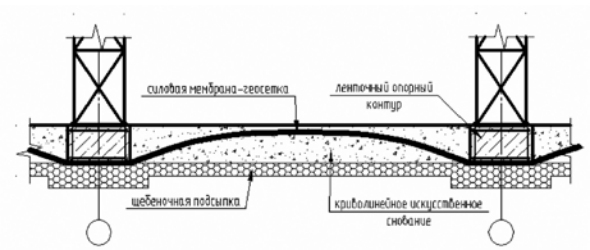


Рисунок 1 - Схема мембранного фундамента

Эффективность использования мембранного фундамента заключается в том, что силовая мембрана, заключенная внутри опорного контура, вовлекает в работу объем грунтового массива под мембраной, снижает осадки ленточного опорного контура, сглаживает неравномерные осадки оттаивающего основания, характерные при проектировании фундаментов оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых с использованием многолетнемерзлых грунтов по принципу II. Степень вовлечения мембраны в работу зависит от величины осадки ленточного фундамента, т.е. мембрана включается больше в работу на тех участках, где происходят неравномерные деформации основания, и тем самым снижает как абсолютные значения осадок ленточных фундаментов, так и их неравномерность [3].

При выборе типа фундамента под 3-этажный жилой дом в Н. Уренгое (рис. 2) был проведен анализ осадок ленточного и мембранного фундамента. Геолого-литологическое строение площадки представлено в виде:

ИГЭ-2 Песок мелкий, 0,0 - 3,50м. Суммарная влажность грунта w_{tot} = 0,17 д.е.; плотность сухого грунта ρ_d =1560кг/м^3.

ИГЭ-22 Песок средний, 3,5 - 4,5м. Суммарная влажность грунта w_{tot}=0,21 д.е.; влажность за счет незамерзшей воды w_w=0,00 д.е., плотность сухого грунта ρ_d=1610 кг/м^3. Коэффициент теплопроводности талого и мерзлого грунта равны λ_{th}=1,85 Вт /(м·ºС), λ_f =2,05 Вт /(м·ºС); соответственно объемная теплоемкость C_{th}=670 Вт·ч/(м^{3}ºС), C_f=510 Вт·ч/(м^3 ºС).

ИГЭ-6 Песок мелкий, 4,5-8,2м. Суммарная влажность грунта w_{tot}=0,22 д.е.; влажность за счет незамерзшей воды w_w=0,00 д.е., плотность сухого грунта ρ_d=1560кг/м^3. Коэффициент теплопроводности талого и мерзлого грунта равны λ_{th} =2,0 Вт /(м·ºС), λ_f =2,2 Вт /(м·ºС); соответственно объемная

теплоемкость C_{th}=710 Вт·ч/(м^{3}ºС), C_f=535 Вт·ч/(м3 ºС).

ИГЭ-22 Песок средний, 8,2 - 10,0м. Суммарная влажность грунта wtot=0,21 д.е.; влажность за счет незамерзшей воды w_w=0,00 д.е., плотность сухого грунта ρ_d=1610 кг/м^3. Коэффициент теплопроводности талого и мерзлого грунта равны λ_{th} =1,85 Вт /(м·ºС), λ_f =2,05 Вт /(м·ºС); соответственно объемная теплоемкость C_{th}=670 Вт·ч/(м^{3}ºС), C_f=510 Вт·ч/(м^3 ºС).

Среднегодовая температура грунта на глубине нулевых годовых амплитуд Т0= –0,3ºС, температура начала замерзания T_{bf}= –0,0ºС

В геокриологическом отношении площадка характеризуется наличием талых и многолетнемерзлых грунтов несливающегося типа. Кровля многолетнемерзлых грунтов находится на глубине 3,5 м.

Конструктивная схема здания бескаркасная с поперечными несущими стенами. Размеры здания в плане 67,66х12,9 м (рис.2). Проектом предусмотрены наружные и внутренние стены из легких стальных конструкций. Глубина заложения подошвы фундамента с учетом утепления – 1,75 м. Полы устраиваются по грунту, их термическое сопротивление 2,86 м2·0С /Вт, расчетная температура воздуха в подвале tзд=100С. Температура грунта вне контура здания Т0= 0,3ºС. Теплота таяния грунта Lv=31443 Вт·ч/м3.

Расчетная погонная нагрузка на ленточные фундаменты под несущие стены – 5,81 т/м. Требуемая ширина ленточного фундамента составляет 500 мм Среднее давление под подошвой фундамента р = 116 кПа.

Глубина оттаивания грунтов под серединой и под краями здания (рис.3) за время его эксплуатации 25 лет определяются в соответствии со СНиП [2], по формулам:

$$H_c = k_n(\xi_c - k_c)B = 6{,}9\text{м}.$$

$$H_e = k_n(\xi_e - k_e - 0{,}1\beta\sqrt{\psi}\,)B = 2{,}6\text{ м}$$

Расчет оснований по деформациям без учета совместной работы оттаивающего основания и фундаментов производится в соответствии со СНиП [2].

$s = s_p + s_{th} < s_u$

где s_p - составляющая осадки основания для ленточного фундамента, обусловленная дополнительным давлением на грунт от действия веса сооружения, определяемая методом послойного суммирования согласно СНиП [4].

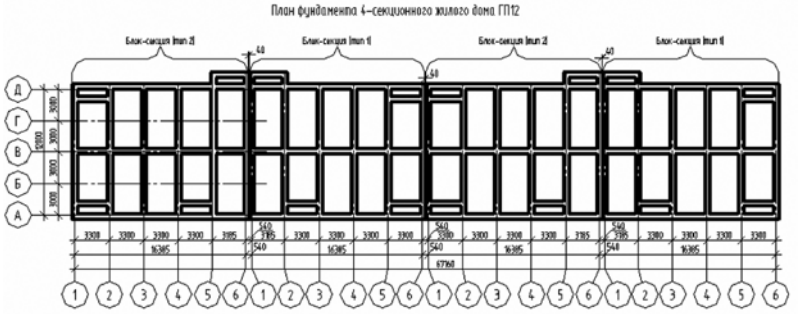


Рисунок 2 - Схема фундаментов жилого дома в Н.Уренгое

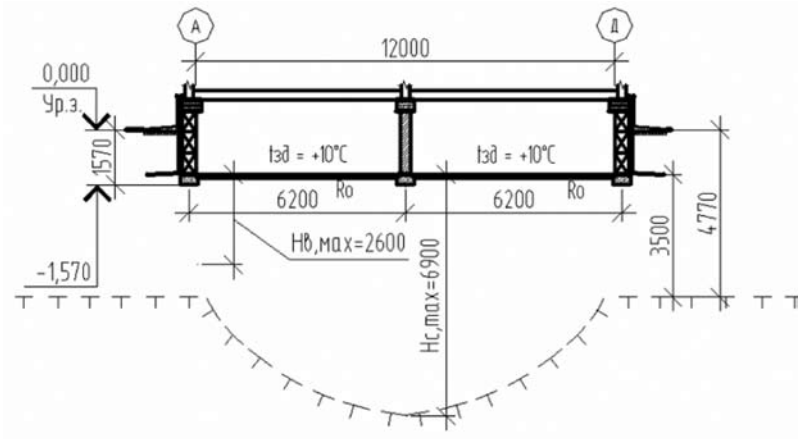


Рисунок 3 - Расчетная схема ленточного фундамента, возводимого на оттаивающем основании

Таблица 1- Результаты расчетов оснований ленточного и мембранного фундамента

Тип фундамента		s_p, см	s_{th}, см	s, см	[s], см
Ленточный фундамент b=500мм	без мембраны	3,6	6,8	10,4	10
	с мембраной	1,1	6,8	7,9	

Составляющая осадки основания для мембранного фундамента определена с помощью оригинального программного продукта SF_membrana;

s_{th} – составляющая осадки основания, обусловленная действием собственного веса оттаивающего грунта;

s_u - предельно допустимое значение совместной деформации основания и сооружения, устанавливаемое согласно СНиП [4], =10см.

Результаты расчетов оснований ленточного и мембранного фундамента приведены в таблице 1.

Согласно данным таблицы 1 осадка мембранного фундамента шириной опорного контура 500мм не превышает предельно допустимой величины, в то время как ширины ленточного фундамента недостаточно для соблюдения требований [4]. Уменьшение величины осадки ленточного фундамента можно добиться лишь увеличением его ширины и соответственно увеличения материалоемкости.

Таким образом, мембранный фундамент обладает су-

щественно меньшей осадкой и большей эксплуатационной надежностью по отношению к ленточному фундаменту и значительно дешевле сплошного плитного фундамента. При этом уровень значений расчетных осадок таких фундаментов будет находиться между величинами осадок для ленточных и плитных фундаментов.

Выводы

1. Мембранные фундаменты являются эффективными видами фундаментов, позволяющие вовлечь в работу весь объем грунтового основания под застраиваемой площадью [3].

2. При строительстве на вечномерзлых грунтах по II принципу мембранные фундаменты являются эффективной альтернативой традиционным видам фундаментов позволяющим снизить абсолютные и относительные осадки.

3. Стоимость мембранных фундаментов не превышает стоимость ленточных фундаментов, при существенно большей эксплуатационной надежности.

4. На площадках с неравномерным распределением ИГЭ в плане и разнонагруженностью несущих стен, мембранные фундаменты значительно уменьшают неравномерность осадок отдельных ленточных фундаментов за счет перераспределения нагрузок на основание.

Список литературы

1. Гончаров Ю. М. Эффективные конструкции фундаментов на вечномерзлых грунтах. - Новосибирск: Наука, 1988.- 190 с.;

2. СНиП 2.02.04-88. Основания зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах. – М.: АПП ЦИТП, 1990;

3. Пронозин Я.А., Епифанцева Л.Р. Экспериментальные исследования взаимодействия мембранного фундамента с грунтовым основанием. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос», «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера». Тюмень: Фундаментстройаркос, 2011, стр.131-135;

4. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. – М.: ГП ЦПП, 1995.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА РЕЗЕРВУАРА ТИПА РВС В ЗИМНЕЕ ВРЕМЯ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Г.В. Бахмат, А. А. Кислицын, У.Ю. Шастунова

ФГБОУ ВПО "Тюменский государственный университет", e-mail: kaf_mms@utmn.ru

В статье представлена методика расчета теплового режима резервуара во время закачке и хранения нефтепродукта в резервуаре. Выведено уравнение изменения температуры среды при закачке в резервуар.

Введение

Основными особенностями проектирования, строительства и эксплуатации на мерзлых грунтах являются необходимость учета и регулирования теплообмена с сооружениями и с окружающей внешней средой. Тепловое состояние нефтепродукта, определяется процессами тепломассопереноса в самом нефтепродукте, газовоздушном пространстве резервуара и окружающей среде [1].

Решение нестационарной задачи по определению теплового режима резервуара, зависящего от параметров окружающей среды и грунта, позволит решить большое количество прикладных задач, а именно:

определение режимов производительности насоса при гидравлических испытаниях в зимнее время, позволяющие исключить кристаллизацию воды на поверхностях, граничащих с окружающей средой;

определение температуры кристаллизации парафинов в нефти во время эксплуатационного периода резервуара, а также определение массы выпадающего парафина на стенки и днище сооружения и борьба с ними;

определение температуры фундамента и основания под резервуаром от нефти и нефтепродукта и влияние оттаявшего грунта на напряженно- деформированное состояние всего резервуара с целью диагностики мест аварий сооружения;

определение состояния воды, растворенной в бензине, при эксплуатации резервуара в зимнее время и многие другие вопросы, связанные с тепловым режимом сооружения.

Уравнение теплового баланса эксплуатируемого резервуара

Нефтяные резервуары представляют собой емкости различных размеров, предназначенные для накопления, кратковременного хранения и учета нефтепродукта. Резервуары эксплуатируются в широком диапазоне температур без теплоизоляции и подвергаются переменным температурным воздействиям под влиянием колебаний температуры окружающей среды и солнечной радиации [2]. Для тепловых расчетов при хранении и отпуске нефтепродуктов необходимо знать начальную температуру продукта, которая зависит от времени хранения, от температуры окружающей среды и т.д. Так как учесть все факторы, от которых зависит температура нефтепродукта в резервуаре, трудно, то ее определяют с некоторой степени вероятности для этого при любом тепловом расчете основополагающим уравнением является уравнение теплового баланса. Запишем данное уравнение для нашего случая

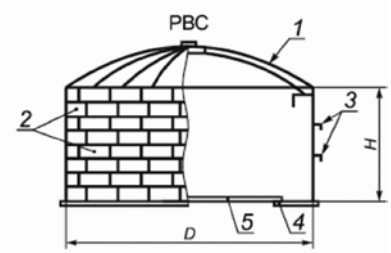


Рисунок 1 - Резервуар вертикальный стальной: 1 - каркас крыши; 2 - пояса стенки; 3 - промежуточные кольца жесткости; 4 - кольцо окраек; 5 - центральная часть днища.

$$G \cdot \rho \cdot c \cdot \left(T_{cp} - T\right) dt - k_t \cdot S \cdot \left(T - T_0\right) \cdot dt = \left(V_0 \cdot \rho \cdot c + G \cdot t \cdot \rho \cdot c + m_0 c_0\right) dT \quad (1)$$

где G- скорость закачки (производительность подачи теплоносителя), G·t·p - масса закачиваемой воды, кг; V_0 - объем теплоносителя в резервуаре, находящийся в момент начала данного этапа закачки, ; m_0 - масса пустого резервуара, кг; c, c_0 - теплоемкость теплоносителя и материала резервуара (стали), ; t - текущее время, с; $S = S_{дна} + S_{кровли} + S_{бок.стены}$ - полная поверхность охлаждения емкости (сумма площадей кровли, днища и стенки), ; k - коэффициент теплопередачи от резервуара в окружающую среду через стенки, днище и кровлю резервуара, Вт/м^2 ; $T_{ср}$ - начальная температура подаваемой среды (далее- теплоносителя) при закачке, °С ; T - текущее значение температуры теплоносителя в резервуаре в данный момент времени, °С ; T_0 - температура окружающей среды, °С.

Если необходимо учитывать фазовые переходы, происходящие внутри резервуара во время испытаний или эксплуатации резервуара в зимнее время, то в уравнении теплового баланса (1) необходимо дописать дополнительный член, учитывающий данный процесс. Так, например, при гидравлических испытаниях в зимнее время вода может замерзать, следовательно, в уравнении (1) появится член, учитывающий фазовые превращение 1 рода: замерзание воды и оттаивание при последующем заливе более теплой воды, чем находящейся в резервуаре.

При образовании льда в переохлажденной воде выделяется теплота плавления в количестве на каждую единицу массы образовавшегося льда. Это тепло идет на нагревание льда и воды. Про-

цесс прекратится, когда выделится количество тепла, достаточное для нагревания системы до температуры плавления. В силу закона сохранения энергии, так как все тепло в конечном счете идет только на нагревание, при расчете можно считать, что сначала вся вода нагревалась до температуры плавления , а потом образовалось необходимое количество льда при температуре . На основании уравнения теплового баланса можно написать:

.

Преобразуем уравнение (1) к удобному для интегрирования виду. Для этого произведем замену: t_0- характерное время; t_1 - время, в течение которого будет производиться заполнение; k - безразмерный коэффициент теплообмена (параметр Шухова); t - текущее безразмерное время; - t_1/t_0безразмерное время, необходимое для заполнения резервуара на очередной уровень.

В результате замены уравнение (1) принимает вид:

$$(T_{cp}-T)d\tau - k(T-T_0)d\tau = (\tau+\tau'+1)dT \qquad (2)$$

Разделяя переменные в уравнении (2), получаем

$$\frac{dT}{(T_{cp}-T)-k(T-T_0)} = \frac{d\tau}{\tau+\tau'+1} \qquad (3)$$

Для удобства интегрирования введем переменные: x, dx , dT, y, dy

Уравнение (3) принимает вид:

$$-\frac{dx}{(k+1)\cdot x} = \frac{dy}{y} \qquad (4)$$

Интегрируя, получаем общее решение уравнения (3):

$$\frac{1}{x} = C_1 \cdot y^{k+1} \qquad (5)$$

где C_1 - константа интегрирования, которая должна быть определена из граничных условий.

Известно, что в начальный момент времени при закачке температура теплоносителя конечная равна температуре теплоносителя, находящегося в резервуаре . В начальный момент заполнения, когда резервуар пуст, температура в начальный момент будет равна температуре окружающей среды . Исходя из этого, переменные интегрирования будут равны:

$$y = \tau' + 1 \quad x = T_{\text{ср}} + k\cdot T_0 - T_k\cdot(1+k) \qquad (6)$$

Подставляя (6) в (5), определяем константу :

$$C_1 = \frac{(\tau'+1)^{-(k+1)}}{T_{\text{ср}} + k\cdot T_0 - T_k\cdot(1+k)}$$

Закон изменения температуры во время заполнения резервуара в зависимости от производительности насоса и времени заполнения выглядит следующим образом:

$$T = \frac{T_{cp}+k\cdot T_0}{k+1} - \frac{(\tau'+1)^{k+1}\cdot(T_{cp}+k\cdot T_0 - T_k\cdot(k+1))}{(k+1)\cdot(1+\tau+\tau')^{k+1}} \qquad (7)$$

Уравнение (7) позволяет определить температуру теплоносителя в любой момент времени в процессе закачки при проведении гидравлических испытаний или эксплуатации любого резервуара. Пользуясь этим уравнением можно при заданной температуре определить время, в течение которого температура изменится от начальной до допустимой при различных скоростях закачки и объема резервуара.

Рассмотрим случай, когда происходит наполнение пустого резервуара. Это значит, что в уравнении (1) , при разделении переменных уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{dT}{(T_{cp}-T)-k(T-T_0)} = \frac{d\tau}{\tau+1} \qquad (8)$$

Вводя переменные интегрирования y, x и граничные условия $T=T_0$, получим константу интегрирования равной . Закон изменения температуры теплоносителя при заполнении пустого резервуара имеет вид:

$$\frac{dT}{(T_{cp}-T)-k(T-T_0)} = \frac{d\tau}{\tau+1} \qquad (9)$$

Проведем проверку выведенной формулы (8). При конечная температура теплоносителя должна быть равна температуре окружающей среды

$$T = \frac{T_{cp}+k\cdot T_0}{k+1} - \frac{T_{\text{ср}}-T_0}{k+1} = \frac{T_{cp}+k\cdot T_0 - T_{\text{ср}} - T_0}{k+1} = \frac{T_0\cdot(k+1)}{k+1} = T_0$$

Если текущее безразмерное время очень большое , тогда формула (9) будет иметь вид .

Если k=1, тогда конечная температура закачиваемого теплоносителя равна средней температуре окружающей среды и начальной температуры теплоносителя . Если , тогда , , .

Изменение конечной температуры теплоносителя при закачке в резервуар во время эксплуатации в зависимости от безразмерного коэффициента теплообмена будет иметь вид:

$$\frac{dT}{dk} = \frac{T_0\cdot(k+1) - (T_{\text{ср}}+k\cdot T_0)}{(k+1)^2} = \frac{T_0\cdot k + T_0 - T_{\text{ср}} - k\cdot T_0}{(k+1)^2} = -\frac{T_{\text{ср}}-T_0}{(k+1)^2}$$

Процесс охлаждения теплоносителя при этапе гидравлических испытаний и эксплуатации резервуара (выстаивание) может быть описан, исходя из уравнения теплового баланса (1), составленного для заполненного резервуара:

$$-k_t \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot dt = (V_0 \cdot \rho \cdot c + m_0 \cdot c_0) \cdot dT \quad (10)$$

В уравнении вместо времени заполнения резервуара появляется время выстаивания . Кроме того, объем теплоносителя и площадь теплопередачи не изменяется. Закон изменения температуры в этом случае может быть записан в виде

$$T = T_0 + (T_н - T_0) \cdot e^{\frac{-t}{k}} \quad (11)$$

где - температура теплоносителя после заполнения резервуара, ; .

Уравнение (11) представляют собой выражения, аналогичные известной формуле В.Г. Шухова для охлаждения резервуара. Однако в этой формуле имеются зависимые переменные производительность насоса, высота налива, время закачки. Кроме того, в формуле В.Г. Шухова коэффициент теплопередачи определяется по достаточно сложным уравнениям, учитывающим теплообмен между отдельными частями резервуара (днищем, крышей, стенками) и жидкостью в резервуаре. В производственных условиях желательно иметь более простые уравнения или же номограммы, по которым можно быстро рассчитать или определять вероятное падение температуры при переменном расходе теплоносителя (закачка) и последующем охлаждении резервуара.

Методика расчета коэффициента теплопередачи

Температуру теплоносителя при закачке в резервуар и выстаивании можно определить по уравнениям (7), (9), (11). В данных уравнениях наибольшую сложность представляет собой нахождение безразмерного коэффициента теплообмена, в связи с тем, что в его формуле присутствует коэффициент теплопередачи . Рассмотрим подробное описание как необходимо рассчитать данный коэффициент.

В уравнениях (7), (9), (11) - температура окружающей среды для наземных резервуаров определяется по формуле

$$T_0 = \frac{S_г \cdot T_г + S_в \cdot T_в}{S} \quad (13)$$

где $S_г$ и $S_в$ - поверхность резервуара, соприкасающаяся с грунтом (площадь днища) и воздухом (суммарная площадь стенок и кровли резервуара), $м_2$; $T_г$ $T_в$ и - температура грунта и окружающего воздуха, находящегося в контакте с резервуаром, °С

Площади поверхностей ограждающей конструкции резервуара находятся по следующим формулам:

площадь днища ;

площадь стенки , где для определения площади резервуара, граничащей с продуктом, является высотой налива, а для определения площади, граничащей с газовым пространством - высота газового пространства;

площадь кровли , где - высота сферического купола, м.

Для резервуаров значение должно быть вычислено с учетом характера теплопередачи через ограждающую конструкцию резервуара [4]:

$$T_0 = \frac{S_г \cdot T_г + S_в \cdot T_в}{S} \quad (14)$$

где $k_{дн}$, $k_{ст.г}$, $k_{ст.ж}$, $k_{кр}$ - коэффициенты теплопередачи через днище, стенку в области газового и жидкого пространства, кровли резервуара, ;

Рассмотрим нахождения коэффициентов теплопередачи через днище, стенку и кровлю подробно. Для расчета вышеуказанных коэффициентов необходимо задаться средним значением температуры внутренней стенки резервуара, затем данное значение уточняется методом последовательных приближений. По уравнению теплового баланса проверяем правильность выбора предварительной температуры стенки резервуара по формуле , где - находим при условии:

если , то ,

если , то .

Так как в вышележащих формулах - искомая величина, то при определении температуры теплоносителя можно принять . При получении конечной температуры в расчете необходимо пересчитать данную величину. При погрешности совпадение считать удовлетворительным.

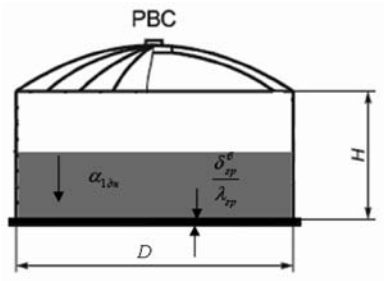


Рисунок 2 - Процесс передачи тепла через днище резервуара.

Для нахождения коэффициента теплопередачи через днище считаем, что предварительное значение температуры ,

$$k_{дн} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1дн}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\pi \cdot \delta_{грунта}^{бетон}}{8\lambda_{грунта}}}, \quad (15)$$

где , - толщина и теплопроводность стальной стенки днища резервуара, изоляции и т.д. Так как резервуар не теплоизолирован, то , аналогично для стенки и кровли; - коэффициент теплообмена конвекцией от теплоносителя через днище емкости;

- коэффициент теплопроводности грунта, - толщина бетонной подложки фундамента резервуара, определяется по известным теплофизическим формулам [5], во время выстаивания резервуара (процесс передачи тепла – свободная конвекция):

$$\alpha_{1дн} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_{ср}}{D_{рез}} \cdot (Gr \cdot \mathrm{Pr})_{ср}^{0.25} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{ср}}{\mathrm{Pr}_{ст.дн}} \right)^{0.25} \quad (16)$$

во время заполнения резервуара (вынужденная конвекция, создаваемая скоростью закачки воды):

при $\mathrm{Re} \geq 5 \cdot 10^5$ $\alpha_{1дн} = 0.037 \cdot \frac{\lambda_{ср}}{H_{налива}} \cdot \sqrt{\mathrm{Re}} \cdot (\mathrm{Pr})^{0.43} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{ср}}{\mathrm{Pr}_{ст.дн}} \right)^{0.25}$ (17)

при $\mathrm{Re} < 5 \cdot 10^5$ $\alpha_{1дн} = 0.76 \cdot \frac{\lambda_{ср}}{H_{налива}} \cdot \sqrt{\mathrm{Re}} \cdot (\mathrm{Pr})^{0.43} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{ср}}{\mathrm{Pr}_{ст.дн}} \right)^{0.25}$ (18)

где - коэффициент теплопроводности закачиваемого продукта при средней температуре продукта.

Для нахождения коэффициента теплопередачи через стенку в области газового пространства считаем, что среднее значение температуры внутренней стенки резервуара . Коэффициент теплопередачи находим по формуле (19):

$$k_{ст.г.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1ст.г.}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{2ст.г.} + \alpha_{3ст.г.}}},$$

где $a_{1стг}$ - коэффициент теплообмена от теплоносителя к вертикальной стенке емкости определяют по следующим формулам [5]

если Gr*Pr >10^9 - турбулентный режим, тогда коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к внутренней стенке резервуара равен

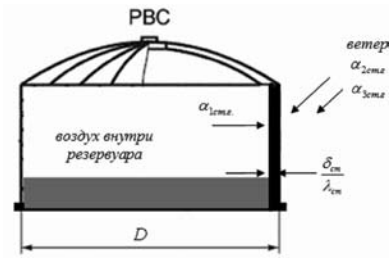


Рисунок 3 - Процесс передачи тепла через стенку резервуара в области газового пространства.

$$\alpha_{1ст.г} = 0.76 \cdot \frac{\lambda_{возд}}{H_{г.пр}} \cdot (Gr \cdot \mathrm{Pr})^{0.33} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{возд}}{\mathrm{Pr}_{ст}} \right)^{0.25} \quad (20)$$

если Gr*Pr <10^9 и Gr*Pr >10^3 - ламинарный режим, тогда

$$\alpha_{1ст.г} = 0.15 \cdot \frac{\lambda_{возд}}{H_{г.пр}} \cdot (Gr \cdot \mathrm{Pr})^{0.33} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{возд}}{\mathrm{Pr}_{ст}} \right)^{0.25} \quad (21)$$

21)

При расчете безразмерного параметра Грасгофа характерным размером является высота газового пространства, которая изменяется в зависимости от скорости заполнения резервуара. , - коэффициенты теплообмена за счет вынужденной конвекции, создаваемой скорость ветра, и свободной, соответственно

при $\mathrm{Re} < 10^4$ $\alpha_{2ст.г} = 0.57 \cdot \frac{\lambda_{возд}}{H} \cdot \sqrt{\mathrm{Re}} \cdot (\mathrm{Pr}_{возд})^{0.38} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{возд}}{\mathrm{Pr}_{ст}} \right)^{0.25}$ (22)

при $\mathrm{Re} \geq 10^4$ $\alpha_{2ст.г} = 0.28 \cdot \frac{\lambda_{возд}}{H} \cdot (\mathrm{Re})^{0.6} \cdot (\mathrm{Pr}_{возд})^{0.38} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{возд}}{\mathrm{Pr}_{ст}} \right)^{0.25}$ (23)

- находится через критерии подобия свободной конвекции (и) для вертикальной поверхности

$$\alpha_{3ст.г.} = B \cdot \frac{\lambda_{возд}}{H} \cdot (Gr \cdot \mathrm{Pr}_{возд})^n \quad (24)$$

(24)

Вертикальное расположение		
$Gr \cdot \mathrm{Pr}$	B	n
$10^3 - 10^9$	0.76	$1/4$
$> 10^9$	0.15	$1/3$

Если необходимо учитывать солнечную радиацию, тогда в уравнении (19), появится дополнительный член, учитывающий радиацию, который находится по формуле:

$$\alpha_{4ст.г} = \frac{\varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right)}{(T_{ст} - T_0)} \quad (25)$$

- степень черноты стенки резервуара, c_0=5,67- постоянная Стефана-Больцмана;

Для нахождения коэффициента теплопередачи через стенку в области жидкости среднее значение температуры поверхности внутренней стенки резервуара равно температуре закачиваемого

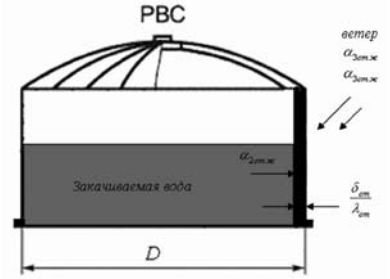


Рисунок 4 - Процесс передачи тепла через стенку резервуара в области жидкости.

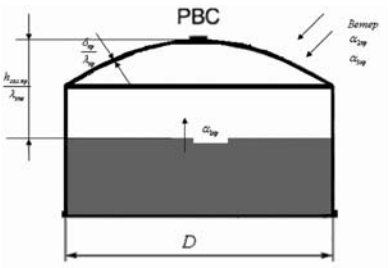


Рисунок 5 - Процесс передачи тепла через кровлю резервуара.

теплоносителя . Коэффициент теплопередачи находим по формуле:

$$k_{ст.ж.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1ст.ж}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{2ст.ж} + \alpha_{3ст.ж}}}, \quad (26)$$

где - коэффициент теплообмена вынужденной конвекции от теплоносителя к вертикальной стенке резервуара, создаваемый потоком теплоносителя, находится по формулам

во время выстаивания резервуара (свободная конвекция)

$$\alpha_{1ст.ж.} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_{ср}}{D_{рез}} \cdot (Gr \cdot \mathrm{Pr})^{0.25} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{ср}}{\mathrm{Pr}_{ст.дн}} \right)^{0.25} \quad (27)$$

во время заполнения резервуара (вынужденная конвекция, создаваемая скоростью закачки воды):

при $\mathrm{Re} \geq 5 \cdot 10^5$ $\alpha_{1ст.ж.} = 0.037 \cdot \frac{\lambda_{ср}}{H_{налива}} \cdot \sqrt{\mathrm{Re}} \cdot (\mathrm{Pr})^{0.43} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{ср}}{\mathrm{Pr}_{ст.дн}} \right)^{0.25}$ (28)

при $\mathrm{Re} < 5 \cdot 10^5$ $\alpha_{1ст.ж.} = 0.76 \cdot \frac{\lambda_{ср}}{H_{налива}} \cdot \sqrt{\mathrm{Re}} \cdot (\mathrm{Pr})^{0.43} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{ср}}{\mathrm{Pr}_{ст.дн}} \right)^{0.25}$ (29)

Остальные расчеты производятся аналогично . Характерным размером является .

Для расчета коэффициента теплопередачи от теплоносителя в окружающую среду через кровлю необходимо знать:

температуру «зеркала» теплоносителя в резервуаре принимаем равной средней температуре теплоносителя;

температуру внутренней поверхности кровли принимаем равной температуре окружающего воздуха;

температура газового пространства равна средне температуре окружающего воздуха и теплоносителя.

Коэффициент теплоотдачи находится по формуле:

$$k_{кр} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1кр}} + \frac{h_{газ.пр.}}{\lambda_{экв}} + \frac{\delta_{кр}}{\lambda_{кр}} + \frac{1}{\alpha_{2кр} + \alpha_{3кр}}}, \quad (30)$$

-коэффициент теплообмена от зеркала теплоносителя в газовое пространство резервуара (за счет свободной конвекцией) [4]:

при $(\mathrm{Pr} \cdot Gr) = 5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$ $\alpha_{1к} \approx 5{,}466 \cdot \sqrt[3]{T_{зеркала} - T_{г.п.}}$ (31)

при $(\mathrm{Pr} \cdot Gr) > 2 \cdot 10^7$ $\alpha_{1к} \approx 1.14 \cdot \sqrt[3]{T_{зеркала} - T_{г.п.}}$ (32)

Определяем параметры Грасгофа ( ) и Прандтля при средней температуре газового пространства (по данным для сухого воздуха).

За характерный параметр возьмем полную высоту газового пространства

$$h_{сегмента} = 2 \cdot h_{сф.конуса} \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{h^2_{конуса}}{2 \cdot D^2_{рез.}} \right) \quad (33)$$

где - высота сферического конуса, которая определяеся по типовому проекту резервуара.

По формуле определяем эквивалентный коэффициент теплопроводности газовоздушной смеси, где - коэффициент конвекции, -коэффициент теплопроводности газовоздушной смеси.

$$\varepsilon_к = 0{,}18 \cdot (Gr \cdot \mathrm{Pr})^{0.25} \quad (34)$$

Если $\varepsilon_к < 10^3$, тогда принимается $\varepsilon_к = 1$.

По формуле $\lambda_c = \lambda_{возд} \cdot (1 - C_1) + \lambda_{ср.} \cdot C_1$ определяем коэффициент теплопроводности газовоздушной смеси при влажности воздуха в газовом пространстве резервуара.

Коэффициенты теплообмена находятся аналогично коэффициентом теплообмена в области газового пространства. При нахождении рассматривается как вынужденная конвекция при обтекании плоской поверхности, при нахождении , как свободная конвекция для горизонтальных объектов.

Горизонтальное расположение трубы		
$Gr \cdot \mathrm{Pr}$	B	n
$10^3 - 10^7$	0.5	1/4
$> 10^7$	0.135	1/3

Алгоритм расчета конечной температуры теплоносителя

1.определение технико-экономических характеристик стального резервуара для нефти и нефтепродуктов: высота и диаметр резервуара, масса ограждающей конструкции, толщины стенок резервуара и др.;

2.определение максимального уровня налива продукта в резервуар;

3.нахождение площадей поверхности днища резервуара, кровли и стенки, контактирующей с продуктом и газовым пространством и общей площади;

4.определение приведенной температуры окружающей среды;

5.определение физических свойств среды (нефти или воды), которая возможно зависит от температуры, и массы продукта в резервуаре;

6.расчет коэффициента теплопередачи через днище;

7.расчет коэффициента теплопередачи через стенку, контактирующую с газовым пространством резервуара;

8.расчет коэффициента теплопередачи через стенку, контактирующую с продуктом;

9.расчет коэффициента теплопередачи через кровлю резервуара;

10.определение осредненного коэффициента теплопередачи от продукта в резервуаре к окружающей среде;

11.определение температуры теплоносителя в необходимый момент производственной операции (наполнение, опорожнение, выстаивание).

Список литературы

1. Матяш В.П. К математическому моделированию нестационарного тепломассообмена в стальных резервуарах с подогретыми нефтепродуктами // НТС: Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М., ЦНИИТ Энефтехим, 1979. - №5.

2. Стандарт организации СТО 02494680-0044-2008 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для хранения жидких продуктов. Правила проведения испытаний на прочность, устойчивость и герметичность.

3. Сафарян М.К. Стальные резервуары для хранения нефтепродуктов. – М.: ОНТИ, 1958г.

4. Тугунов П.И. и др. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов: Учебное пособие для вузов/ П.И. Тугунов, В.Ф. Новоселов, А.А. Коршан, А.М. Шаммазов, под ред. А.А. Коршака, 3-е изд., испр. – УФА: ДизайнполиграфСервис, 2008. – 658 с.

5. А.А. Кислицын Основы теплофизики: лекции и семинары. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2002. - 152с.

ОПЫТ ОЦЕНКИ НАЛЕДНОЙ ОПАСНОСТИ И РАЗРАБОТКИ ПРОТИВОНАЛЕДНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОДНОМ ИЗ УЧАСТКОВ ФЕДЕРАЛЬНОЙ АВТОДОРОГИ «АМУР» ЧИТА - ХАБАРОВСК

В.Г. Кондратьев[1,2], А.Д. Дементьев[3], С.В. Кондратьев[1]

[1]НПП «ТрансИГЭМ», г. Москва; [2]ЗабГУ, г. Чита; [3]ЗАО «Аква-Т», Москва
e-mail: v_kondratiev@mail.ru

Федеральная автодорога «Амур» является одной из крупнейших современных строек в России, начавшейся в 1978 г., завершенной в 2010 г. и стоившей около 200 млрд. рублей. Дорога имеет протяженность 2165 км и пересекает с запада на восток Забайкалье и Приамурье – территории с весьма неоднородными инженерно-геокриологическими условиями. При строительстве и эксплуатации дороги происходят существенные изменения мерзлотной обстановки и активизируются неблагоприятные инженерно-геокриологические процессы и явления, в частности, наледи, разрушающие дорогу и создающие предпосылки к снижению скорости и безопасности движения автомобилей. В докладе освещается 8-летний опыт изучения наледной опасности на участке автодороги «Амур», км км 2008-2022, и эффективности принятых технических решений по противоналедной защите различных типов водопропускных сооружений.

До 2003 г. при сооружении автодороги «Амур» на участках развития многолетнемерзлых грунтов и наледей предпочтение обычно отдавалось строительству малых и средних мостов. Даже в том случае, когда наледи лишь предполагались, часто без достаточного инженерно-геокриологического обоснования. Водопропускные трубы применялись лишь на суходолах и обычно в традиционном исполнении: железобетонные круглые диаметром 1,5 м из длинномерных звеньев, одно-, двух-, трех- и четырех очковые или прямоугольные с отверстием 2 х 2 м. Металлические гофрированные трубы применялись мало.

В 2003 г. ситуация кардинально изменилась, когда стало очевидным, что повсеместное применение малых и средних мостов на временных и малых водотоках задерживает темпы строительства автодороги и не всегда оправдано технически и экономически.

Так, отсутствие надлежащей геокриологической информации по участкам переходов автодороги через водотоки с шириной русла 5, 4 и 10 м на участках трассы км км 1008, 1020 и 1022 привело к тому, что первоначально, из опасений развития наледей, были запроектированы четырех- и трехпролетные мосты длиной 97 и 55 м.

Выполненные нами дополнительные исследования позволили оценить реальную наледную опасность на водотоках и разработать мероприятия по ее снижению.

Степень наледной опасности в местах перехода строящейся автодороги через водотоки на км км 1008, 1020 и 1022 была оценена на основе анализа гидрологических, гидрогеологических и мерзлотных условий по материалам изысканий, дополненных материалами натурных визуальных и геофизических исследований. Было установлено, что здесь имеются: а) сплошное распространение многолетнемерзлых пород со среднегодовой температурой около - 2°С, залегающих с глубин 1,1-1,8 м; б) незначительные ресурсы надмерзлотных вод. В этих условиях образование крупных наледей, которые надо было бы проходить мостовым переходом, невозможно. Лишь в отдельные годы могут образовываться маломощные наледи высотой до 0,5-1 м. Поэтому, по условиям наледной опасности нет необходимости в сооружении мостов.

В целях экономии средств и сокращения сроков строительства переходов автодороги через водотоки на обследованном участке, было рекомендовано заменить мосты на водопропускные гофрированные металлические трубы отверстие более 5 м.

На водотоках км 1008 и км 1020 так и было сделано (рис. 1-4).



Рисунок 1 - Металлическая гофрированная водопропускная труба, построенная взамен четырех-пролетного моста длиной 97 м на км 1008 автодороги «Амур», декабрь 2003 г.

Было также рекомендовано на случай возможного образования небольших наледей надмерзлотных вод разработать противоналедные мероприятия, которые позволили, бы защитить водопропускное сооружение от негативного воздействия наледи. Было рекомендовано применить перехват и задержание наледи до водопропускного сооружения с помощью активного противоналедного вала, сооружаемого поперек долины ручья и состоящего из двух не фильтрующих земляных призм на пойме и противоналедного забора в русловой части, способного пропускать паводковые воды и удерживать на-

ледь.

Призмы должны оказывать на грунты основания охлаждающее воздействие, для того чтобы исключить фильтрацию надмерзлотных вод под противоналедным валом. Для этого было рекомендовано использовать способы укрепления основания земляного полотна (Кондратьев, 2001), предусматривающие понижение среднегодовой температуры грунтов и сохранения их в многолетнемерзлом состоянии путем регулирования соотношения охлаждающих и отепляющих факторов.

Основные параметры водотоков и водопропускных труб на км 1008 и км 1020 приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Параметры водотоков и водопропускных труб на км км 1008 и 1020 автодороги «Амур»

Параметр	**Км 1008**	**Км 1020**
Ширина русла, м	5	**4**
Расчетный расход воды, м3/ сек	51	**57,5**
Тип трубы	МВ21	МВ15
Длина трубы, м	35	22
Ширина трубы, м	7,23	6,04
Высота трубы, м	4,24	3,62
Эквивалентный диаметр трубы, м	5,42	4,59
Толщина стенки трубы, мм	7,00	4,75

Замена моста на трубы на км 1022 генпроектировщиком согласована не была из-за большого (по его мнению) расчетного расхода воды - 110 м3/ сек и возможного корчехода и был построен обычный трехпролетный железобетонный мост (рис. 5 и 6).

В период с 2003 по 2011 г. осуществлялся визуальный и фотографический мониторинг наледеобразования на участке, который полностью подтвердил правильность оценки наледной опасности и рекомендаций по замене мостов на металлические гофрированные трубы с противоналедными мероприятиями.



Рисунок 2 - Эта же труба на км 1020 автодороги «Амур», апрель 2011 г.



Рисунок 3 - Металлическая гофрированная водопропускная труба, построенная взамен трех-пролетного моста длиной 55 м на км 1020 автодороги «Амур», декабрь 2003 г.



Рисунок 4 - Эта же труба на км 1020 автодороги «Амур», апрель 2011 г.

На рис. 2 показано состояние водопропускных труб на км 1020 и практически полное отсутствие наледеобразования в русле водотока на апрель 2011 г. В течение 8 лет наблюдений ни разу не была отмечена наледь мощностью более 0.5 м, предусмотренная высота труб обеспечивала свободный пропуск наледи и наледных вод, не потребовались дополнительные противоналедные мероприятия.

На км 1008 ежегодно формировалась наледь, но отверстие трубы всегда оставалось свободным (рис. 4). Здесь также не потребовались дополнительные противоналедные мероприятия.

На рис. 6 показан мост на км 1022 и слабое проявление наледных процессов в русле речки Керак на апрель 2011 г. В течение 8 лет наблюдений на км 1022 ежегодно отмечалось образование наледи мощностью более 1 м, что подтверждает, что и здесь была бы целесообразна замена моста на металлические гофрированные трубы, высота которых обеспечила бы свободный пропуск наледи и наледных вод. В наиболее наледеопасные годы могли бы быть применены дополнительные противоналедные мероприятия, освещенные выше.

Опыт проектирования и строительства водопропускных труб на федеральной автомобильной дороге «Амур» Чита-Хабаровск, а также на других магистралях, в том числе и железных дорогах, показал, что металлические сборные гофрированные структуры (трубы, арки, трубы-арки) являются перспективными для использования в качестве водопропускных сооружений в связи с их высокой конструктивной прочностью, достигаемой за счет выбора формы трубы



Рисунок 5 - Железобетонный трех-пролетный мост на км 1022 автодороги «Амур», декабрь 2003 г.



Рисунок 6 - Этот же мост на км 1020 автодороги «Амур», апрель 2011 г.

или арки, качества, специальной обработки и толщины стали.

Гофрированные трубы могут эффективно использоваться на участках с любыми, как твердыми, так и слабыми грунтами, вместо арочных пролетных конструкций на мостовых опорах или железобетонных и каменных труб.

На наледеопасных участках применение водопропускных труб должно обосновываться оценкой реальной наледной опасности и разработкой соответствующих противоналедных мероприятий.

Литература

1. Кондратьев В.Г. Активные способы укрепления основания земляного полотна на вечномерзлых грунтах. – Чита: Забтранс, 2001.

Part 3
Geotechnical monitoring of industrial and civil facilities and environmental problems of building on permafrost

Часть 3
Геотехнический мониторинг промышленных и гражданских объектов и экологические проблемы строительства на вечномерзлых грунтах

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ С СИСТЕМАМИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ

С.Н. Стрижков[1], Н.А. Скорбилин[1]

[1]НПО «Фундаментстройаркос», г.Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

Рассматриваются особенности проведения в ООО НПО «Фундаментстройаркос» геотехнического мониторинга для оценки надежности оснований зданий и инженерных сооружений с установленными системами температурной стабилизации грунтов. Показаны возможности применения графического анализа для обработки термометрических данных на примере объектов Варандейского нефтяного отгрузочного терминала. Оценены перспективы использования тепловизионной и георадарной техники в мониторинговых исследованиях

Многолетний опыт строительства и эксплуатации жилых и промышленных зданий, инженерных сооружений в криолитозоне не избавляет от многочисленных случаев деформаций этих объектов, иногда аварийного характера, связанных с деятельностью криогенных процессов и явлений. Дополнительную напряженность ситуации вызывает прогнозируемое на ближайший период времени многими учеными и специалистами глобальное потепление климата, что обязывает уже сейчас обеспечивать надежность сохранения мерзлого состояния грунтов оснований при наступлении подобных отрицательных воздействий.

В связи с этим защита территорий от опасных криогенных процессов и явлений, надежность эксплуатируемых объектов, в первую очередь – их оснований, и экологи¬ческая безопасность окружающей природной среды должны быть обеспечены на всех стадиях формирования и функциониро¬вания геотехнических систем (ГТС), состоящих из совокупности природных объектов и технических сооружений, прямо связанных друг с другом, когда функционирование технического объекта сильно зависит от природного и наоборот [1].

Для предотвращения и устранения аварийных ситуаций в периоды строительства и эксплуатации объектов в криолитозоне, для температурной стабилизации и замораживания талых и охлаждения пластично-мерзлых грунтов ООО НПО «Фундаментстройаркос» разработало, производит и широко использует системы температурной стабилизации грунтов оснований (ТСГ): системы «ГЕТ» (системы горизонтальные, естественнодействующие, трубчатые), системы «ВЕТ» (системы вертикальные, естественнодействующие, трубчатые), «ТК» (индивидуальные «СОУ»-термостабилизаторы), «СОУ» (сезоннодействующие глубинные охлаждающие устройства) и другие [2-6]. Всего за период 1993-2010 гг. установлено: «ГЕТ» – 1020 систем, «ВЕТ» – 337 систем, «ТК» и «СОУ» – 103071 устройств [7].

Проекты температурной стабилизации грунтов в ООО НПО «Фундаментстройаркос» разрабатываются и реализуются на основе результатов специальных инженерных (инженерно-геологических, инженерно-геокриологических, инженерно-гидрологических и гидрогеологических) изысканий с учетом конструктивных и технологических особенностей проектируемых сооружений, их теплового и механического взаимодействия с многолетнемерзлыми грунтами (ММГ) оснований и возможных изменений геокриологических условий, в том числе в связи с прогнозируемым глобальным потеплением климата. При этом учитываются местные условия строительства, требования к охране окружающей среды, а также имеющийся опыт проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений в аналогичных условиях.

Существенная роль в обеспечении эксплуатационной надежности и долговечности зданий и сооружений с установленными в их основаниях системами ТСГ, контроля работоспособности и эффективности работы последних, состояния температурного поля грунтов оснований принадлежит геотехни¬ческому мониторингу (ГТМ) – системе комплексного контроля, прогнозирования и управления состоянием ГТС с целью обеспечения их надежности на всех стадиях жизненного цикла. ГТМ, проводимый в ООО НПО «Фундаментстройаркос» на объектах с системами ТСГ, предназначен для сбора достоверных данных по температурному и деформационному состоянию грунтов оснований, работоспособности охлаждающих устройств, устойчивости и долговечности фундаментов и надземных конструкций, наблюдениям за погодными условиями. Он включает в себя комплекс следующих мероприятий [7]:

- Выезд специалистов ООО НПО «Фундаментстройаркос» на объект ГТМ;
- Осмотр прилегающей территории на предмет отсутствия подтопления, подмыва и осадок грунтов, деформаций оснований и фундаментов;
- Осмотр состояния отмостки, колонн, ростверков на отсутствие деформаций;
- Осмотр сетей тепло-водоснабжения, канализации на отсутствие утечек;
- Внешний осмотр надземной части систем ТСГ на наличие механических повреждений и целостность лакокрасочного покрытия, фотодокументирование;
- Проверка надземной части систем ТСГ на наличие утечек в сварных соединениях и венти-

лях;

• Измерения давления хладагента в системах при помощи манометра;

• Измерения уровня хладагента в системах тепловым способом по границе нагрева коллектора конденсаторных блоков (в зимнее время при температуре ниже 15°С);

• Определение частоты циркуляции хладагента в системах ТСГ;

• Измерения температуры надземной части систем ТСГ. При работающих системах температура надземной части должна быть на 5...15°С выше, чем температура наружного воздуха;

• Проверка работоспособности систем ТСГ;

• Измерения температуры воздуха в помещениях и снаружи объекта;

• Измерения скорости ветра - для оценки процессов теплообмена между устройствами и окружающим воздухом;

• Измерения температуры грунтов в термометрических трубах. Составление карты замеров температур;

• Обработка полученных данных;

• Анализ работы систем ТСГ. Формулировка выводов, рекомендаций;

• Составление технического отчета.

При обнаружении несоответствия характеристик работоспособности систем ТСГ параметрам, указанным в проектно-сметной документации, проводятся следующие дополнительные мероприятия:

• Определение неисправности;

• Контроль за проведением спецмонтажных работ, дозаправкой хладагентом;

• Повторное проведение инструментального замера утечек хладагента и измерение давления в системе ТСГ, принятие решения о работоспособности системы ТСГ с составлением акта скрытых работ;

• Контроль за запуском систем ТСГ в эксплуатацию.

Структуру ГТМ составляют две основные системы - сле¬жения и управления. Первая система состоит из блоков сбора и компьютерной обработки полученной информации, вторая – из трех взаимосвязанных блоков – анализа информации, прогноза ситуации и реализации приня¬тых на основе прогноза решений по обеспечению эксплуатацион¬ной надежности объектов [8].

Блок сбора информации включает все указанные выше данные. В блок компьютерной обработки информации входят базы данных для накопле¬ния и хранения исходной и мониторинговой информации, про¬граммы обработки данных мониторинга, материалы инженерных изысканий.

Блок анализа информации предназначен для оператив¬ной оценки изменений инженерно-геокриологической обстанов¬ки и их влияния на устойчивость объектов и экологическую устойчивость. Блок прогноза ситуации на основе данных на¬блюдений мониторинга прогнозирует вероятные изменения ин¬женерно-геокриологических условий и устойчивости объектов. Наличие блока прогноза позволяет своевременно предотвращать критическое состояние природной среды и недопустимые дефор¬мации инженерных объектов. Для разработки и осуществления не¬обходимых мероприятий по поддержанию эксплуатационной при¬годности сооружений и устойчивости геокриологической среды используется блок реализации мониторинга.

ГТМ начинается в достроительный период, когда формируется наблюдательная сеть для фоновой оценки геокриологической обстановки. Результаты мо¬ниторинга в этот период служат исходными данными для оценки изменений, которые будут происходить при строительстве и эксплуатации объектов с системами ТСГ.

В строительный период проводится организация наблюдательной сети и выполняются наблюдения на строящихся объектах. Данные мониторинга в этот период оперативно представляются службам авторского над¬зора и другим органам, осуществляющим контроль за ведением строительных работ и экологической безопасностью территории.

В начальный период эксплуатаионного периода (первые 3-5 лет) взаимодействие сооружений с природной средой происходит наиболее активно и возможны существенные изменения геокриологической обстановки и деформации сооружений. В этот же период может быть оценена эффективность используемых способов инженерной подготовки территории, стабилизации температур¬ного режима грунтов оснований, природоохранных и других мероприятий. После 3-5 лет эксплуатации сооружений (основной период), наступает относительное динамическое равновесие в си¬стеме сооружение-природная среда или за это время принимаются соответствующие меры для поддержания стабилизации природной обстановки и устойчивости сооружений. Развитие опасных геокриологических процессов и деформаций сооружений в этот период могут произойти из-за грубых нарушений условий эксплуатации, либо в результате значительных изменений природных процессов (например, глобального потепления климата). В связи с этим, наибольший объем наблюдений должен выполняться в начальный период эксплуатации, а затем наблюдения могут быть сокращены либо сосредоточены на наиболее опасных участках со¬оружений. Данные мониторинга в эксплуатационный период представляются эксплуатирующей организации. На основе этих данных принимается решение о внесении изменений в режим эксплуатации объектов или о необходимости дополнительных мероприятий для обеспечения безопасного функционирования сооружений и сохранения природной среды.

Согласно СНиП 2.02.04-88 [9], в любом проекте оснований и фундаментов зданий и инженерных сооружений, возводимых на ММГ, в системе натурных наблюдений за состоянием грунтов оснований и фундаментов должно быть предусмотрено обязательное проведение регулярных измерений температуры грунтов как в процессе строительства, так и в период эксплуатации сооружения. Количество, глубина и размещение необходимых для проведения мониторинга температур грунтов наблюдательных термометрических труб (скважин, ТТ), то есть термометрического мониторинга, его программа определяются разрабатываемыми ООО НПО «Фундаментстройаркос» проектами систем ТСГ, учитывающими назначение, степень ответственности и линейные размеры строящихся зданий и сооружений. Для этих целей также в полной мере должны использоваться результаты анализа инженерно-геологических изысканий, генплана застройки территории и особенностей теплового взаимодействия зданий, сооружений, трубопроводов и грунтов их оснований.

Измерения температуры грунтов должны выполняться в заранее подготовленных и выстоянных скважинах переносными или стационарными термоизмерительными комплектами, представляющими собой гирлянды электрических датчиков температуры с соответствующей измерительной аппаратурой или гирлянды «заленивленных» ртутных термометров. Температуру мерзлых, промерзающих и протаивающих грунтов следует выражать в градусах Цельсия с округлением до 0,1°С [10].

В ООО НПО «Фундаментстройаркос» измерения температуры грунтов в сети ТТ, пробуренных на территории объекта, производят с помощью комплекса, состоящего из многозонного цифрового датчика температуры МЦДТ 0922 и многоканального портативного контроллера цифровых датчиков ПКЦД-1/16 (рисунок 1) в соответствие с требованиями ГОСТ 25358-82 [10]. Эти измерения проводятся преимущественно специально обученным персоналом ООО НПО «Фундаментстройаркос» с ведением соответствующего журнала. Периодичность этих измерений, как правило, следующая: в первый год эксплуатации системы ТСГ - ежемесячно, с интервалом по глубине не менее 2 м; в последующие годы - 2 раза в год, соответственно в середине зимы и в конце летнего периода.

Многозонный цифровой датчик температуры МЦДТ 0922 предназначен для одновременного измерения температуры в нескольких точках объекта, расположение которых определяется конструкцией объекта [11]. Он приспособлен для полевого определения температуры грунтов по ГОСТ 25358-82 [10], где требуется получить информацию о конкретных данных температуры мерзлых, промерзающих и протаивающих грунтов. Температура воздуха при эксплуатации – от минус 50 до плюс 85°С. Общая длина – 12025 мм. Этот датчик преобразует измеренный сигнал в цифровой вид с последующей передачей его на устройство считывания, хранения и отображения данных – портативный контроллер цифровых датчиков ПКЦД-1/16. Допускается использование одного прибора ПКЦД-1/16 для работы с несколькими датчиками. МЦДТ 0922 соответствует требованиям действующей конструкторской документации МКСН.405226.001 и является многозонным (в данном случае количество зон - 10), однофункциональным изделием. Количество зон измерения соответствует количеству измерительных преобразователей МЦДТ 0922.

Многоканальный портативный контроллер цифровых датчиков ПКЦД-1/16 предназначен для считывания результатов измерения с цифровых датчиков температуры. Температура воздуха при кратковременной эксплуатации - от минус 50 до плюс 50°С. Количество одновременно подключаемых датчиков – от 1 до 16.

Контроллер опрашивает датчики и выводит результаты измерения на дисплей. При подключении к компьютеру результаты измерения всех датчиков отображаются на графике и могут сохраняться на жесткий диск. Пользователь при необходимости также может сохранить результаты во внутренней энергонезависимой памяти контроллера. Расстояние от контроллера до последнего датчика – до 25 м [12].

При строительстве и эксплуатации зданий и сооружений с установленными системами ТСГ в качестве объектов термометрического мониторинга выступают в тесном взаимодействии грунты оснований, фундаменты и сами системы ТСГ, что вызывает необходимость измерений температур грунтов максимально близко к фундаменту, не выходя за пределы зоны действия системы ТСГ. Поэтому при проектировании таких объектов большое значение в повышении эффективности проведения мониторинга, уменьшении финансовых затрат на него имеет оптимальное размещение ТТ по площадке.



Рисунок 1 - Многозонный цифровой датчик температуры МЦДТ 0922 (а) и многоканальный портативный контроллер цифровых датчиков ПКЦД-1/16 (б)

Имеющаяся по этому вопросу нормативно-методическая документация весьма немногочисленна и имеет преимущественно рекомендательный характер [9, 13-18]. В целом, в ней рекомендуется,

чтобы сеть ТТ охватывала все объекты и участки с различными инженерно-геокриологическими условиями для определения геокриологических изменений как непосредственно в основании каждого сооружения, так и по площадке в целом, причем в пределах каждой строительной позиции оборудуется не менее одной скважины. Другие, более конкретные рекомендации из нормативно-методической документации, с учетом имеющегося в ООО НПО «Фундаментстройаркос» двадцатилетнего опыта проектирования систем ТСГ, заключаются в следующем:

• Для наблюдений за фоновым изменением температур грунтов в ходе естественных изменений природно-климатических условий района устанавливают не менее одной ТТ вне зоны влияния инженерных сооружений;

• Необходимо размещать ТТ на участках потенциально опасных с точки зрения развития криогенных процессов (термокарст, пучение, новообразование мерзлых грунтов, формирование перелетков и т.д.) для отслеживания и контроля динамики их развития;

• Глубина заложения ТТ должна быть не менее глубины нулевых годовых амплитуд колебаний температуры грунтов, расчетной глубины распространения техногенного теплового воздействия на грунты за период эксплуатации сооружений и глубины заложения фундамента сооружения;

• На участках распространения ММГ сливающегося типа, глубина заложения ТТ должна составлять не менее 10 м, что позволяет определять температуру грунтов на глубине нулевых годовых амплитуд;

• На участках распространения ММГ несливающегося типа с заглубленной кровлей, проектная глубина ТТ должна превышать максимальную глубину залегания кровли ММГ не менее чем на 2 м (рекомендуется 5 м) для контроля состояния и изменений положения кровли многолетнемерзлых грунтов. В случае, если глубина заложения фундаментов выше глубины залегания кровли ММГ на 5 м и больше, проектная глубина ТТ может быть не более 5 м;

• При проектировании одновременно на нескольких смежных площадках необходимо использовать возможность более рационального и эффективного размещения ТТ с учетом всей проектируемой площади.

Поскольку для разных типов зданий и инженерных сооружений существуют свои методы строительства, индивидуальный подбор фундаментов и систем ТСГ, в зависимости от этого появляются дополнительные требования к размещению ТТ по площадке.

Основную часть зданий и сооружений со свайными и столбчатыми фундаментами составляют:

• Жилые вахтовые поселки;

• Производственные, технологические здания, корпуса, цеха, площадки, станции, узлы, установки;

• Склады технологического и вспомогательного оборудования, материалов, ГСМ в таре, сыпучих химреагентов;

• Очистные сооружения бытовых стоков;

• Магистральные насосные;

• Эстакады межцеховых коммуникаций;

• Теплые автостоянки.

При проектировании размещения ТТ на указанных объектах следует соблюдать следующие дополнительные требования:

• Для зданий, возводимых по I принципу использования ММГ в качестве оснований, число ТТ, устанавливаемых рядом со свайными или столбчатыми фундаментами, должно быть не менее 2% общего числа фундаментов;

• В пределах площадки ТТ размещать нужно достаточно равномерно, при этом расстояние между соседними скважинами не должно превышать 15-20м. ТТ реко¬мендуется располагать у наружных фундаментов, а также у фун¬даментов, находящихся посредине здания (близко к геометрическому центру сооружения). В случае невозможности их установки в пределах контура сооружения (например, заглубленные емкости, компактное оборудование с монолитным фундаментом «по грунту» и т.п.), то нужно их устанавливать на минимальном расстоянии от фундамента для получения значений температур, максимально приближенных к температурам в основании фундаментов;

• Если в подполье запланирован водоотводный лоток, дополнительно необходимо предусмотреть скважины у одного или двух фундаментов, расположенных вблизи лотка;

• Обязательна установка ТТ у фундаментов, ближайших к подземному вводу или вы¬пуску санитарно-технических коммуникаций, а при надземной их прокладке в местах их погружения в грунт, за пределами здания;

• При наличии в проектируемом здании или сооружении мощного источника тепла искусственного происхождения, влияющего на обогрев помещений, расположить дополнительные ТТ у ближайших к ним фундаментов.

При размещении ТТ на объектах, включающих резервуары, парки ГСМ и химреагентов, склады ГСМ, необходимо учитывать следующие дополнительные требования:

• На площадке с одиночными резервуарами ТТ размещаются равномерно по окружности, на минимально допустимом расстоянии от стенок резервуара и систем ТСГ. По хорде между соседни-

ми скважинами должно быть не более 10м;

• В случаях проектирования резервуарных парков или складов наряду с реализацией предыдущей рекомендации необходимо учесть межрезервуарное пространство, для чего по возможности достаточно равномерно разместить там ТТ с тем расчетом, чтобы в целом расстояния между всеми соседними ТТ не превышали 10м.

При размещении ТТ на кустах скважин имеется ряд дополнительных требований:

• Для контроля за динамикой температур в зоне теплового воздействия эксплуатационных скважин, расположенных кустовым способом, ТТ оборудуются по профилям в их створе.

• Количество ТТ в профиле – не менее трех. При этом, первая из них находится в максимально возможном приближении к эксплуатационной, вторая – на расстоянии от 1,0 до 1,5 м, третья от 3,0 до 5,0 м.

• Удаленность ТТ от добывающих скважин зависит от температуры добываемого флюида и степени теплоизоляции скважины; расстояния определяются по результатам расчетов теплового воздействия добывающих скважин на мерзлые породы.

При размещении ТТ на трассах газопроводов следует соблюдать следующие дополнительные требования:

• В пределах трасс газопроводов ТТ оборудуются на участках размещения крановых узлов, узлов приема очистных устройств, врезки перемычек, лупингов и т.п., расположенных в пределах распространения ММГ. В пределах каждого узла строится от трех до шести скважин.

• ТТ располагаются по профилям, расположенным поперек трасс газопроводов. Крайние скважины в профилях должны располагаться вне зоны теплового влияния газопроводов (20 м).

Для дорожных насыпей имеются следующие дополнительные требования к размещению ТТ:

• В пределах дорожных насыпей ТТ оборудуются на выделенных ландшафтных ключевых участках вне насыпей по профилям, расположенным вкрест трассы линейного сооружения.

• Количество скважин и их расположение в пределах трасс дорожных отсыпок зависит от природно-геологических условий конкретного участка и устанавливается по результатам анализа данных инженерных изысканий.

• Дополнительные ТТ могут оборудоваться в местах расположения мостовых переходов, на участках пересечения с трассами подземных трубопроводов, в местах интенсивного развития экзогенных процессов.

На время функционирования объектов с установленными системами ТСГ в ООО НПО «Фундаментстройаркос» выполняется прогноз температурного режима грунтов основания по специальной программе “FROST (DK)” (сертификат соответствия № 06.0001.0314 от 22.02.2010г.), разработанной М.М. Дубиной и А.А. Кашеваровым в Сибирском отделении РАН, в соответствие с РСН 67-87 [19]. Полученные в это время данные по измерениям температуры грунтов анализируются и сравниваются с их проектными аналогами, на основе чего делается заключение об эффективности работы систем ТСГ.

Среди возможных причин расхождений указанных значений температуры грунтов при их сравнении рассматриваются:

• неисправность охлаждающих устройств;

• эксплуатация контролируемого объекта с отклонениями от проекта;

• аномально высокие температуры анализируемого зимнего периода;

• наличие в прошедший период аварийных ситуаций в виде подтопления грунтовыми водами, порыва труб водоснабжения и т.п.

После пуска в эксплуатацию систем ТСГ в основании контролируемого объекта [20] начинается проведение термометрического мониторинга и других мероприятий, входящих в программу ГТМ. По результатам работ регулярно составляется технический отчет, где, в том числе, приводятся данные замеров температур грунтов в табличном и графическом виде. Важное место в обработке и анализе термометрической информации могут занимать графические и картографические средства ее отображения, использующие современные компьютерные технологии (в частности, программные комплексы Surfer, SigmaPlot, MapInfo и др.).

Ниже показано использование таких технологий на примере графического анализа результатов термометрического мониторинга объектов с установленными системами ТСГ. Это гараж закрытый и маслосклад Варандейского нефтяного отгрузочного терминала.

Гараж закрытый береговых сооружений находится на территории Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, на участке распространения вечномерзлых грунтов несливающегося типа (рисунок 2). Грунты основания используются по I-му принципу. Температура грунтов в ТТ на уровне нулевых амплитуд - от минус 0,1 до минус 1,0°С. Минимальная температура начала замерзания грунтов по ТТ в контуре здания на глубине погружения свай составляет для песков минус 1,4°С, для супесей - минус 1,1°С, для суглинков - минус 2,5°С [9].

Система ТСГ состоит из горизонтальной естественно-действующей трубчатой системы «ГЕТ», системы охлаждения с вертикальными трубами «ВЕТ» (теплоноситель – аммиак) и термостабилизаторов (теплоноситель - углекислый газ). Конструктивно система «ГЕТ» состоит из 4 автономных подсистем, 2-х резервных сухих подсистем и 12-и систем с вертикальными отводами «ВЕТ».

Средневзвешенные температуры по массиву грунтового основания. Здесь использованы

осредненные для глубин 3-10м данные по температурам грунтов, измеренным в ТТ за период наблюдений с мая 2006г. по май 2011г. По этим графикам (рисунок 3) можно проследить динамику изменения этих температур за указанный период, которая свидетельствует о их неуклонном в целом понижении со времени начала работы систем ТСГ на исследуемой площадке. В последние 1,5 года рассматриваемые температуры были постоянно ниже минимальных температур замерзания грунтов песчаного, супесчаного и суглинистого литологического состава.

Графики изменений температуры грунтов по результатам термокаротажа скважин. Эти графики (рисунок 4) показывают изменения температур грунтов в ТТ с глубиной на определенный срок наблюдений. В данном случае были выбраны первый и последний сроки (соответственно, 05.05.2006г. и 01.06.2011г.). На первом (2006г.) из этих графиков температуры грунтов во всех скважинам, начиная с глубины около 3м, находятся в интервале от 0 до минус 1ОС, тогда как температуры на втором (2011г.) графике на тех же глубинах значительно ниже – до минус 5 – минус 7 ОС. Таким образом, пять лет работы систем ТСГ привели на исследуемом объекте к значительному понижению температур грунтов.

Графики термоизоплет по каждой ТТ за весь период наблюдений. По температурным данным всех 11 ТТ (рисунок 5, пример по скважине ТТ-4) за период наблюдений с мая 2006г. по июнь 2011г., совпадающий со временем работы системы ТСГ, были построены графики термоизоплет, которые также в целом подтверждают тенденцию к понижению температур грунтов со временем в пределах рассматриваемой площадки. В последний год в ее грунтовом массиве на глубинах 3-10м, благодаря работе систем ТСГ, сформировалось устойчивое ядро с мерзлыми породами, имеющими температуру до минус 6ОС, что значительно ниже минимальных температур начала замерзания песков, супесей и суглинков.



Рисунок 2 - Здание гаража закрытого береговых сооружений

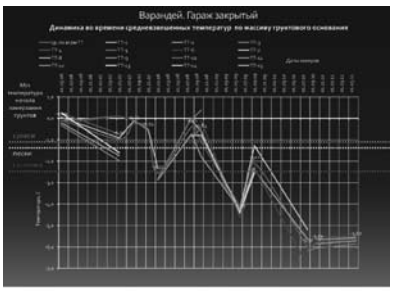


Рисунок 3 – Графики средневзвешенных температур по массиву грунтового основания

Температурные профили по ряду скважин. Температурные профили по скважинам ТТ-4, ТТ-9, ТТ-11 (рисунки 6, 7) представляют ситуацию на начальный и последний периоды работы системы ТСГ и термометрических наблюдений, соответственно 05.05.2006г. и 04.06.2011г. Если на первом графике отмечается высокотемпературная грунтовая толща (до 0 – минус 0,2 ОС на глубине 4-10м), то на втором графике во всех анализируемых ТТ фиксируются мерзлые грунты с устойчивыми температурами до минус 6 ОС, что свидетельствует о значительной работе, проделанной системами ТСГ по замораживанию грунтов.

Схемы пространственного распределения температур грунтов по глубине. На этих схемах распределения температур грунтов по глубинам 3, 5, 7 и 10м, сделанных с помощью программного комплекса MapInfo по термометрическим данным на 28.09.2009г., отмечается постепенное понижение температур с глубиной. В пространственном отношении на всех схемах (рисунок 8, пример по глубине 10м) выделяются два участка в левой и правой частях схемы (скважины №№ 1-4, 10, 11) с относительно низкими температурами (от минус 2,5 до минус 3,1 ОС), разделяющиеся между собой участком (скважины №№ 5-9) с относительно высокими температурами грунтов (от минус 2,4 до минус 1,0 ОС), местами находящихся даже в талом состоянии на этом промежуточном этапе (28.09.2009г.) их промораживания. Причиной талого состояния грунтов могли быть сложившиеся на тот момент времени природно-климатические условия, повышенный теплопоток в фундаменте этой части здания, недостаточно эффективная работоспособность систем ТСГ. В дальнейшем эта проблема была решена, и промораживание грунтов продолжилось.

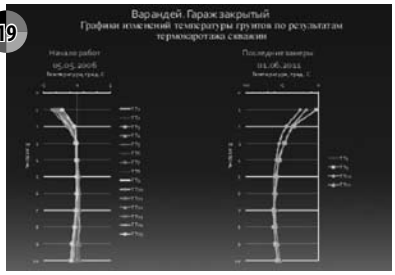


Рисунок 4 – Графики изменений температуры грунтов по результатам термокаротажа скважин

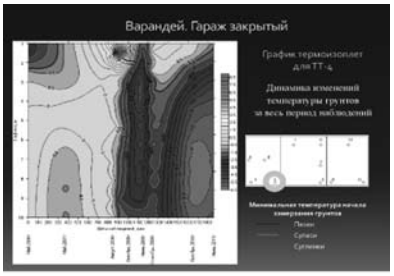


Рисунок 5 – График термоизоплет для скважины ТТ-4

В целом, анализ результатов термометрического мониторинга грунтов основания исследуемого объекта, представленных в графическом виде, показал, что за время наблюдений на данной площадке идет непрерывный процесс промерзания грунтов основания, закономерно замедляющийся в теплый период и ускоряющийся в холодный период года с трендом, направленным в целом в сторону понижения температур грунтов, что однозначно свидетельствует об эффективной рабо-

те здесь систем температурной стабилизации грунтов, произведенных и установленных ООО НПО «Фундаментстройаркос».

В качестве второго примера проведения графического анализа результатов термометрического мониторинга объектов с установленными системами ТСГ представлен маслосклад того-же Варандейского нефтяного отгрузочного терминала. Его здание также расположено на участке с ММГ несливающего типа, имеющими температуры (Т0) на уровне нулевых амплитуд минус 0,9 °С (скважина С-403) и минус 1,3 °С (скважина С-406). Вскрышные грунты основания этого здания представлены линзами среднезасоленных песков, супесей и суглинков, находящихся в пластичномерзлом и охлажденном состоянии. Темпера¬тура начала замерзания отдельных слоев грунтов в пределах десятиметровой глубины от дневной поверхности составляет от минус 2,2 до минус 3,0 °С.

Для реализации I-го принципа использования ММГ основания и обеспечения устойчивости основания и фундаментов рассматриваемого объекта проектом системы ТСГ, разработанным ООО НПО «Фундаментстройаркос», предусматривается охлаждение пластичномерзлых и замораживание талых грунтов основания на глубину погружения свай в период строительства зданий с сохранением максимальной расчетной температуры под концом сваи минус 3,2°С и ниже, а рас¬четной среднегодовой температуры на уровне укладки системы ТСГ - минус 4,0°С и ниже.

Согласно рекомендациям [21], при данном температурном режиме грунты основания становятся сливающегося типа и в пределах глубины погружения свай пески находятся в твердомерзлом со¬стоянии на участке скважин С-403 и С-406 и близки к твердомерзлому состоянию на участке скважины С-405. Ниже подстилающий свайное основание слой сильнозасоленного охлажденного суглинка переходит в пластичномерзлое состояние.

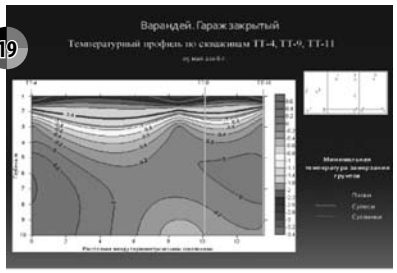


Рисунок 6 – Температурный профиль по скважинам ТТ-4, ТТ-9, ТТ-11 (на 05.05.2006г.)

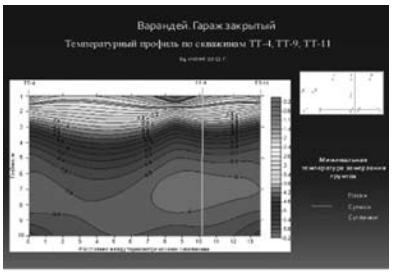


Рисунок 7 – Температурный профиль по скважинам ТТ-4, ТТ-9, ТТ-11 (на 04.06.2011г.)

Система ТСГ состоит из горизонтальной естественнодействующей трубчатой системы «ГЕТ» (патент №142615), системы охлаждения с вертикальными трубами «ВЕТ» (теплоноситель – аммиак) и термостабилизаторов (теплоноситель - углекислый газ). Конструктивно система «ГЕТ» состоит из четырех автономных подсистем, двух резервных сухих подсистем и восьми систем с вертикальными отводами «ВЕТ».

Средневзвешенные температуры по массиву грунтового основания. Здесь использованы данные по температурам грунтов, измеренным в ТТ за период наблюдений с марта 2006г. по сентябрь 2011г., осредненным для глубин 3-10м. По этому графику (рисунок 9), несмотря на определенную нерепрезентативность данных, можно проследить динамику изменения этих температур за указанный период, которая свидетельствует о их неуклонном в целом понижении со времени начала работы систем ТСГ на исследуемой площадке. Для сравнения на график нанесены уровни минимальных температур начала замерзания грунтов по скважинам в контуре здания гаража закрытого, находящегося неподалеку от рассматриваемого объекта. Их значения на глубине погружения свай (СНиП 2.02.04-88 прил.1 табл.2) составляют для песков минус 1,4°С, для супесей - минус 1,1°С, для суглинков - минус 2,5°С [9].

Графики изменений температуры грунтов по результатам термокаротажа скважин. Эти графики (рисунок 10) показывают изменения температур грунтов в ТТ на определенный срок наблюдений. В данном случае были выбраны первый и последний сроки периода наблюдений (соответственно, 28.03.2006г. и 01.09.2011г.). На первом (2006г.) из этих графиков температуры грунтов во всех скважинах, начиная с глубины около 3 м, находятся около 0 ОС и несколько ниже, тогда как температуры на втором (2011г.) графике на тех же глубинах значительно ниже – от минус 1,5 до минус 4,2 ОС. Таким образом, за пять лет работы СТС грунтов на исследуемом объекте температуры грунтов значительно понизились. Тем не менее, при сравнении их с максимальной расчетной температурой под концом свай (на глубине 10м), установленной в данном проекте на отметке минус 3,2 ОС, можно заключить, что не во всех частях площадки промерзание грунтов достигло запланированного уровня.

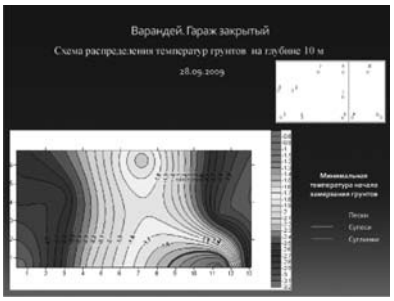
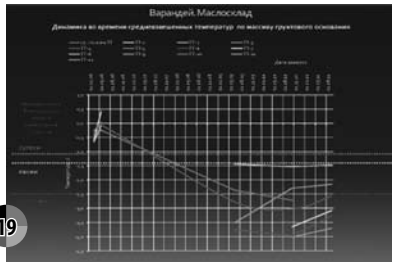


Рисунок 8 - Схема пространственного распределения температур грунтов на глубине 10м

Графики термоизоплет по каждой ТТ за весь период наблюдений. Уточнить ситуацию с процессом промерзания грунтов можно с помощью графиков термоизоплет, построенных для всех репрезентативных ТТ (рисунок 11, пример по скважине ТТ-9) за весь период наблюдений с марта 2006г. по сентябрь 2011г., совпадающий со временем работы систем ТСГ. Эти графики также в целом подтверждают тенденцию к понижению температур грунтов со временем в пределах рассматриваемой площадки, однако данные по разным ТТ значительно различа-



19

Рисунок 9 – Графики средневзвешенных температур по массиву грунтового основания

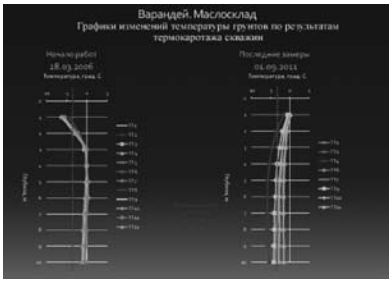


Рисунок 10 – Графики изменений температуры грунтов по результатам термокаротажа скважин

ются. Так, запроектированная температура грунтов на глубине 10м - минус 3,2 ОС достигнута в скважинах №№ ТТ-3, ТТ-4, ТТ-7 и ТТ-9. В других скважинах промерзание грунтов идет с меньшим успехом.

Температурные профили по ряду скважин. Температурные профили по скважинам ТТ-4, ТТ-9, ТТ-11 (рисунки 12, 13) представляют ситуацию на начальный и современный периоды работы систем ТСГ и проведения термометрических наблюдений, соответственно 28.03.2006г. и 01.09.2011г. Если на первом графике отмечается высокотемпературная грунтовая толща с преобладающими температурами на глубинах 3-10м от минус 0,5 до 0ОС и несколько выше, то на втором графике в скважинах ТТ-4, ТТ-6, ТТ-9 фиксируются мерзлые грунты с устойчивыми температурами до минус 4,2 ОС. В скважинах ТТ-1, ТТ-11 на глубине 10м породы промерзли пока до минус 1,6 ОС.

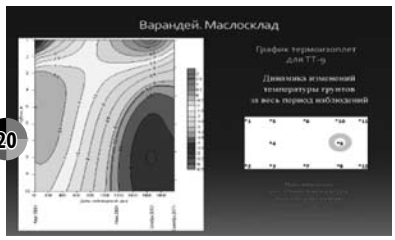
Схемы пространственного распределения температур грунтов по глубине. На этих схемах пространственного распределения температур грунтов по глубинам 2, 4, 6, 8 и 10м (рисунок 14, пример по глубине 10м), сделанных по термометрическим данным на 01.09.2011г., отмечается заметное понижение температур с глубиной. В центральной части площадки сформировалась толща мерзлых грунтов, охватывающая на глубине 10м участки в районе скважин ТТ-4, ТТ-7, ТТ-9 с температурами от минус 3,5 до минус 4,2 ОС. В периферических частях площадки (скважины ТТ-1, ТТ-2, ТТ-6, ТТ-10, ТТ-11) грунты пока не промерзли до максимальной расчетной температуры под концом свай (минус 3,2 ОС). На глубине 2м температуры грунтов составили от минус 0,6 до минус 1,9 ОС, что также не соответствует запроектированной максимальной расчетной среднегодовой температуре на уровне укладки систем ТСГ (минус 4,0 ОС).

В целом, анализ результатов термометрического мониторинга грунтов основания исследуемого объекта, представленных в графическом виде, показал, что за время наблюдений на данной площадке идет непрерывный процесс промерзания грунтов основания, закономерно замедляющийся в теплый период и ускоряющийся в холодный период года с трендом, направленным в сторону понижения температур грунтов, что однозначно свидетельствует об эффективной работе здесь систем температурной стабилизации грунтов, произведенных и смонтированных ООО НПО «ФундаментСтройАркос». Однако, необходимо обратить дополнительное внимание на периферическую часть площадки (скважины ТТ-1, ТТ-2, ТТ-6, ТТ-10, ТТ-11), где промерзание грунтов пока не достигло запланированного уровня (минус 3,2 ОС на глубине 10м). Причина может заключаться в недостаточно эффективной работе систем ТСГ и некачественной теплоизоляции грунтов в этих частях площадки, влиянии внешних источников дополнительного тепла.

Представленный набор графических и картографических средств отображения мониторинговых данных в достаточно полной мере характеризует температурное поле массива грунтового основания. Температурные профили по выбранным ТТ вскрывают это поле по вертикальным «срезам», схемы распределения температур грунтов по глубинам – по горизонтальным «срезам». Графики термокаротажа и термоизоплет характеризуют динамику температурного поля в отдельных скважинах, средневзвешенных температур по массиву грунтового основания – общий тренд температурного поля массива грунтов. Включение графического анализа в программу ГТМ несомненно повысит оперативность и качество мониторинговых работ и, соответственно, эффективность работы систем ТСГ.

Помимо указанных выше мероприятий, входящих в программу ГТМ, в ООО НПО «Фундаментстройаркос» для решения мониторинговых задач привлекаются другие современные технологии, отличающиеся высокой эффективностью и технологичностью, дистанционностью действий.

Для успешного осуществления ГТМ, особенно при применении данных проводящихся в пред-



20

Рисунок 11 – График термоизоплет для скважины ТТ-9

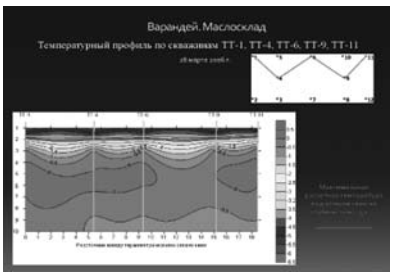


Рисунок 12 – Температурный профиль по скважинам ТТ-1, ТТ-4, ТТ-6, ТТ-9, ТТ-11 (на 28.05.2006г.)

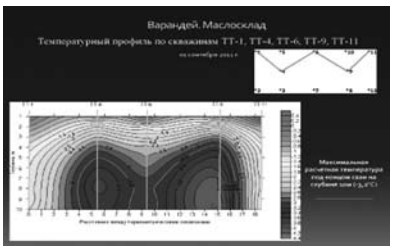


Рисунок 13 – Температурный профиль по скважинам ТТ-1, ТТ-4, ТТ-6, ТТ-9, ТТ-11 (на 01.09.2011г.)

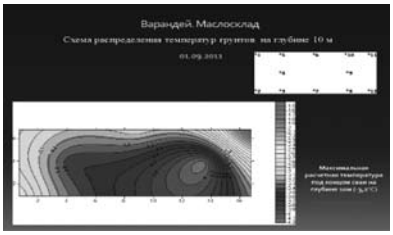


Рисунок 14 - Схема пространственного распределения температур грунтов на глубине 10м

строительный период инженерных изысканий, большое значе¬ние имеет использование материалов топографических, аэрофото- и космических съемок. По материалам разновременных съемок можно оценить изменение размеров очагов загрязнения территории, тенденции развития и затухания опасных геокриологических процессов, де¬формации различных сооружений — магистральных трубопрово¬дов, земляного полотна железных и автомобильных дорог, пере¬работки берегов водохранилищ и др. При этом на современном уровне обработки космо- и аэрофотоматериалов можно получить данные не только на уровне контурного дешифрирования, но и в количественном виде [8].

Впервые в 2010г. для целей тепловизионной диагностики систем ТСГ на научно-производственном полигоне НИО ООО НПО «Фундаментстройаркос» был испытан компьютерный тепловизионный комплекс тепловизор-термограф ИРТИС-2000. Проводилась тепловизионная съемка индивидуальных термостабилизаторов «ТК», конденсаторных частей «СОУ» и конденсаторного блока системы «ВЕТ». Первые тепловизионные обследования систем ТСГ (системы «ГЕТ», «ВЕТ», «ТК») в промышленных масштабах осуществили сотрудники ООО НПО «Фундаментстройаркос» на Ванкорском месторождении в феврале 2011 г. В процессе промышленных испытаний был выявлен ряд преимуществ тепловизионной диагностики систем ТСГ:

• Дистанционность - во время тепловизионной съемки можно одновременно снимать несколько термостабилизаторов, блоков конденсации, производить панорамные тепловизионные снимки значительных по размерам объектов, в том числе в труднодоступных и малопроходимых местах. Это способствует высокой производительности исследований, экономии времени;

• Информативность - тепловизор дает возможность получать полную картину тепловых полей на исследуемых объектах, что позволяет с достаточной точностью судить о работоспособности системы ТСГ. Программный комплекс IRPreview, поставляемый вместе с тепловизором, позволяет получить температуру в любой точке термограммы и строить термопрофили и гистограммы;

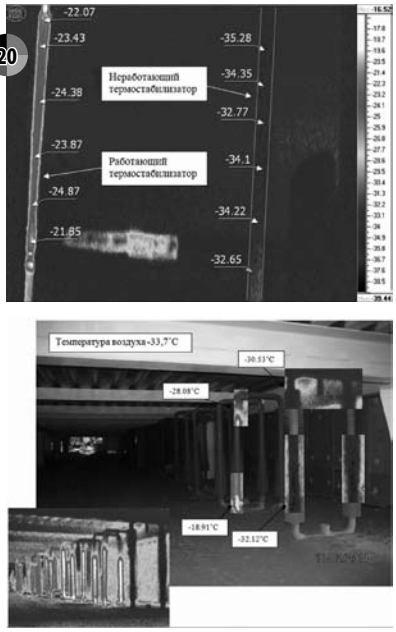


Рисунок 15 - Термограммы индивидуальных «СОУ» [23]

• Точность - она составляет 0,05ºС, что выше требуемой по ГОСТ 25358-82 [10];

Таким образом, тепловизионная съемка относится к неразрушающим бесконтактным методам контроля систем ТСГ и производится без непосредственного контакта с исследуемым объектом [22].

Из недостатков тепловизионной диагностики следует отметить высокую чувствительность к погодным условиям, связанную с отражательной способностью объектов. Так съемку можно проводить только в темное время суток или в пасмурную погоду, чтобы исключить влияние энергии солнечного излучения, которая при отражении вносит погрешность в измерения. Негативное воздействие на результаты обследования оказывают также туман, сильный снегопад или дождь, а также источники теплового излучения искусственного происхождения [23].

На основании полученного опыта по экспериментальным испытаниям и успешному внедрению в производство тепловизионной диагностики систем ТСГ в ООО НПО «Фундаментстройаркос» разработаны «Методические указания по диагностике работоспособности систем и устройств термостабилизации грунтов», где отражены порядок работ по тепловизионной диагностике, указаны требования, предъявляемые к персоналу и приборному обеспечению данного вида работ, и отчетные формы документов (рисунок 15).

Перспективным направлением для включения в программы проведения ГТМ представляется использование георадаров - приборов, основанных на направлении электромагнитной волны короткой продолжительности в многослойные среды, приеме и преобразовании отраженного сигнала. Они работают при температуре от минус 40 до плюс 40 ºС. Приборы компактные и не отличаются большой массой (1,5-15 кг). Имеют высокую производительность при записи среды в полевых условиях (от 5 до 30 км за смену), однако требуют продолжительной обработки в камеральных условиях (до смены на 500-1000 м разреза). Также георадары требуют заверочных буровых работ или шурфования. В настоящее время георадары достаточно широко применяются при обследованиях зданий и инженерных сооружений, автомобильных дорог, взлетно-посадочных полос и перронов аэродромов, плотин и гидроузлов, при разведке и оценке запасов строительных материалов в карьерах, инженерно-геологических изысканиях, археологических исследованиях и т. д. [24]. Потенциал неразрушающих, высокопроизводительных, экологически чистых георадарных методов для использования при проведении ГТМ несомненен.

Список литературы

1. Экологический энциклопедический словарь. – М.: Издательский дом «Ноосфера», 2000. – 930 с.
2. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений / Международная конференция: « Криогенные ресурсы полярных и горных регионов», 21-24 апреля 2008, Тюмень, с. 34-39.
3. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Кинцлер Ю.Э. Практический опыт строительства оснований зданий и сооружений в условиях ВМГ. – Тюмень: ООО НПО «Фундаментстройаркос», 2002.
4. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Осокин А.Б. и др. Современная технология строительства оснований и фундаментов на многолетнемерзлых породах с применением парожидкостных охлаждающих установок / Материалы третьей конференции геокриологов России. Том 4. – М.: Изд-во МГУ, 2005.
5. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Стоянов С.А., Залесский К.В. Опыт проектирования, монтажа и эксплуатации систем температурной стабилизации грунтов оснований «ГЕТ» объектов Ванкорского месторождения / Материалы четвертой конференции геокриологов России, 7-9 июня 2011, Том 3. – М.: Университетская книга, 2011, с.273-279.
6. Стрижков С.Н. Стратегия инновационного развития, строительства и освоения территорий в криолитозоне /Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», 19-20 апреля 2011, Тюмень, с. 12-32.
7. Волкова Е.В. Анализ геокриологического мониторинга систем температурной стабилизации грунтов оснований в районах Крайнего Севера /Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», 19-20 апреля 2011, Тюмень, с. 12-32.
8. Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 685 с.
9. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2005. – 52 с.
10. ГОСТ 25358-82. Грунты. Метод полевого определения температуры.
11. Многозонный цифровой датчик температуры МЦДТ 0922. Паспорт МКСН.405226.001 ПС.
12. Портативный контроллер цифровых датчиков ПКЦД-1/16. Паспорт МКСН.405544.006 ПС.
13. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах рапространения многолетнемерзлых грунтов. - М., 1999.
14. ВСН 61-89. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты. – М.: ЦНИИС Минтрансстроя СССР, 1990.
15. Рекомендации по инженерно-геокриологическим изысканиям для строительства мостов и труб на вечномерзлых грунтах севера Тюменской области, включая Ямал. М.: ЦНИИС Минтрансстроя СССР, 1988.
16. Рекомендации по наблюдению за состоянием грунтов оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на вечномерзлых грунтах. – М.: НИИОСП им. Н.М.Герсеванова Госстроя СССР, 1982.
17. СТО Газпром 2-3.1-072-2006. Регламент на проведение геотехнического мониторинга объектов газового комплекса в криолитозоне. – М., 2006.
18. СТО Газпром 2-2.1-435-2010. Проектирование оснований, фундаментов, инженерной защиты и мониторинга объектов ОАО «Газпром» в условиях Крайнего Севера. – М., 2010.
19. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами.
20. СТО ФСА 03.-3.1-044-2009. Технологический регламент выполнения спецмонтажных работ по пуску в эксплуатацию систем «ГЕТ» и «ВЕТ» в основаниях зданий и сооружений.
21. Рекомендации по определению прочности мерзлых грунтов с морским типом засоления. – М.: ФГУП ПНИИИС, 2001.
22. Цивилий С.В. Разработка методики тепловизионной диагностики систем термостабилизации на основе натурных испытаний на полигоне /Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», 19-20 апреля 2011, Тюмень, с. 75-81.
23. Загребнев А.С. Внедрение тепловизионных исследований систем термостабилизации грунта на Ванкорском месторождении /Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», 19-20 апреля 2011, Тюмень, с. 53-61.
24. Кулижников А.М., Белозеров А.А. Неразрушающие георадарные методы в инженерных изысканиях. – ООО «Логические системы», 2008.

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕРМОЭРОЗИОННО-ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ОВРАГООБРАЗОВАНИЯ В ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КРИОЛИТОЗОНЫ

А.В. Быкова[1], С.А. Лобастова[2]

[1]Газпром добыча Ямбург, г. Новый Уренгой, e-mail: A_Bykova@ygd.gazprom.ru
[2]Башкирский государственный университет, г. Уфа, e-mail: S_Lobastova@mail.ru

Работа посвящена изучению термоэрозионно-эрозионных процессов и оврагообразования (ТЭПО) в природно-технических системах криолитозоны. Разработаны и апробированы новые методы мониторинга параметров ТЭПО для овражных систем Ямбургского месторождения. Исследованы геофизические и гидрофизические характеристики для природного участка водосбора, техносферы и собственно оврага. Произведена оценка опасности по параметрам стока. Разработана модель ТЭПО с учетом годовой цикличности гидрофизических и геофизических факторов.

Разработка методов геотехнического мониторинга склоновых процессов криолитозоны является актуальной проблемой для предприятий нефтегазового комплекса Крайнего севера. В природно-технических системах (ПТС) ведущими процессами деструктивного техногенеза являются термоэрозионно-эрозионные процессы и оврагообразование.

Исследования проведены в 2008-2011гг. для ООО «Газпром добыча Ямбург» при выполнении проектной документации «Ликвидации оврагообразования в районе УКПГ-1В Ямбургского НГКМ» и последующего мониторинга объектов проектирования [1].

В данной работе геотехнический мониторинг склоновых процессов криолитозоны (ГМ СПК) рассматривается в аспекте системы комплексного наблюдения, контроля, оценки опасности и прогноза ТЭПО с целью управления состоянием ПТС для обеспечения устойчивости природных систем и техносферы. Организация полевых наблюдений ТЭПО производится группами методов различного уровня сложности. Практическую значимость имеют инженерно-геологические изыскания, включающие геофизические и гидрофизические исследования, топографическую съемку. Для контроля морфометрических параметров удобен метод разбива временных гидростворов. Геотехнический мониторинг СПК включает информационно-аналитическую систему (ИАС) с целью оптимизации обработки результатов наблюдений и повышения качества исходной информации для прогноза и управления ТЭПО Специализированные базы данных количественных показателей в динамике и программы прогноза являются содержанием ИАС.

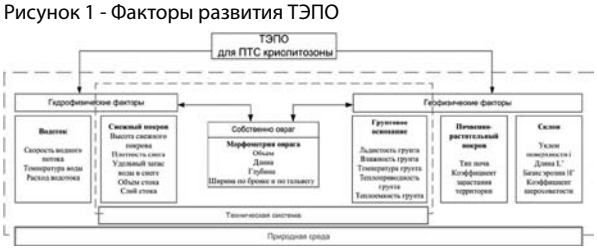
Район проведения исследований. Территория Ямбургского месторождения расположена в Надымском и Тазовском районах Ямало-Ненецкого автономного округа, в северной части Западно-Сибирской равнины, в пределах зоны тундры подзоны субарктических тундр. Климат района обусловлен неравномерным поступлением в течение года солнечной радиации, атмосферной циркуляцией и близостью Карского моря. Основные характеристики представлены в табл.1.

В мерзлотном отношении район расположен в Западно-Тазовской мерзлотной области, в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород с небольшими надмерзлотными таликами. Мощность мерзлых пород составляет 300 - 400 м. Зона нулевых годовых колебаний температур зафиксирована в интервале 7.0-10.0 м. Температуры грунтов на глубине нулевых амплитуд:-0,5°С -3,5°С. Сезонно талый слой (СТС) представлен песками, супесями, торфом; мощностью 1-3,2 м.

Таблица 1- Основные характеристики климата

Температура воздуха	Климатические характеристики Ямбургского месторождения	
	среднегодовая	-7,8 °С
	средняя в январе - феврале	-25 °С
	средняя в июле-августе	+11 °С + 14°С
	число дней в году с температурой ниже 0°С	240 - 260 суток
	период установления устойчивых заморозков	3 декада сентября – 1 декада октября
Сведения об осадках	среднегодовое количество осадков	350-390 мм
	число дней с осадками в том числе, в безморозный период	177 – 242 суток 78 суток
Состояние снежного покрова	период установления снежного покрова	2 - 3 декада октября
	средняя высота снега по полевому маршруту	56 см
	средняя высота снега по профилю оврага	78 см
	запас воды в снеге (по состоянию на апрель)	19 см
	начало периода снеготаяния	1 – 2 декада мая
	окончание периода снеготаяния	3 декада мая – 1 декада
	продолжительность снеготаяния	20 – 25 суток
	коэффициент интенсивности снеготаяния	2,6 см/сутки

Рисунок 1 - Факторы развития ТЭПО



Организация ГМ СПК в реальном времени базируется на цикличности и многофакторности ТЭПО (рис.1). Методы геотехнического мониторинга склоновых процессов в ПТС криолитозоны представлены в табл.2. В соответствии с факторами развития ТЭПО в годовом цикле разработан и оптимизирован комплекс наблюдений, включающий в себя: инженерно-геологическое обследование; линейные измерения параметров ТЭПО; снегомерные, гео- и гидро- температурные наблюдения, камеральную обработку, расчеты, оценку опасности и прогноз. Схема организации мониторинга на примере оврага к кусту газовых скважин 614 представлена на рис. 2.

1. Линейные измерения морфометрических параметров овражных систем производятся в 1-2 декаде июля (фиксируются изменения, произошедшие с оврагами в период весеннего

Таблица 2 - Методы контроля, оценки, опасности и прогноза ТЭПО в ПТС

Методы	Приборная база	Измерения	Расчет параметров	Методы оценки и прогноза
1.Линейные измерения по методу гидростворов	Мерные ленты, реперы опорных точек по дну и бровкам оврага. Портативный gps-навигатор.	Морфометрические параметры оврага: длина по тальвегу, ширина, ширина дна, глубина.	Объем нарушений, коэффициент годового прироста.	Методика локального количественного прогноза. Логистические модели прогноза.
2.Снегомерные наблюдения	Снегомерные рейки; плотномер весовой.	Высота и плотность снежного покрова,	Запас воды, расход в снеготаяние	Оценка опасности по удельному расходу
3.Температурные измерения Гео- Гидро-	Термометрические скважины, термометры, мерзлотный щуп	Мощность СТС, температура грунтов, воздуха, водотока, границ раздела сред.	Тепловые поля гидро- и геосреды, градиенты по вертикали и горизонтали	Оценка опасности по энергии водотока, соотношение тепловой и механической энергий

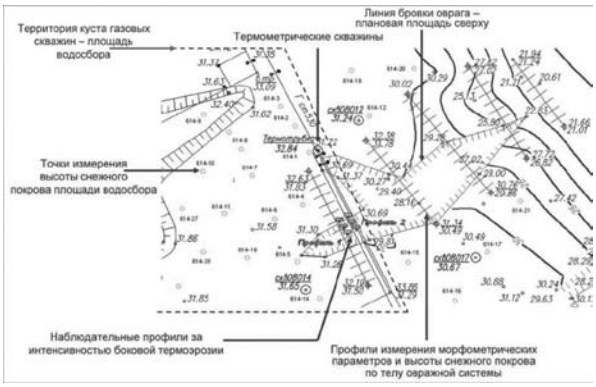
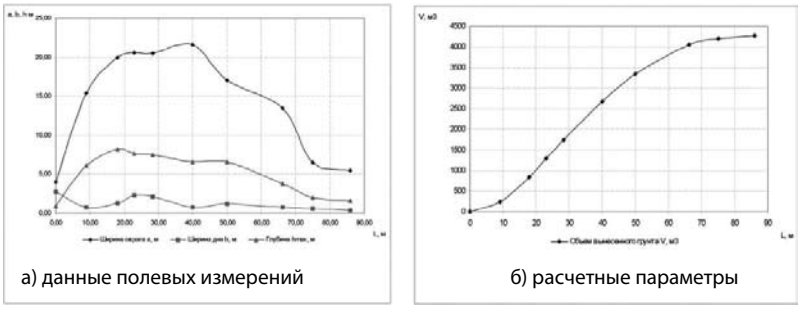
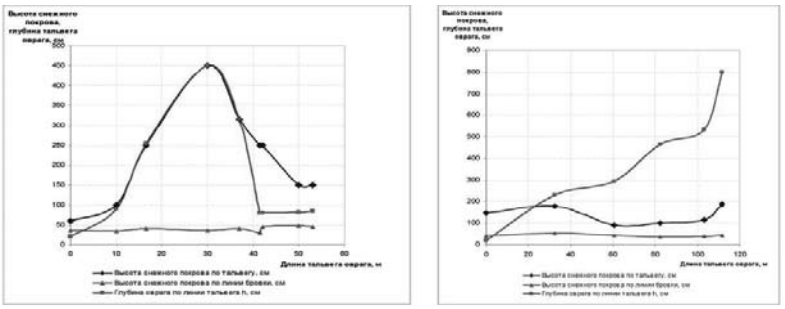


Рисунок 2 - Организация сети геотехнического мониторинга склоновых процессов



а) данные полевых измерений б) расчетные параметры

Рисунок 3 - Морфометрические параметры объекта №2а



а) Овраг № 2 к КГС 117В б) Овраг №2а

Рисунок 4 - Распределение снежного покрова для объектов наблюдения

снеготаяния); в 3 декаде августа – 1 декаде сентября. В качестве характеристик мониторинга и прогноза ТЭПО были выбраны морфометрические параметры овражных систем; измерения выполнялись методом разбива гидростворов. Измерения производятся с помощью мерных лент, закрепляемых на реперы опорных точек по дну и бровкам овражной системы [2]. Опорные точки выбираются с шагом, величина которого зависит от длины оврагообразования.

Результаты полевых измерений: длина по тальвегу, ширина, ширина дна, глубина оврага, по которым рассчитываются объем нарушенного грунта V и коэффициент его годового прироста, представляются в базе данных в численном и графическом виде (рис.3).

2. Снегомерные наблюдения и методика определения гидрофизических параметров стока. Снегомерные наблюдения для ТЭПО в ПТС проведены впервые в апреле 2009г. Высота и плотность снежного покрова измеряются первой декаде ноября и третьей декаде апреля согласно разработанной методике: по природной площади водосбора, площади водосбора, занятой техносферой, в овражной системе.

Распределение снежного покрова по телу овражных систем с различными типами накопления снега представляется в численном и графическом виде (рис.4.)

По значениям средней высоты снега и его плотности рассчитывается запас воды в снеге S (см), слой стока воды H (см); объем стока воды W (м3) и расход воды в овраге.

В настоящее время существует два основных подхода, для определения деформации овражного русла. Первый основан на уравнении гидродинамики и предполагает нахождения расхода наносов как функции расхода жидкости через овраг. Второй основан на расчете донной допустимой неразмывающей скорости и предполагает нахождение скорости потока как функции расхода водотока через овраг.

Таким образом, гидрофизической характеристикой в динамике ТЭПО является расход воды в период снеготаяния .

Расчет гидрофизических параметров. По значениям средней высоты снега и его плотности рассчитывается запас воды в снеге S (см), слой стока воды H (см); объем стока воды W ($м^3$) и объем воды в овраге. Запас воды в снеге - это количество граммов воды на 1 $см^2$ поверхности снега с высотой h в точке измерения. Запас воды в снеге для элементов водосборной площади и в овраге находим как:

$$S_{пр} = (\rho_{пр} \cdot h_{пр}), \quad S_{тех} = (\rho_{тех} \cdot h_{тех}), \quad S_{ов} = (\rho_{ов} \cdot h_{ов}), \qquad (2.1)$$

где $\rho^{пр}$, $h_{пр}$ – плотность (г/$см^3$) и высота снежного покрова на природной площади водосбора; $\rho_{тех}$,$h_{тех}$ –для техносферы и $\rho_{ов}$,$h_{ов}$ – овражной системы.

Слой стока H определяется по эмпирической формуле (2.2), которая вычислена путем натурных наблюдений центрального Ямала [4].

$$H = 0.57(S + x) + 13 \qquad (2.2)$$

S – запас воды в снеге, см; x – количество жидких осадков, см.

В нашем случае, для весенней термоэрозии x=0, тогда слой стока для элементов площади водосбора будет иметь вид:

$H_{пр} = 0.57 \cdot S_{пр} + 13,\ H_{тех} = 0.57 \cdot S_{тех} + 13$ (2.3)

$H_{пр}$, $H_{тех}$ – слой стока для природной площади водосбора и для техносферы, см.

Объем стока W (см^3) с площади водосбора:

$W = (F_{пр} \cdot H_{пр}) + (F_{тех} \cdot H_{тех})$, (2.4)

где $F_{пр}$, $F_{тех}$ – природная площадь водосбора и площадь техносферы, м2;.

Объем воды в овраге рассчитаем следующим образом:

$$V_в = \frac{\rho_{сн}}{\rho_в}.V_{сн} \quad (2.5)$$

$V_в$ - объем снега в овраге, см^3, $\rho_{сн}$ – плотность снега в овраге, ρв - плотность воды, г/см^3.

Усредненный за период снеготаяния расход воды находим по формуле (2.6):

$$\overline{Q} = \frac{W + V_в}{t} \quad (2.6)$$

где W- объем стока с площади водосбора, см3, t - среднестатистический период снеготаяния, здесь в т.ч. включает время снеготаяния в овраге.

Основные гидрофизические характеристики рассчитаны для природного участка водосбора, техносферы и собственно оврага (рис.5). В совокупности это позволяет оценить вклад соответствующих водотоков в динамику ТЭПО.

3.Температурные измерения. Геотемпературные наблюдения для ТЭПО проводятся с апреля 2010 года. Значительная высота снега на участках техносферы и по руслу овражных систем в условиях криолитозоны оказывает отепляющее воздействие на грунты основания и способствует образованию участков «несливающейся мерзлоты». Формирование неоднородности температурного поля грунтов овражных систем приводит, к интенсификации ТЭПО в долгосрочной перспективе развития. С целью изучения влияния данного фактора проводятся режимные геотемпературные наблюдения. Температуры грунтов основания, слагающих овражные системы, измеряются четыре раза в климатический год; результаты наблюдений представляются в численном и графическом виде. Термометрические скважины располагаются вдоль бровок, в днищах оврагов, а также на ненарушенных участках водосборной площади овражных систем, что позволяет отследить динамику температур по всему участку исследований. Гидротемпературные наблюдения на природных объектах ТЭПО к настоящему времени не проводились, однако выполнены исследования на физических моделях термоэрозии. В лабораторных экспериментах определены количественные соотношения тепловой и механической энергий водотока, имеющие нелинейный характер с увеличением температуры водотока от 0°С до 15°С.

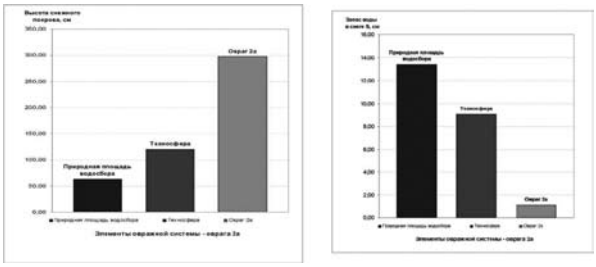


Рисунок 5 - Средняя высота снега и объем стока для объекта 2а по природной площади водосбора, техносферы и собственно оврага

Оценка опасности ТЭПО в ПТС по гидрофизическим параметрам. Модель ТЭПО с учетом годовой цикличности гидрофизических и геофизических факторов разработана на основе многолетних исследований[1,2,4,5] и качественно изображена на рис. 6. Годичный цикл ТЭПО включает все четыре климатических сезона. Гидрофизические факторы обеспечивают водоток, несущий тепловую и механическую энергию на склон. Геофизические факторы – это процессная среда ТЭПО. На временные перемещения границы раздела гидро- и геосред, существенной характеристикой ТЭПО, влияние оказывают многочисленные факторы, представленные на рис.1.

Выделены следующие периоды внутри годового цикла по гидрофизическим и гидрологическим параметрам склоновых процессов.

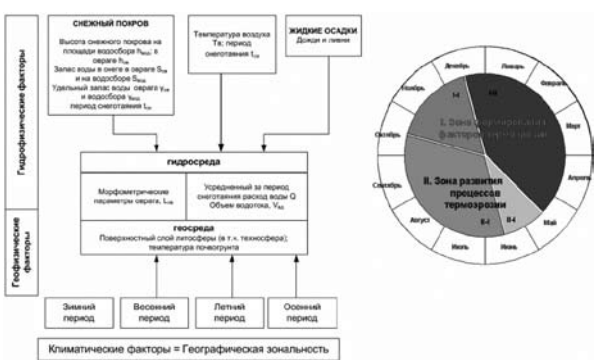


Рисунок 6 - ТЭПО с учетом годовой цикличности гидрофизических и геофизических факторов.

I. Зона формирования факторов ТЭПО:

I-I. Осенний: дождевой и снеговой сток, эрозионный, термоэрозионно-эрозионный и термоэрозионный размывы; промерзание-протаивание СТС поверхностей водосборных площадей, грунтов откосов и днища оврагов; обрушение талых блоков с откосов. I-II. Зимний: накопление и формирование снежного покрова на площади природного водосбора, техносферы, в оврагах; промерзание СТС поверхностей водосборных площадей, откосов и днища оврагов; морозобойное трещинообразование в прибровочной зоне оврагов.

II. Зона формирования развития ТЭПО:

II-I. Весенний: снеготаяние, весенний сток с водосборов, концентрация водотока по тальвегу овражного русла при таянии снега; термоэрозионный и предельно-термоэрозионный размывы; образование трещин оседания вдоль бортов; солифлюкционные процессы оползания мерзлых блоков с откосов. II-II. Летний: дождевой и ливневый сток, размывы термоэрозионно-эрозионный и эрозионный; протаивание СТС поверхностей водосборных площадей, откосов и днища оврагов; обрушение откосов оврагов, расширение за счет боковой эрозии; термокарст в днище оврагов при наличии ледяных включений.

Интенсивность протекания процессов определяется факторами термоэрозионной опасности, формирующимися в осенний и зимний периоды годового цикла. Активизация ТЭП и оврагообразования в ПТС происходит в весенний, летний и осенний периоды за 42 % от общегодового времени в районе исследований.

Вклад ТЭП в оврагообразование определяется механизмом концентрации водотока по тальвегу овражного русла. Запас воды в снеге и объем стока на элементах водосборной площади формируют основной источник водотока в период снеготаяния. Расчеты гидрофизических параметров по данным снегомерных наблюдений на примере семи исследованных объектов ТЭПО показали значительное превышение высоты снежного покрова по оврагу в сравнении с водосборной площадью, $h_{ов} > h_{в}$. Образуется $\Delta h_{доп} = h_{ов} - h_{в}$ – превышающая высота снежного покрова, которая обеспечивает дополнительный запас воды по телу оврага $\Delta S_{доп}$ и увеличивает период снеготаяния на время Δtдоп. При этом дополнительный слой стока идет по тальвегу оврага, площадь которого в десятки меньше площади оврага по бровке.

Следует учесть, что период основного снеготаяния для водосбора около 26 суток, из них снеготаяние на овраге происходит по окончанию схода снега с водосбора. Средний период дополнительного снеготаяние $\Delta t_{доп.}$ может составлять 20-30% к основному. По отношению площади тальвега оврага удельный запас воды в $\Delta t_{доп.}$ примерно в 50 раз превысит удельный запас воды с водосбора.

Данные температурных наблюдений свидетельствуют о том, что на участках с высотой снежного покрова свыше 100 см формируются участки деградации многолетнемерзлых пород; для участков овражных систем средняя высота снежного покрова составляет от 150 до 300-400 см. Неоднородность температурного поля грунтов основания овражных систем снижает потери тепловой энергии и увеличивают концентрацию водотока на участках с высокими температурами грунтов.

Для овражных систем в активной стадии развития, когда площадь тальвега мала, вклад гидрофизических параметров собственно оврага в развитие термоэрозионных процессов превышает вклад водотока с площади водосбора в 100-150 раз. Кроме того, вследствие неравномерности накопления снежного покрова по телу оврага, в овражной системе образуются участки концентрации стока, которые характеризуются значительной толщиной СТС и высокими температурами грунтов основания. Именно эти участки и обеспечивают прирост овражной системы в летний период.

Отметим также значительное влияние снегонакопления и увеличения объема стока за счет техносферы при отсутствии необходимых мер по переотложению и вывозу снега коэффициент снегозапасов увеличивается в среднем на 40%.

Список литературы

1. Реконструкция и техперевооружение объектов Ямбургского НГКМ. 2-й этап реконструкции. Ликвидация оврагообразования в районе УКПГ-1В// БашГУ. Отчет по теме №47-08, кн.1-5.- Уфа, 2009.

2. Лобастова С.А. Методы защиты от оврагообразования на севере Западной Сибири/ дисс. на соискание ученой степени к.т.н. - Уфа, 1989.-274 с.

3. Снег. /под ред. Д.М.Грея и Д.Х. Мейла. Перевод с анг. В.М. Котляков. Л.: Гидрометеоиздат, 1986.-752 с.

4. Эрозионные процессы Центрального Ямала. гл. 11.Овражная эрозия /под ред. А.Ю. Сидорчука, А.В. Баранова.-СПб, 1999 .- 349 с.

5. Познанин В.Л. Механизм овражной термоэрозии /диссертация на соискание ученой степени д.г.н. - М.: 1997.

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ, БИОЛОГИЧЕСКОЙ, ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛАНДШАФТОВ НА ПРИМЕРЕ ЛЕСОТУНДРОВОГО НАДЫМ-ПУРОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Р.В. Сорокин

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г.Тюмень

Рассмотрены литогенетические, геохимические, биологические аспекты устойчивости ландшафтов лесотундровой зоны (на примере Надым-Пуровского междуречья), применены современные методики их определения различных авторов.

Топливно-энергетический комплекс является ведущей отраслью хозяйственной деятельности на территории Западной Сибири. Его развитию способствуют значительные запасы углеводородного сырья, выгодное экономико-географическое положение, накопленный десятилетиями кадровый и технологический потенциал. Нефтегазовые предприятия определяют социальную и экономическую политику региона [1]. Воздействие нефтегазового освоения на территории носит комплексный характер, затрагивает все компоненты ландшафта. Оценка устойчивости природно-территориальных комплексов (ПТК) к антропогенному воздействию – является актуальной задачей инженерно-экологических и инженерно-геологических исследований.

ММП на территории лесотундровой зоны – наиболее динамичный и неустойчивый компонент экосистем [2]. Их состояние определяет интенсивность активизации экзогенных геологических процессов (термокарста, термоэрозии, солифлюкции, пучения и др.). С этим фактором тесно связана стабильность эксплуатации инженерных сооружений [3]. Экологические проблемы сопряжены также с выбросами в атмосферный воздух от факельных установок, выпадение кислотных дождей, угнетение напочвенного покрова (деградация оленьих пастбищ). Скорости разложения углеводородов в условиях лесотундры крайне малы.

Для оценки устойчивости ландшафтных комплексов, производимой для конкретной территории необходим широкий спектр информации, о состоянии динамике, особенностях функционирования природной среды. В качестве этого источника выступает ландшафтно-экологическая карта исследуемой территории. Ландшафтно-экологические карты строятся в соответствии с выбранной и адаптированной для данной территории системой классификации ландшафтных комплексов, необходимой для решения комплекса оценочных, инвентаризационных, рекомендательных, прогнозных задач. Основными таксономическими единицами выбранной схемы классификации являются: класс ландшафта (равнинный), подкласс (низменных равнин), тип ландшафта (лесотундровый), подтип ландшафта (южнолесотундровый), циклы и серии развития геосистем, типы местности, виды урочищ.

Являясь целостным структурно-функциональным образованием, ПТК как операционные территориальные единицы эколого-географического анализа, выступают как носители разнообразной информацией, пригодной для экологической оценки, в том числе и оценки устойчивости.

Оценка устойчивости ПТК. К понятию устойчивость в физико-географической литературе не выработалось единого толкования. Так, по мнению В.С Преображенского, устойчивость – не свойство природной среды, а способность ее не терять и хорошо выполнять свою социально-экономическую функцию [4]. В работах М.А. Глазовской устойчивость ландшафта определяется как способность к сохранению нормального функционирования путем самоочищения от продуктов техногенеза [5]. По мнению Л.И. Зотовой под устойчивостью понимается способность противостоять техногенной активизации экзогенных геологических процессов [6].

Каждый природный комплекс, обладая специфическим экологическим потенциалом, в различной степени реагирует на антропогенные воздействия. Что определяется, прежде всего, устойчивостью (литогенетической, геохимической, биологической и др.) к нагрузкам различного типа.

Устойчивость является внутренним свойством геосистем и тесно связана со сложностью их организации, прежде всего морфологической. Данное обстоятельство позволяет рассматривать классификацию и картографирование ландшафтов как путь к определению устойчивости геосистем [7].

Методы и приемы определения устойчивости ПТК. Для исследуемой территории определение литогенетической устойчивости является ключевым моментом оценки устойчивости ландшафтов, так как в пределах исследуемой территории широко распространены ММП. В данной разделе приведена методика оценки мерзлотно-экологического состояния геосистем Л.И. Зотовой [6]. Литокриогенное состояние оценивалось последовательно. Сначала было выбрано 7 параметров экологической опасности типичных для данного региона, изменение которых провоцирует активизацию криогенных процессов: (см. табл. 1).

Далее проводилась их калибровка по определенной шкале градаций, где степень влияния каждого фактора на потенциальную активизацию криогенных процессов оценивается в баллах от 1 до 3-х (см. табл. 1).

Таблица 1 – Шкала влияния мерзлотно-экологических параметров на возрастание потенциальной опасности хозяйственного освоения (по Зотовой, 2007)

№ п/п	Параметры ПТК	Оценка влияния в баллах		
		1 (слабо влияет)	2 (влияет)	3 (сильно влияет)
1	T, Температура грунтов, °С	<-5	-3…-5	0…-2,5
2	W, Объемная льдистость (доли ед.)	Малольдистые <0,2 (пески)	Среднельдистые 0,2-0,6	Высокольдистые >0,6 (торф >1,5 м)
3	P, Протекторные свойства растительного покрова	Отсутствуют или слабые (кустарничково-мохово-лишайниковый покров)	Хорошие (кустарничково-моховый и осоково-сфагновый покровы)	Максимальные (мохово-травяной покров)
4	S, Увеличение СТС после нарушений	Без изменений или до 20% (торф)	На 20-30% (пылеватые пески; оторфованные пески; пески/супеси)	Больше чем на 30% 9пески0
5	V, Скорость восстановления растительного покрова, лет	Быстрая менее 2-3	Средняя 5-7	Медленная более 10-15
6	R, Размываемость почвогрунтов	Слабая (пески)	Средняя (пески, супеси, оторфованные, торф)	Повышенная (пылеватые пески)
7	D, Степень расчленения и дренаж	Сильно расчлененные, дренированные	Слабодренированные, периодической смены увлажнения	Слаборасчлененны е и переувлажненные

Выяснилось, что из всех 7 параметров наибольшие коэффициенты корреляции с КМУ, значит и наибольшее влияние на потенциальную активизацию криогенных процессов, оказывают: льдистость грунтов, протекторные свойства растительного покрова и скорость его восстановления. Обратную зависимость имеет среднегодовая температура грунтов и глубина протаивания. Параметр, отражающий изменение глубины протаивания, оказался незначим в общей оценке.

На следующем этапе каждому природному комплексу (более 130 видов урочищ) присваивался экспертный балл и назначался коэффициент мерзлотной устойчивости (КМУ) – расчетный безразмерный показатель, изменяющийся от нуля до единицы. Чем больше его значение, тем ниже литокриогенная устойчивость геосистем и больше вероятность активизации криогенных процессов (см. формулу 1).

Формула 1 – Формула расчета коэффициента мерзлотной устойчивости (по Зотовой, 2007)

КМУ = -0,608-0,042T+0,084W+0,085P+0,236V+0,179R+0,019D

Ранжирование ПТК по значению КМУ происходило по четырем степеням уязвимости к освоению. Результаты проведенного расчета свидетельствуют, что ПТК типов местности бугристых торфяников и линейно-грядового являются наиболее неустойчивыми к механическому воздействию. Для лесотундровых и тундровых типов местности характерен меньший риск освоения (отнесены к категории малоустойчивых и среднеустойчивых). ПТК типов местностей: низинных плоскокочковатых болот, пойм средних порядков, мелкодолинного, приуслово-припроточного, центрально-пойменного и притеррасового – имеют наиболее низкие показатели КМУ, отнесены к категории устойчивых и среднеустойчивых.



Рисунок 1 – Диаграмма площадного распространения ПТК исследуемой территории по категориям литогенетической устойчивости

В целом в пределах исследуемой территории доминируют ландшафтные комплексы, характеризующиеся средней степенью устойчивости, на долю неустойчивых в литогенетическом отношении ПТК приходится около четверти площади территории западной части лесотундрового Надым-Пуровского междуречья (см. рис.1).

Пространственным выражением результатов проведенного расчета является карта литогенетической устойчивости ПТК западной части лесотундрового Надым-Пуровского междуречья, фрагмент которой представлен на рисунке 2.

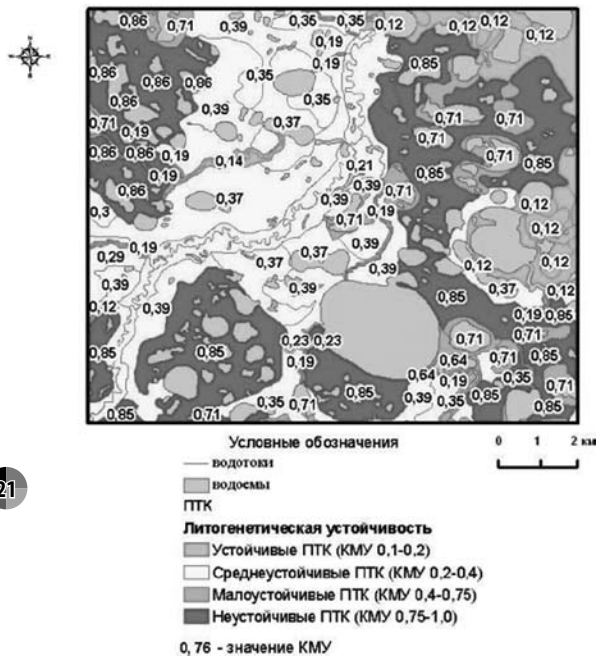


Рисунок 2 – Фрагмент карты литогенетической устойчивости ПТК исследуемой территории

При определении г**еохимической устойчивости** выделяются три основные группы природных показателей, контролирующих устойчивость нормального функционирования ландшафтов и составляющих их компонентов: а) факторы, определяющие интенсивность выноса и рассеивания продуктов техногенеза; б) факторы, определяющие интенсивность трансформации и разложения поллютантов; в) определяющие возможность и интенсивность закрепления продуктов техногенеза и их метаболитов (наличие, емкость геохимических барьеров) [8, 9]. Ведущие геохимические процессы территории обусловлены длительностью сезонного промерзания, развитием процессов заболачивания, механическим составом почвогрунтов, сочетанием водозастойного и промывного водных режимов почв, кислой реакцией почв. При определении параметров **геохимической устойчивости** в качестве основы использовались работы ряда ученых: Глазовской, Вильчека, Васильевской и др.

Под **биологической устойчивостью** экосистем подразумевается способность

Таблица 2 – Параметры устойчивости ландшафтных комплексов (экосистем) к техногенному воздействию (по Вильчеку, 1995)

№ п/п	Параметры Устойчивости	Характеристика параметра	Оценка устойчивости (в баллах)	
			Геохимическая	Биологическая
1	Потенциал самовозобновления растительности (лет)	Минимальный (более 100)	0	0
		крайне низкий (31-100)	1	0
		низкий (21-30)	1	1
		средний (6-20)	2	2
		высокий (3-5)	3	3
2	Проективное покрытие растительностью (%)	полное (100-50)	3	3
		достаточное (50-25)	2	2
		недостаточное (25-12,5)	1	1
		крайне недостаточное (12,5-6,25)	0	0
		непокрытое (< 6,25)	0	0
3	Интенсивность разложения растительных остатков	верховые сфагновые болота	0	1
		низинные осоково-травяные болота	1	3
		хвойные леса	2	1
		хвойно-мелколиственные леса	3	2
		мелколиственные травяные леса	4	2
		пойменные луга	5	3
4	Альбедо поверхности (в %)	высокое (15-25)	3	3
		среднее (10-15)	2	2
		низкое (5-10)	1	1
5	Почвообразующие породы	маломощные пески и супеси, подстилаемые суглинками, аллювиальные отложения	1	1
		торфа	2	2
		лёгкие суглинки, подстилаемые тяжелосуглинистыми отложениями	3	3
		тяжелосуглинистые и глинистые отложения	4	4
6	Тип почв	лесные	2	2
		луговые	1	1
		болотные	0	0
7	Механический состав почв	песчаные	1	0
		супесчаные	2	1
		легкосуглинистые	3	2
		среднесуглинистые	4	3
		тяжелосуглинистые	5	4
8	Тип водного режима почв	промывной	3	3
		промывной в сочетании с водозастойным	2	2
		водозастойный	1	1
9	Содержание гумуса в почве (%)	малогумусные (менее 4)	1	0
		среднегумусные (4-6)	2	0
		высокогумусные (7-10)	3	0
10	Кислотность почв (pH_{kcl})	сильнокислые и кислые (менее 4,5)	1	0
		среднекислые и слабокислые (4,6-5,5)	2	0
		близкие к нейтральным и нейтральные (более 5,6)	3	0
11	Степень насыщения почв основаниями (%)	высокая (более 60)	4	0
		средняя (40-60)	3	0
		низкая(20-40)	2	0
		очень низкая (менее 20)	1	0
12	Степень увлажнения	очень высокая	0	0
		высокая	1	1
		средняя	2	2
		низкая	3	3

почвенно-растительного покрова сохранять и восстанавливать структурную целостность и функциональные процессы. Биологическая устойчивость определяется структурой биогеоценозов, степенью дренированности и увлажнения, механическим составом почвогрунтов, объемом и продолжительностью механического воздействия.

В качестве параметров устойчивости учтены такие показатели, как почвообразующие породы, потенциал самовозобновления растительности, проективное покрытие растительностью, интенсивность разложения растительных остатков, отражательная способность (альбедо поверхности), тип почв, механический состав и тип водного режима почв, содержание гумуса, кислотность почв, степень насыщенности основаниями, степень увлажнения (см. табл. 2). Не последнее место в оценке занимало местоположение экосистем конкретного ландшафтного комплекса (урочища) в общей ландшафтно-экологической структуре.

Устойчивость экосистем, как биологическая, так и геохимическая определены на основе экспертных оценок в баллах (от 0 до 3 баллов в порядке усиления их роли в поддержании устойчивости) и носит относительный характер [10], т.е. система баллов по устойчивости выбирается непосредственно для каждой территории и каждого вида урочищ в отдельности.

В результате суммирования баллов покомпонентной оценки были получены определенные группы ландшафтных экосистем, имеющие различную степень устойчивости, исчисляемую от 0 до 3 баллов. За 3 балла принимается наибольший показатель устойчивости (по сумме высших оценок).

Степень биологической устойчивости экосистем определена следующим образом:

0 баллов – неустойчивые (сумма баллов 0-6);
1 балл – малоустойчивые (сумма баллов 7-12);
2 балла – относительно устойчивые (сумма баллов 13-18);
3 балла – устойчивые (сумма баллов 19-26).

По степени геохимической устойчивости различаются:
0 баллов – неустойчивые (сумма баллов 0-10);
1 балл – малоустойчивые (сумма баллов 11-20);
2 балла – относительно устойчивые (сумма баллов 21-30);
3 балла – устойчивые (сумма баллов 31-41).

Природные комплексы рассматриваемой территории по критериям геохимической и биологической устойчивости, в основном, относятся к категории **относительно устойчивых и малоустойчивых** по способности к самовосстановлению и способности противостоять внешним воздействиям.

К категории **малоустойчивых** отнесены урочища древних торфяников. Строительство на этих участках может вызвать резкую активизацию таких процессов и явлений, как эрозия, солифлюкция, оползни, термокарст и просадка грунта.

Слабоустойчивыми являются также пятнисто-медальонные тундры. Нарушение почвенно-растительного покрова и изменение температурного режима грунтов на этих поверхностях может привести к протаиванию многолетнемерзлых пород и активизации таких процессов, как термокарст и заболачивание. Низкую устойчивость имеют и урочища торфяно-минеральных бугров пучения.

Хорошо дренированные поверхности, занятые лиственничными редколесьями относятся к категории **относительно устойчивых**. Тем не менее, нарушение почвенно-растительного покрова на них может спровоцировать развитие процесса эоловой дефляции.

Результаты оценочных исследований ландшафтов являются концептуальной основой темати-

ческих ландшафтно-экологических карт, используемых при принятии управленческих решений по проведению природопользования, при разработке мероприятий по оптимизации ПТК, разработке прогноза экологического состояния ландшафтов.

Степень ландшафтно-экологического разнообразия и защитные функции, устойчивость ландшафта используются в качестве нормативных ограничений природопользования, что позволяет корректно обосновывать пространственные и уровневые пределы нагрузок и категории охраны систем.

Список литературы:

1. Нефтедобыча и проблемы окружающей среды в России. Роль Всемирного банка и Европейского банка реконструкции и развития. – Киев, 2001 – 72 с.
2. Ершов Э.Д. Криолитогенез. М.: Недра, 1982. 211 с.
3. Ермилов О.М., Грива Г.И., Москвин В.И. Воздействие объектов газовой промышленности на северные экосистемы и экологическая стабильность геотехнических комплексов в криолитозоне. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2002. – 148 с.
4. Преображенский В.С. Проблемы изучения устойчивости геосистем// Устойчивость геосистем.- М.: Наука, 1983. - С. 4-7
5. Глазовская М.А. Ландшафтно-геохимические системы и их устойчивость к техногенезу// Биогеохимические циклы. М.: Наука, 1975. С. 22 – 27.
6. Зотова Л.И. Оценка мерзлотно-экологического состояния геосистем Ямбургского газоконденсатного месторождения. Материалы Третьей Общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: ОАО ПНИИИС. 2007. – С.137-141.
7. Козин В.В., Маршинин А.В., Марьинских Д.М., Осипов А.В., Сорокин Р.В. Ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования в нефтегазопромысловых районах Западной Сибири (на примере Надым-Пур-Тазовского междуречья) / Вестник Тюменского государственного университета №3 2008. С. 200-215
8. Глазовская М.А. Способность окружающей среды к самоочищению // Природа, 1979. N3. С.71-79.
9. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.
10. Вильчек Г.Е. Устойчивость тундровых экосистем и прогнозирование последствий их антропогенной трансформации // Известия РАН. Сер. Географическая, 1995. – № 3. – С. 59-69.

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ ЭТАЛОНОВ РОССИИ: СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

В.А. Никоненко

ОАО НПП «Эталон», 644009, г. Омск, ул.Лермонтова, 175, тел.: (3812) 36-84-00

Рассмотрены мероприятия по обеспечению единства измерений температуры, теплопроводности, поверхностной плотности тепловых потоков.

В связи с интенсивным внедрением новых наукоемких технологий, актуальность опережающего развития измерительных и калибровочных возможностей стало требованием времени [1].

Национальный институт стандартов и технологии (NIST) США подготовил доклад, содержащий оценку системы измерения в США, сдерживающих ускорение разработки, внедрения инноваций и повышение конкурентоспособности США на мировом рынке современных технологий. Выделены 11 основных направлений, по которым остро ощущается потребность в инновациях и в упреждающем развитии методологии и техники измерений, а также нормативно-технической базы.

Результаты оценки сводятся к трем обобщающим и основополагающим положениям:

- основным препятствием на пути инноваций практически во всех сферах экономики, медицины, здравоохранения, обороны, экологии в США по-прежнему остается недостаточная точность различных методов и средств измерения;
- практически во всех новых технологиях сдерживающим фактором является отсутствие точных и достаточно чувствительных датчиков различных величин, необходимых для реализации мониторинга процессов в реальном масштабе времени и создания систем управления технологическими процессами;
- отсутствие стандартов, эталонов, подходящих систем единиц, протоколов для оценки качества создаваемых технологий, включая недостаточные совместимость и взаимодействие программного и аппаратного обеспечения устройств управления разрабатываемых технических средств, также служит нередко непреодолимым барьером для инноваций во многих развивающихся технологиях.

Отсюда следует, что отставание в различных видах измерений сдерживают инновации виртуально во многих секторах экономики.

Что сделано нами и что уже можем использовать.

В феврале 2008 года на заседании Коллегии Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии были утверждены новые эталоны: Государственный первичный эталон единицы температуры в диапазоне от 0 до 3000ºС, Государственный первичный эталон теплопроводности, Государственный первичный эталон поверхностной плотности тепловых потоков. Утверждались не только первичные эталоны, по сути дела были обновлены все схемы передачи размера единиц, т.е. были разработаны все необходимые рабочие эталоны поверочной схемы, в отдельных случаях даже разрабатывались специальные рабочие средства [2].

Хотелось обратить внимание на еще одну особенность эталонов - это их комплексность. Одновременно с первичными эталонами были разработаны вторичные государственные эталоны для передачи размера единиц и целый ряд рабочих средств измерений. Весь этот комплекс: и рабочие эталоны и, особенно, рабочие СИ — новые, абсолютно конкурентоспособны с зарубежными эталонами, а некоторые из них даже превосходят зарубежные по своим характеристикам.

Внедрение новых эталонов обеспечивает интеграцию экономики России в мировую экономику, а также решает одну из проблем вступления России во Всемирную торговую организацию в части метрологии.

Обеспечение единства измерений в термометрии.

Следует отметить, что в 1992 году в результате распада СССР Россия потеряла все производство рабочих средств измерения температуры (в СССР это была специализация за Львовским регионом Украины), ее метрологическое обеспечение (Украина и Казахстан).

Освободившуюся нишу в приборостроении средств измерения температуры мы начали занимать вместе с другими предприятиями конкурентами, а их более 10 не считая зарубежных.

Следует отметить, что в течение двух последних десятилетий наблюдается интенсивное развитие термометрии и ее метрологического обеспечения. Можно выделить два основных фактора, определяющих необходимость совершенствования государственных первичных эталонов, средств передачи единицы температуры и ее измерения:

1) постоянно растущие требования к точности измерений в науке и промышленности;

2) глобализация метрологии, целью которой является обеспечение взаимного доверия национальным эталонам и измерительным возможностям национальных метрологических институтов.

Как известно измерения температуры являются одним из наиболее востребованных в науке и промышленности видов измерений. Причем возрастает не только количество и номенклатура ис-



Рисунок 1 - Пирометры

пользуемых средств измерений температуры, но и неуклонно увеличиваются требования к точности измерений.

Значительный прогресс в развитии средств измерений температуры в последние два десятилетия достигнут преимущественно за счет развития электроники.

Измерительная информация о температуре необходима в любых разработках, осуществляемых на приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники. измерения сопротивления и напряжения позволили в значительной степени реализовать возможности термометров сопротивления и термопар. При этом, положительный эффект достигается также за счет статистической обработки результатов измерений и повышения точности расчета температуры по измеренным электрическим параметрам.

Развитие электроники послужило основой существенного прогресса в области радиационной термометрии измерительного тепловидения. Современные пирометры (рис.1) намного превосходят по своим метрологическим и эксплуатационным характеристикам радиационные термометры начала 90-х годов [3].

Важной проблемой развития системы метрологического обеспечения температурных измерений является совершенствование методов и средств передачи размера единицы температуры от эталона рабочим средствам измерений. Эта проблема включает в себя следующие задачи:

- оптимизация системы передачи размера единицы температуры от эталона
рабочим средствам измерений;
- совершенствование методов передачи размера единицы;
- совершенствование средств передачи размера единицы.

Прослеживаемость передачи размера единицы от эталона к рабочему средству измерений в нашей стране решается поверочной схемой для средств измерений, которая регламентирует порядок передачи единицы, методы и средства передачи (рис.2), а также их погрешности.

Поверочная схема, как и предшествующая, возглавляемая двумя государственными первичными эталонами, охватывает весь диапазон Международной температурной шкалы МТШ-90 и регламентирует передачу размера единицы температуры для всех существующих и перспективных средств измерений этой физической величины и обеспечивает точность передачи размера единицы, необходимую в настоящее время, а также точность, прогнозируемую на ближайшие 10-15 лет.

Это достигается:

- повышением точности передачи размера единицы температуры путем использования новых, более точных, технических средств;включением в поверочную схему цепей передачи размера единицы температуры с помощью перспективных технических средств, разработка которых еще ведется, но будет завершена в ближайшие годы;
- включением в поверочную схему цепей передачи размера единицы
- температуры для новых, высокоточных средств измерений, которых ранее не существовало.

Новыми, более точными средствами передачи размера единицы температуры являются:

- платино-палладиевые и золото-платиновые термопары, точность которых на
порядок выше точности используемых ранее платинородий-платиновые и платинородий-платинородиевые термопар;
- меры температуры, в качестве которых используются как аппаратура для
реализации температур фазовых переходов чистых веществ и различных эвтектических сплавов (металлических, органических), так и калибраторы температуры, использующиеся прецизионные термометры в качестве носителей температурной шкалы;
- новые излучатели «черное тело» и эталонные пирометры, используемые для передачи размера единицы температуры в области радиационной термометрии, рис. 3

Кроме того, новая поверочная схема допускает использование термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов в качестве образцовых средств низких разрядов, что позволяет снизить стоимость средств поверки без потери точности.

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» были разработаны следующие основополагающие стандарты системы передачи размера единицы температуры в диапазоне выше 0 °С:



Рисунок 2 - Средства измерения, воспроизведения и передачи единицы температуры

- ГОСТ Р 8.625-2006 «ГСИ. Термометры сопротивления из платины, меди и ни
келя. Общие технические требования и методы испытаний»;
- ГОСТ Р 8.624-2006 «ГСИ. Термометры сопротивления из



Рисунок 3 - Излучатели «черное тело»

платины, меди и никеля. Методика поверки»;

- ГОСТ Р 51233-98 «Термометры сопротивления платиновые эталонные 1-го и 2-го разрядов. Общие технические требования»;

- ГОСТ Р 8.571-98 «ГСИ. Термометры сопротивления платиновые эталонные 1-го и 2-го разрядов. Методика поверки»;

- ГОСТ 8.155-2001 «ГСИ. Лампы температурные эталонные (образцовые) 1 –го и 2-го разрядов для диапазона температур от 800 до 2800ºС. Методика метрологической аттестации и поверки.

- ГОСТ Р 8.619-2006 «ГСИ. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки».

Особо следует отметить, что с 1 января 2008 г. в Российской федерации введены в действие новые национальные стандарты ГОСТ Р 8.625-2006 и ГОСТ Р 8.624-2006, устанавливающие технические требования и методику поверки для рабочих термометров сопротивления (ТС). Сложность внедрения данных стандартов обусловлена тем, что в стандарте ГОСТ Р 8.624 появился термин «неопределенность измерений», который требует больших математических расчетов и более осмысленного применения, чем старый термин «погрешность измерений». Математические расчеты на современном уровне развития вычислительной техники не вызывают особых проблем, а наше мнение по выполнению требований ГОСТ Р 8.624 к поверочному оборудованию мы изложим ниже.

ГОСТ Р 8.624 формулирует требования как к отдельным видам средств поверки: п.6.3 эталонные термометры сопротивления, п.6.4 термостаты и калибраторы, п.6.5 аппаратура для реперных точек, п.6.6 измерительная аппаратура, так и ко всему комплексу поверочного оборудования – п.6.8.

Эти требования автоматически выполняются в программной среде АРМ ПТС (метрологический комплекс "Автоматизированное рабочее место для поверки термометров сопротивления").

Программа Автоматизированного рабочего места для поверки термометров сопротивления АРМ ПТС на основании информации о применяемом оборудовании автоматически рассчитывает расширенную неопределенность поверки ТС и учитывает это значение при присвоении класса допуска поверенным ТС согласно требованию п.10.3.5.

С помощью АРМ ПТС можно поверять ТС классов А, В, С и даже самого точного класса АА с выполнением требований нового стандарта ГОСТ Р 8.624 [4].

.На Омским ОАО НПП «Эталон» при участии сотрудников ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева» разработана и серийно выпускается практически вся номенклатура средств передачи размера единицы температуры (приложение 1), предусмотренных новой поверочной (приложение 2.3).

Серийный выпуск средств передачи размера единицы температуры отечественными предприятиями полностью решает проблему метрологического обеспечения температурных измерений в нашей стране.

За 15 лет создан инновационный комплекс средств воспроизведения единицы температуры (градус), ее передачу, измерения, преобразования, регулирования в диапазоне температур -200÷ 2500°С, решает проблему метрологического обеспечения измерений температуры в нашей стране в настоящее время и в перспективе на 10-15 лет, обеспечиваем передачу размера единицы с необходимой точностью.

Обеспечение единства измерений теплопроводности

ОАО НПП «Эталон» совместно с ВНИИМ им. Д.И, Менделеева ведет работы по разработке и выпуску рабочих средств измерения и метрологического оборудования для измерения и передачи единицы теплопроводности.

Потребность в измерении теплопроводности существует практически в любых областях науки и промышленности. Особую актуальность точные измерения теплопроводности имеют в строительстве и энергетике, металлургии и материаловедении, авиации и космонавтике, электронике и машиностроении. Точные измерения теплопроводности материалов широко используются в приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергетика и энергосбережение».

«Транспортные, авиационные и космические системы»..... Современная система обеспечения единства измерений теплопроводности сложилась в семидесятые годы прошлого века благодаря усилиям национальных метрологических институтов (НМИ) высокоразвитых стран: РТВ, ВНИИМ, ВНИИФТРИ, NIST, NPL, где были созданы прецизионные средства измерения (СИ) теплопроводности.

После распада СССР основные производители рабочих средств измерения РСИ теплопроводности оказались за границей и прекратили свое существование.

В настоящее время увеличивается число потребителей, которым необходимы рабочие средства измерений, по точностным характеристикам замыкающиеся непосредственно на государственный первичный эталон (ГПЭ) единицы теплопроводности. Преимущественно это относится к рабочим средствам измерений, обеспечивающим выполнение значительно повысившихся в последние годы требований по энергосбережению и теплозащите в высокотехнологичных отраслях промышленности. Прежде всего в строительстве и энергетики [5].

Введение большого числа новых энергосберегающих стандартов в строительстве обусловило

появление определенных проблем в работе сертификационных и испытательных центров. Необходимость технологического контроля и сертификации материалов по теплопроводности возникает при производстве и эксплуатации новых материалов различного назначения, а также при испытаниях на соответствие требованиям нормативных документов наиболее ответственных элементов сложных инженерных объектов, например, ограждающих конструкций зданий и сооружений [6]. Это особенно важно для материалов, теплопроводность которых является сертифицируемым параметром. Например, современные теплоизоляционные материалы, от которых зависит эффективность энергосбережения, имеют теплопроводность порядка 0,02 Вт/(м-К), что в 5 раз меньше нижней границы диапазона воспроизведения единицы теплопроводности, указанной в действующей государственной поверочной схеме.

Для обеспечения единства измерений теплопроводности в России в диапазоне до 0,02 Вт/(м-К) требуется воспроизводить единицу с суммарной стандартной неопределённостью, не превышающей 0,5 %, и передавать размер единицы прецизионным РСИ, гарантируя, что предел их относительной погрешности не превысит 3 %.



Рисунок 4 - Мера теплопроводности однозначная (МТО)

Государственный первичный эталон воспроизводит единицу и передаёт её размер в шести точках диапазона с помощью набора однозначных мер теплопроводности (МТО), рис. 4

О недостаточности существующего набора мер и о неравномерности их распределения по диапазону теплопроводности говорилось не один раз. Но увеличение числа точек воспроизведения единицы традиционными средствами представляет собой весьма длительную и дорогостоящую процедуру: с начала практических измерений теплопроводности (за 60 лет) в диапазоне от 0,03 до 20 Вт/(м-К) после исследований более 2000 материалов найдено всего 15-20 точек надёжного воспроизведения единицы.

Сравнивая современное состояние измерений теплопроводности, например, с термометрией, можно заметить, что в историческом аспекте оно соответствует времени до изобретения термостатов, когда температуру умели воспроизводить лишь в нескольких реперных точках.

В 2004 году, наконец, удалось изобрести, принципиально новый способ воспроизведения единицы теплопроводности в любой точке заданного диапазона, основанный на том, что некая система тел в определенных условиях с помощью управляющего воздействия приобретает любую заданную теплопроводность, автор д.т.н. Соколов Н.А. сотрудник ВНИИМ (патент 2276781 Б.И. от 20.05.2006). Впервые удалось создать новый класс средств измерения — многозначную меру теплопроводности Комплекс аппаратуры, необходимый для воспроизведения единицы с помощью меры теплопроводности многозначной МТМ, по аналогии с термостатом предложено называть теплостатом. Изобретение СИ нового класса позволило предложить новую концепцию воспроизведения единицы и передачи её размера.

Согласно новой концепции воспроизведение единицы и передача её размера осуществляется в любой точке диапазона от 0,02 до 0,2 Вт/(м-К) с помощью одной многозначной меры, изготовленной из хорошо изученного гомогенного материала - органического стекла. Предложенная концепция реализуется с помощью новой государственной поверочной схемы рис.5

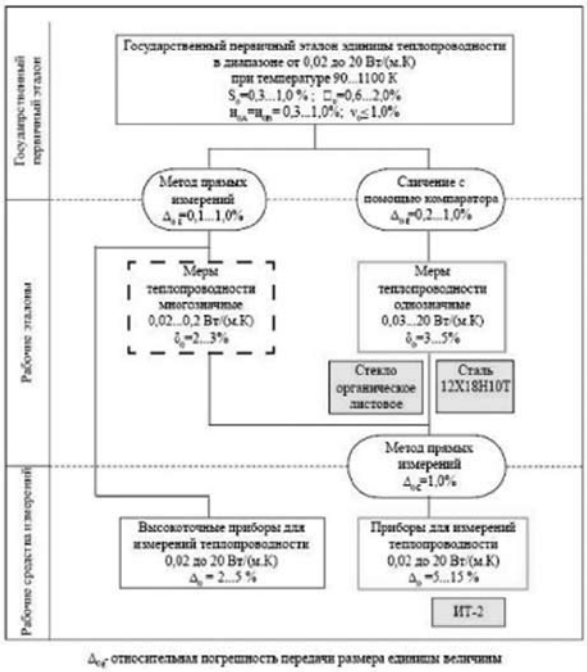


Рисунок 5 - Государственная поверочная схема теплопроводности

Она отличается от действующей поверочной схемы меньшим числом ступеней, что снижает потери точности при передаче размера единицы РСИ и отвечает современными СИ теплопроводности твёрдых тел в диапазоне от 0,02 до 20 Вт/(м-К) при температуре от 90 до 1100 К» высказались все 11 проголосовавших стран СНГ.

Размер единицы от первичного эталона передают рабочим эталонам методом прямых измерений или сличением с помощью компаратора, а также прецизионным РСИ методом прямых измерений.

В качестве рабочих эталонов применяют МТО и МТМ. Доверительные границы относительных погрешностей рабочих эталонов 50 при доверительной вероятности 0,95 составляют от 2 до 5 %. Рабочие эталоны применяют для поверки РСИ методом прямых измерений.



Рисунок 6 - Измеритель теплопроводности ИТ-2

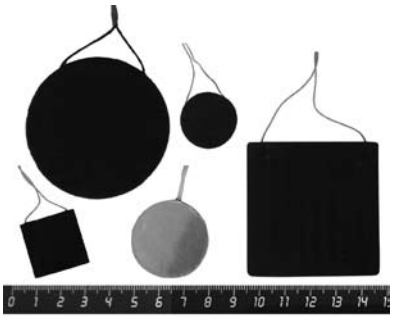


Рисунок 7 - Датчики теплового потока

В качестве РСИ применяют приборы для измерений теплопроводности твёрдых тел в диапазоне от 0,02 до20Вт/(м-К) при температуре от 90 до 1100 К. Пределы допускаемых основных относительных погрешностей РСИ Ао составляют от 2 до 15 %.

Новые РСИ производит ОАО НПП «Эталон» (Омск). Это, разработанный совместно с ВНИИМ первый в стране многоканальный измеритель теплопроводности ИТ-2, рис. 6

Специально под эту аппаратуру организовано более десяти новых центров испытаний ограждающих конструкций зданий и сооружений в Москве, С-Петербурге, Краснодаре, Нальчике с возможностью передавать размер единицы прецизионным РСИ непосредственно от первичного эталона.

Разработка СИ нового класса - теплостатов и многозначных мер теплопроводности - по¬зволила внедрить новую концепцию воспроизведения единицы и передачи её размера с помо¬щью многозначных мер теплопроводности, изготовленных из известных материалов, в любой точке диапазона от 0,02 до 0,2 Вт/(м-К).

Обеспечение единства измерений поверхностной плотности тепловых потоков.

Актуализацией в последние годы вопросов энергосбережения как общемировой проблемы и принятие в России закона «Об энергосбережении» привело к более широкому распространению и применению СИ теплового потока, т.е. появились потребности, а также необходимость повышения точности измерений.

Кроме этого необходимость измерений тепловых потоков в хозяйственном комплексе является фактором, влияющим на ход технологических процессов и дающим информацию о состоянии теплоэнергетических объектов.

Сфера применения ДТП теоретически неограничена, так как тепловой поток является одним из глобальных параметров всех протекающих тепловых процессов и явлений.

Поэтому контроль и измерение этих потоков представляет интерес для очень многих отраслей науки, техники и промышленности, но, прежде всего, для решения вопросов рационального использования энергетических ресурсов.

В качестве примера необходимости использования для этих целей рабочих средств измерений плотности теплового потока можно привести стандарт ИСО 8301: 1991 «Теплоизоляция. Определение термического сопротивления и связанных с ними теплофизических показателей. Прибор, оснащенный тепломером» и ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления». В этих документах предусматривается реализация методов, основанных на использовании контактных ДТП (тепломеров), погрешность которых не должна превышать 2-3 %, рис.7.

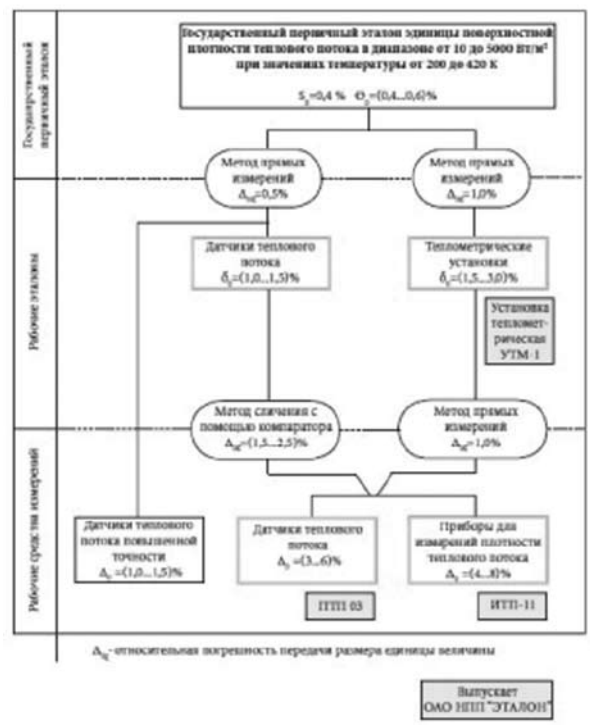


Рисунок 8 - Государственная поверочная схема плотности теплового потока

Существовавшая поверочная схема (МИ 1855-88) не обеспечивала выполнения такого требования.

Повышение точности измерений плотности тепловых потоков позволяет эффективно экономить тепловую энергию за счет получения достоверных данных об источниках тепловых потерь и их количественных значений.

Широкий выпуск преобразователей теплового потока требует создания современных средств их метрологического обеспечения, а также разработки полного набора нормативных документов, обеспечивающих их эксплуатацию и метрологическое обслуживание.

Новый эталон создан в ФГУП «СНИИМ» г.Новосибирск на базе существующей установка высшей точности УВТ с использованием наиболее апробированных технических решений (средства воспроизведения, хранения и передачи размера единицы).

В качестве рабочих средств измерений поверочная схема рис. 8 предусматривает использование датчиков теплового потока и приборов - измерителей теплового потока (комплекты, содержащие датчики и вторичные измерительные приборы).

В настоящее время ОАО НПП «Эталон» (г



Рисунок 9 - Установка теплометрическая УТМ-1

Омск) изготовлен опытный образец установки УТМ - 1, разработанной совместно с ФГУП «СНИИМ», рис. 9.

Она предназначена для поверки датчиков теплового потока различных форм и размеров. Установка предназначена для поверки датчиков теплового потока в диапазоне значений 50...2000Вт/м2 с относительной погрешностью передачи размера единицы (1,5...2,5)% при температуре от 20 до 150°С и соответствует государственному рабочему эталону. Установка находится сейчас в СНИИМ на испытаниях для целей утверждения типа. Кроме этого ОАО НПП «Эталон» (г. Омск) изготавливает рабочие средства измерений теплового потока - датчики и измерители теплового потока, которые планируется внести в Госреестр СИ.

Для развития обеспечения единства измерений необходимо провести утверждение типов преобразователей (датчиков) теплового потока, выпускаемых в настоящее время различными производителями. Необходимо также активизировать работы по созданию и утверждению типа соответствующих поверочных теплометрических установок.

Важным этапом работ, необходимых для широкого внедрения в измерительную практику контактных датчиков теплового потока, является разработка методик выполнения измерений этой физической величины на различных объектах измерения.

Заключение

Подводя итоги, можно сказать, что в России создан и внедрен комплекс современных эталонов, образцовых и рабочих средств измерений температуры, теплопроводности и тепловых потоков, что обеспечивает успешную интеграцию в современную Международную систему единства измерений. В статье использовались материалы работы вневедомственной комиссии по приемке эталонов, указанные приборы и оборудование соответствуют современным требованиям Государственных поверочных схем и позволяют полностью осуществлять метрологическое обеспечение по этим видам измерений.

Дальнейшее совершенствование метрологического обеспечения промышленности включает в себя много задач, наиболее реальными из которых представляются:

повышение точности измерения, передачи и поддержания размеров единицы в технологических процессах;

сокращение затрат времени на проведение поверки и калибровки, совершенствование методик поверки, возможное увеличение межповерочных интервалов;

переход на цифровой интерфейс систем управления, возможность создания простых в обслуживании систем регулирования и сигнализации;

разработка методической и технической документации, обеспечивающей оптимальное применение средств и методов измерения температуры, теплопроводности, тепловых потоков, расчеты точностных характеристик результатов измерений и контроля технологических процессов.

Список литературы

1. С.Ю. Золотаревский. Опыт NIST по изучению измерительных потребностей современных инновационных технологий. Законодательная и прикладная метрология. 2007. № 6

2. В.М. Лахов. Новые эталоны Российской Федерации. Интервью журналу Контрольно-измерительные приборы и системы. 2009. №6

В.А. Никоненко, А.И. Походун, М.С. Матвеев, Ю.А. Сильд. Метрологическое обеспечение в радиационной термометрии: проблемы и их решения. Приборы. 2008. № 10

3. Ю.В. Шевелев. Внедрение ГОСТ Р 8.624-2006 с использованием метрологического оборудования производства ОАО НПП «Эталон». Датчики и системы. 2008. №9 с.22-24.

4. Н.А. Соколов. Метрологическое обеспечение измерений теплопроводности, теплоизоляции материалов. СтройПрофиль. 2008. №3

5. Н.А. Соколов. Проблемы энергосбережения в зданиях и сооружениях. Светопрозрачные конструкции. СтройПрофиль. 2008. №2

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СИСТЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Е. В. Волкова

ООО НПО «Фундаментстройаркос», г. Тюмень

На Ванкорском месторождении для температурной стабилизации, замораживания талых и охлаждения пластично-мерзлых грунтов широко используются охлаждающие устройства различных производителей. В качестве примера рассматриваются объекты: Жилой вахтовый комплекс (ЖВК) на 850 человек и Парк хим. реагентов. На объекте ЖВК установлены термостабилизаторы (ТК) ООО НПО «Фундаментстройаркос», на объекте Парк хим. реагентов - стабилизаторы пластично-мерзлых грунтов (СПМГ) ФГУП ПИИ «Фундаментпроект». ТК и СПМГ установлены в проветриваемых подпольях под зданиями и резервуарами. В таблице 1 приведено количество ТК и СПМГ рассматриваемых объектов.

Таблица 1 - Количество ТК и СПМГ рассматриваемых объектов

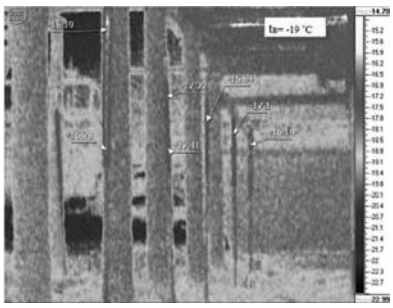
№	Наименование объекта	Кол-во ТК, СПМГ	Кол-во ТТ
	Жилой вахтовый комплекс на 850 человек (см. рис. 3) ТК смонтированы с июля по сентябрь 2010 г. Производитель – ООО НПО «Фундаментстройаркос»		
1	Корпус общежития №1 Поз. 1/1	122 ТК32/10	11 ТТ
2	Корпус общежития №2 Поз. 1/2	122 ТК32/10	11 ТТ
3	Корпус общежития №3 Поз. 1/3 (см. рис. 3)	122 ТК32/10	11 ТТ
4	Корпус общежития №4 Поз. 1/4 (см. рис. 5)	122 ТК32/10	11 ТТ
5	Корпус VIP гостиницы Поз. 1/5	122 ТК32/10	11 ТТ
6	Корпус офисных служб Поз. 1/6 (см. рис. 7)	122 ТК32/10	11 ТТ
7	Медпункт и баня Поз. 1/7	95 ТК32/10	7 ТТ
8	Главный корпус Поз. 1/8 (см. рис. 9)	179 ТК32/10	7 ТТ
	∑	1006 ТК	80 ТТ
	Парк хим. реагентов СПМГ смонтированы с июля по сентябрь 2010 г. Производитель – ФГУП ПИИ «Фундаментпроект»		
1	Парк химреагентов №1 Поз.66/1 (см. рис. 11)	442 СПМГ-38-13000	20 ТТ
2	Парк химреагентов №2 Поз.66/2 (см. рис. 13)	450 СПМГ-38-13000	20 ТТ
3	Парк химреагентов №3 Поз.66/3 (см. рис. 15)	548 СПМГ-38-13000 118 СПМГ-38-10000	6 ТТ
4	Парк химреагентов №4 Поз.67	220 СПМГ-38-13000 4 СПМГ-38-10000	4 ТТ
	∑	1782 СПМГ	50 ТТ

В феврале 2011 г. на Ванкорском месторождении специалисты ООО НПО «Фундаментстройаркос» выполнили обследование работоспособности охлаждающих устройств производства ООО НПО «Фундаментстройаркос» и ФГУП ПИИ «Фундаментпроект». Обследование проводилось с помощью метода тепловизионной диагностики с помощью тепловизора на основании разности температур между оребренной частью термостабилизатора и окружающим воздухом.

По результатам тепловизионной съемки при первоначально похожих условиях и технических решениях на объектах ЖВК на 850 человек и Парк хим. реагентов можно оценить совместную работу ТК, СПМГ и проветриваемых подполий (см. рис. 1).

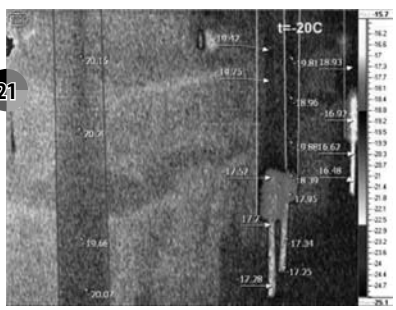
Из рисунка видно, что на ЖВК Поз. 1/3 в результате тепловизионной съемки было отснято 6 ТК и все оказались рабочими.

На объекте Парк хим. рагентов №2 поз.66/2 было отснято 4 СПМГ, из них 1 не работает и 3 частично работают. Результаты по тепловизионной съемке СПМГ на других позициях объекта Парк хим. реагентов также выявили большое количество частично неработающих СПМГ и несколько полностью неработающих СПМГ.





ВЖК на 850 человек Поз. 1.3



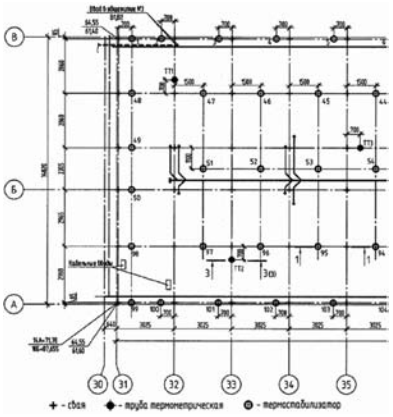


Парк хим. реагентов №2 Поз.66/2

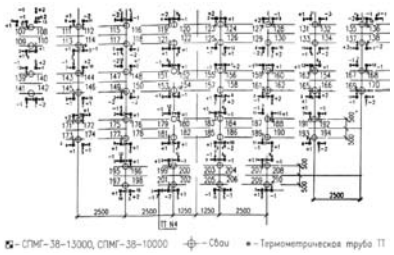
Рисунок 1 – Тепловизионная съемка на объектах ЖВК на 850 человек Поз. 1/3 и Парк хим. реагентов №2

Схемы расстановки термостабилизаторов марки ТК и СПМГ приведены на рисунке 2. Как видно из схем термостабилизаторы марки ТК установлены с шагом 3х3 метра, а термостабилизаторы марки СПМГ попарно у каждой сваи.

Для того чтобы показать как ТК и СПМГ совместно с проветриваемым подпольем произвели охлаждение грунтов оснований в течение зимнего периода 2010-2011 г., рассмотрим данные геокриологиче-



ЖВК на 850 человек Поз. 1/3



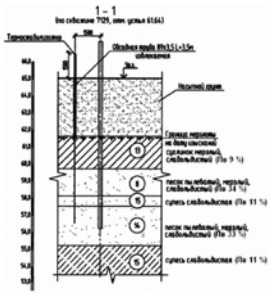
Парк хим. реагентов

Рисунок 2 – Схемы расстановки термостабилизаторов марки ТК и СПМГ на объектах ЖВК на 850 человек Поз. 1/3 и Парк хим. Реагентов



Рисунок 3 – Общий вид объекта «Жилой вахтовый комплекс на 850 человек»





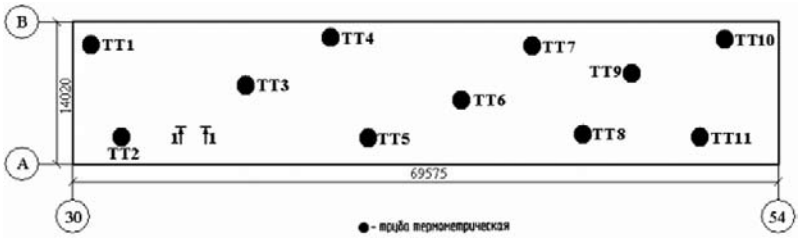


Рисунок 4 - Корпус общежития №3 Поз. 1/3 ЖВК на 850 человек фото, схема и разрез грунта

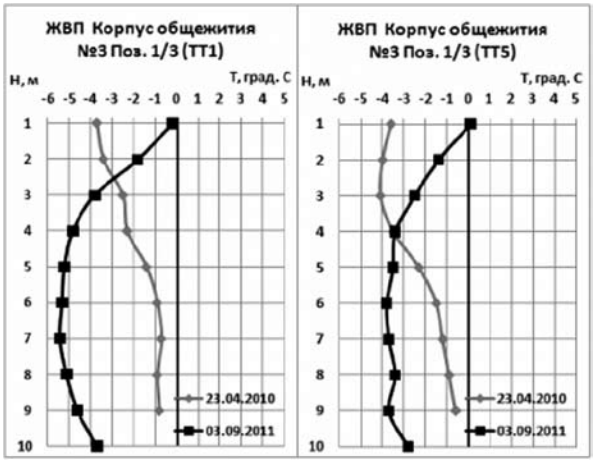


Рисунок 5 – Температуры грунтов оснований в термометрических трубах на объекте Корпус общежития №3 Поз. 1/3 ЖВК на 850 человек

ского мониторинга грунтов оснований нескольких объектов, приведенных в таблице 1.

На рис. 4 - 11 приведены фото объектов, схемы расположения термометрических труб, инженерно-геологические условия и значения температур грунтов оснований на начало и окончание замеров объектов ЖВК с установленными термостабилизаторами марки ТК.

На графиках приводятся только замеры температур грунтов по нескольким объектам ЖВК, т. к. температуры грунтов по другим объектам одинаковы по значениям. Полученные значения температурного режима грунтов основания объектов ЖВК подтверждают результаты тепловизионной съемки, свидетельствующие о работоспособности термостабилизаторов марки ТК. Из приведенных данных видно, что термостабилизаторы, работая в проектном режиме, совместно с проветриваемыми подпольями, произвели замораживание грунтов оснований всех рассматриваемых объектов, и температура грунтов на глубине с 4-го по 10-й метр понизилась на 2 - 4 градуса.

На рис. 12-17 приведены фото объектов, схемы расположения термометрических труб, инженерно-геологические условия и значения температур грунтов оснований на начало и окончание замеров объектов Парка хим. реагентов с термостабилизаторами марки СПМГ.

На графиках также приводится только несколько замеров, т. к. температуры грунтов в ТТ похожи по значениям почти на всех рассматриваемых объектах. Анализ полученных замеров температур грунтов показал, что можно выделить две группы значений температур. На объекте Парке хим. реагентов №1 Поз.66/1 в ТТ6 температура грунтов оснований с 4 по 10 метр понизилась примерно на 1 - 2 градуса, в ТТ14 на 2 - 3,5 градуса. На объекте Парке хим. реагентов №2 Поз.66/2 в ТТ1 температура грунтов оснований с 4 по 10 метр понизилась примерно на 1 - 2 градуса, в ТТ4



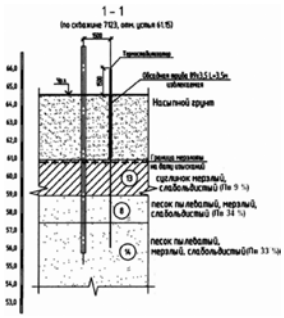


Рисунок 6 - Корпус общежития №4 Поз. 1/4 ЖВК на 850 человек: фото, схема и разрез грунта

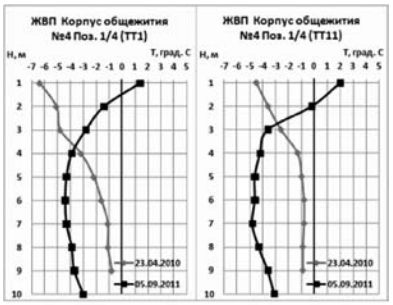


Рисунок 7 - Температура грунтов оснований в термометрических трубах на объекте Корпус общежития №4 Поз. 1/4 ЖВК на 850 человек

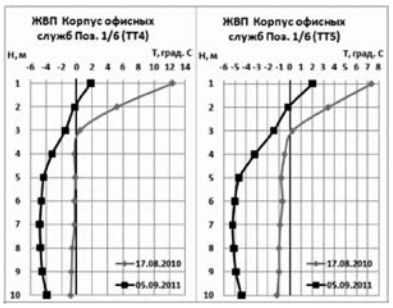


Рисунок 9 - Температура грунтов оснований в термометрических трубах на объекте Корпус общежития №4 Поз. 1/6 ЖВК на 850 человек



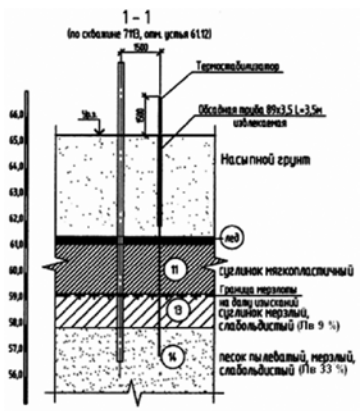


Рисунок 8 - Корпус офисных служб Поз. 1/6 ЖВК на 850 человек: фото, схема и разрез грунта

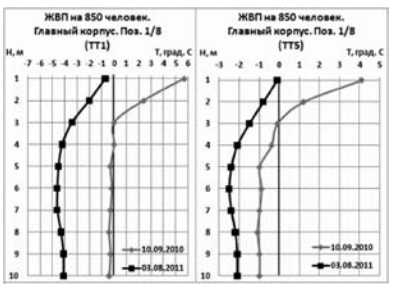
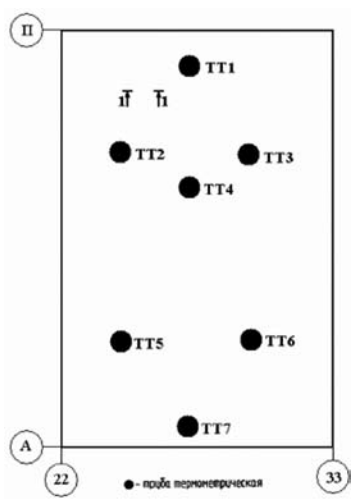


Рисунок 11 - Температура грунтов оснований в термометрических трубах на объекте Главный корпус Поз. 1/8 ЖВК на 850 человек





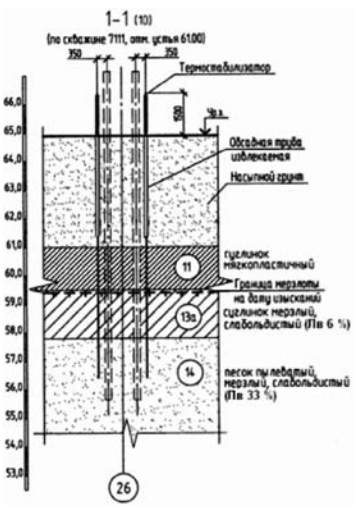
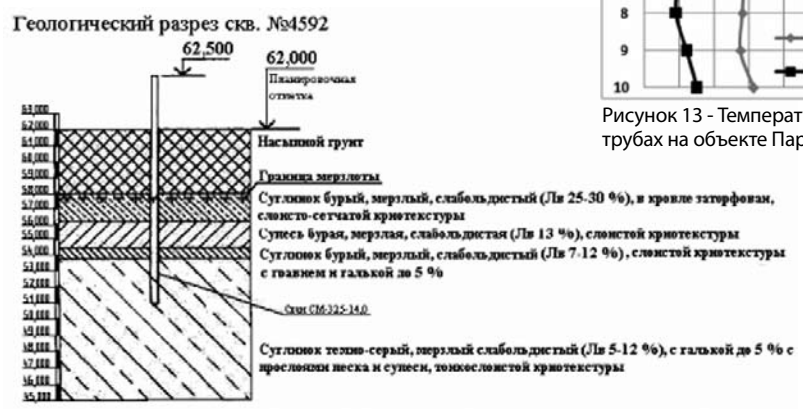


Рисунок 10 - Главный корпус Поз. 1/8 ЖВК на 850 человек: фото, схема и разрез грунта





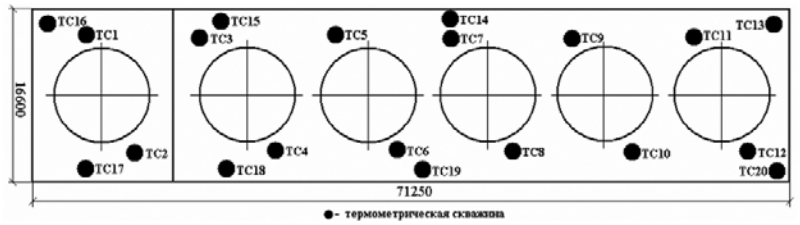


Рисунок 12 – «Парк хим. реагентов №1» Поз.66/1: фото, схема и разрез грунта

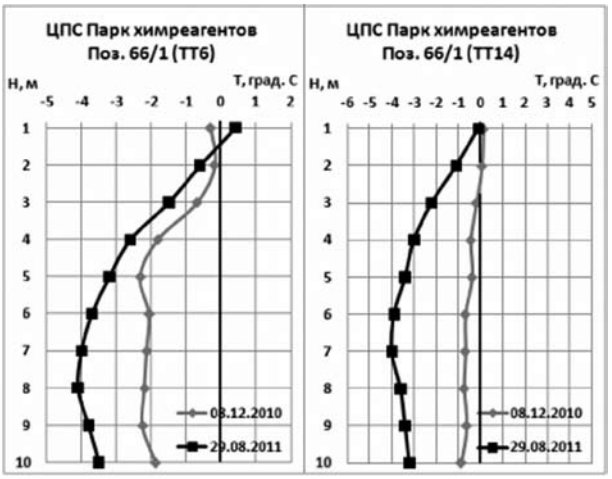


Рисунок 13 - Температура грунтов оснований в термометрических трубах на объекте Парк хим. реагентов №1 Поз.66/1

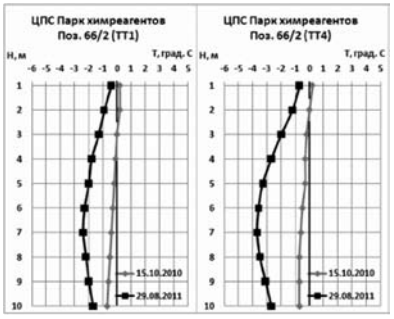


Рисунок 15 - Температура грунтов оснований в термометрических трубах на объекте Парк хим. реагентов №2 Поз.66/2





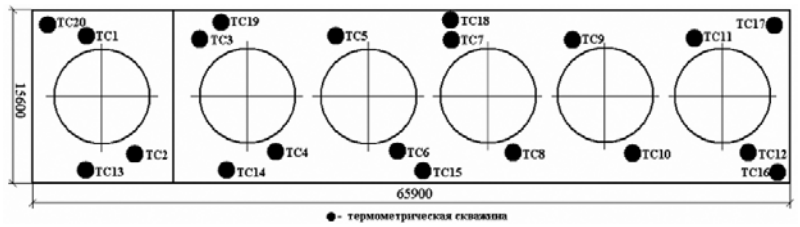


Рисунок 14 – «Парк хим. реагентов №2» Поз.66/2: фото, схема и разрез грунта

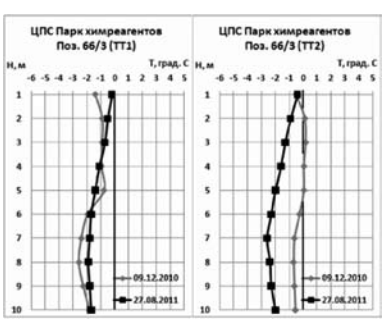
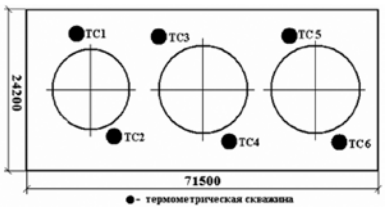


Рисунок 17 - Температура грунтов оснований в термометрических трубах на объекте Парк хим. реагентов №3 Поз.66/3





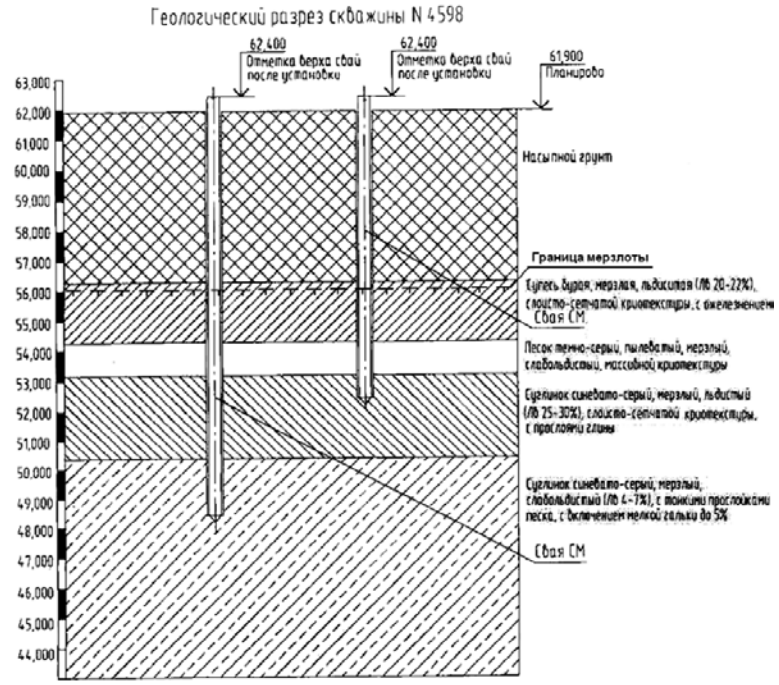


Рисунок 16 – «Парк хим. реагентов №3» Поз.66/3: фото, схема и разрез грунта

Таблица 2 - Усредненные данные замеров температур грунтов оснований

Дата измерения	ТТ1	ТТ2	ТТ3	ТТ4	ТТ5	ТТ6	ТТ7	ТТ8	ТТ9	ТТ10	ТТ11	Тер., °С	ΔТер., °С
Корпус общежития №3 Поз. 1/3													
23.04.2010	-1,4	-1,4	-0,9	-2,1	-2,0	-1,4	-1,6	-1,7	-1,8	-1,3	-1,4	-1,5	2,5
03.09.2011	-4,7	-4,5	-4,3	-3,6	-3,4	-3,7	-4,4	-4,0	-4,6	-3,6	-4,2	-4,1	
Корпус общежития №4 Поз. 1/4													
23.04.2010	-2,1	-1,1	-1,6	-1,8	-1,9	-2,1	-1,9	-1,8	-1,7	-1,7	-1,2	-1,7	1,9
05.09.2011	-3,8	-4,0	-3,4	-3,4	-3,5	-3,5	-3,6	-3,6	-3,5	-3,6	-4,1	-3,6	
Корпус офисных служб Поз. 1/6													
17.08.2010	-0,3	-0,9	-0,8	-0,4	-0,7	-1,0	-0,7	-1,1	-1,1	-1,2	-0,9	-0,8	3,1
05.09.2011	-3,5	-3,6	-4,1	-3,9	-4,2	-4,1	-4,0	-4,3	-4,4	-3,4	-3,6	-3,9	
Медпункт и баня Поз. 1/7													
12.09.2010	-0,9	-1,9	-1,9	-2,3	-2,1	-2,1	-1,8					-1,9	2,9
02.09.2011	-4,3	-4,4	-6,1	-5,4	-5,4	-3,2	-4,2					-4,7	
Главный корпус Поз. 1/8													
10.09.2010	-0,2	-0,2	-0,9	-0,5	-0,8	-1,3	-1,3					-0,7	2,8
03.09.2011	-3,0	-1,9	-3,7	-3,6	-4,6	-4,3	-4,0					-3,6	
Парк хим. реагентов №1 Поз.66/1													
08.12.2010		-2,4	-2,2	-1,4		-1,9	-1,5	-0,7	-3,5		-3,4	-2,1	1,7
29.08.2011		-3,7	-3,8	-3,6		-3,3	-3,5	-3,3	-3,9		-5,3	-3,8	
Парк хим. реагентов №1 Поз.66/2													
15.10.2010	-0,4	-0,4	-0,3	-0,5								-0,4	2,3
29.08.2011	-2,0	-2,1	-3,4	-3,1								-2,7	
Парк хим. реагентов №1 Поз.66/3													
09.12.2010	-1,7	-0,3										-1	0,8
27.08.2011	-1,5	-2,1										-1,8	

на 2 - 3 градуса. На объекте Парке хим. реагентов №3 Поз.66/3 в ТТ1 температура грунтов оснований с 4 по 10 метр не понизилась, в ТТ2 понизилась на 1 - 2 градуса. Из приведенных данных видно, что СПМГ произвели охлаждение грунтов, но не во всех ТТ.

Усредненные данные замеров температур грунтов оснований рассматриваемых объектов на начало и конец измерений, полученных в ТТ с 3 по 10 м приведены в таблице 2.

В результате анализа полученных данных по температурам грунтов рассматриваемых объектов, приведенных в таблице 2, можно сделать вывод о том, что термостабилизаторы марки ТК понизили температуру грунтов в среднем на 2,6 °С, а термостабилизаторы марки СПМГ в среднем на 1,5 °С.

Для того чтобы сравнить удельную эффективность работы термостабилизаторов на этих объектах рассмотрим количество термостабилизаторов, установленных на 100 кв. метров в таблице 3.

Таким образом, из сравнения полученных данных, приведенных в таблицах 2 и 3 видно, что на 100 кв. м на объекте Парк хим. реагентов №2 Поз.66/2 установлено в 3 раза больше термостабилизаторов марки СПМГ, чем на объекте Корпус общежития №3 ЖВП Поз. 1/3. При этом меньшее количество термостабилизаторов марки ТК произвели большее охлаждение грунтов, чем термостабилизаторы марки СПМГ.

По результатам тепловизионной съемки, сравнению замеров температур грунтов оснований, соотношению площади и количества термостабилизаторов на рассматриваемых объектах, можно сделать следующие выводы:

Таблица 3 - Количество термостабилизаторов, установленных на 100 кв. метров

Наименование	**Корпус общежития №3 ЖВК Поз. 1/3**	**Парк хим. реагентов №2 Поз.66/2**
Производитель охлаждающих устройств	ООО НПО «Фундаментстройаркос»	ФГУП ПИИ «Фундаментпроект»
Кол-во охлаждающих устройств	122 ТК	450 СПМГ
Площадь объекта, м2	975,44	1028,04
Кол-во охлаждающих устройств на 100 м2	12	43

1. При равноценных инженерно геокриологических условиях и температурах грунтов оснований на начало замораживания количество установленных термостабилизаторов на 100 кв. м марки СПМГ на объекте Парк хим. реагентов в 3 раза больше, чем марки ТК на объектах ЖВК.

2. При меньшем в 3 раза на 100 кв. м количестве термостабилизаторов марки ТК, чем СПМГ, термостабилизаторы марки ТК произвели охлаждение грунтов на 2,6 °С, а СПМГ на 1,5 °С.

3. Результаты температурного мониторинга грунтов подтвердили результаты тепловизионной съемки о частичной неработоспособности СПМГ.

4. Данные по охлаждению грунтов подтвердили эффективность и работоспособность термостабилизаторами марки ТК, полученные ранее по результатам тепловизионной съемки.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУР ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Д.Ю. Кропачев[1], Е.В. Амосова[1], Д.С. Паздерин[2]

[1]ОАО НПП «Эталон», 644009, г. Омск, ул.Лермонтова, 175, тел.: (3812) 36-84-00
[2]НПО «Фундаментстройаркос», г.Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

Для безопасности функционирования объектов нефтегазового комплекса, а также строительства сооружений в северных районах России предложено осуществлять температурный мониторинг объектов с целью выявления и устранения аварийных участков в районах вечномерзлого грунта с помощью системы мониторинга температур.

Реализация национальных нефтегазовых проектов XXI века тесным образом связана с развитием новых крупных центров добычи углеводородного сырья и формированием новых систем магистрального трубопроводного транспорта газа, конденсата и нефти [1].

Безопасность функционирования объектов нефтегазового комплекса на территориях распространения многолетнемерзлых пород во многом определяется эффективностью систем мониторинга опасных геокриологических процессов, развитие которых связано как с природными факторами, так и с влиянием самих технических объектов. В зависимости от комплекса природных факторов, формирующих геокриологические условия, грунты могут находиться в многолетне - и сезонномерзлом, сезонноталом, талом и переохлажденном состояниях, а, следовательно, обладать различными прочностными и деформационными свойствами. К числу опасных трансформаций криогенных грунтов относится образование термокарста, термоэрозия, морозное пучение, растепление, заболачивание. Наиболее уязвимыми в этом отношении являются магистральные трубопроводы, поскольку подобные процессы приводят к изменению их положения, деформации и высокой вероятности возникновения аварийной ситуации [3].

Также существуют проблемы строительства и эксплуатации зданий, сооружений на вечномерзлых грунтах. Проблемы фундаментостроения в районах распрост¬ранения вечномерзлых грунтов определяются особенностями инженерно-геокриологических условий площадок разме¬щения газопромысловых сооружений. Для этого проводят геотехнический мониторинг, в состав которого входят наблюдения за температурным и гидрогеологическим режимом, состоянием грунтов оснований, несущей способностью и деформациями фундаментов, развитием опасных геологических процессов и экологической безопасностью прилегающей территории, прогноз и управляющие мероприятия, позволяющие обеспечивать надежность оснований и фундаментов сооружений [4].

Определение геотехнических свойств мерзлых грунтов имеет ряд особенностей:

- при определении температур грунтов в скважинах следует соблюдать режимы выстойки скважин после бурения и выстойки измерительной аппаратуры;
- для определения глубин сезонного оттаивания замеренные глубины оттаивания следует пересчитывать согласно ГОСТ 26262-84;
- отбор образцов и определение физических и механических свойств мерзлых грунтов должны осуществляться с учетом масштабного эффекта, вызванного наличием ледовых прослоев в мерзлом грунте [4].

Успешная реализация нефтегазовых и строительных проектов на территории распространения многолетнемёрзлых пород обусловлена внедрением при проектировании и строительстве новых технологий и технических решений, которые не только должны обеспечивать надежность, устойчивость фундаментов и пространственную неизменность конструкций в процессе строительства и эксплуатации, но и гарантировать надёжную работу газодобывающих и газотранспортных систем, даже с учётом негативных сценариев возможного потепления климата планеты [1].

Интенсивное потепление климата, начавшееся во второй половине 1960-х – начале 1970-х гг., не было постоянным на всем севере России. В последние 18–20 лет на значительном числе метеостанций стали наблюдать слабые изменения климата, приостановку потепления и даже его похолодание. Современные изменения климата привели к формированию тенденций к повышению температуры грунтов на Севере [2].

Согласно комплексному анализу данных метеостанций и геокриологических стационаров, для севера России возможные изменения трендов температуры грунтов охватывают широкий диапазон – от 0,004 до 0,05 °С/год (средние для всего региона значения тренда составляют 0,03 °С/год) [2].

Высокие тренды потепления грунтов, так же как и воздуха, наблюдаются в центральной части Западной Сибири, в Якутии и на юге Красноярского края. Минимальные тренды изменения температуры воздуха и грунтов характерны для Европейского Севера, севера Средней Сибири и Колымской низменности [2].

В районах с высокотемпературными многолетнемерзлыми грунтами (юг Западной Сибири, Забайкалье, Приамурье) сильное потепление климата не приводит к синхронному формированию

высоких трендов изменений среднегодовой температуры грунтов вследствие значительных затрат тепла на фазовые переходы при оттаивании [2].

В настоящее время широкий круг ученых-климатологов и геокриологов отмечает, что за последние 20-25 лет температура воздуха в области криолитозоны повысилась на 0,2-2,5 °С. Повышение температуры в верхних горизонтов мерзлых пород за этот период достигает 1,0-1,5 °С и распространяется до глубины 60-80 м. По различным оценкам, прогнозируемое повышение температуры воздуха на Севере в первой четверти XXI в. составит 1,0-2,0 °С и может достичь 3-4 °С к середине столетия. При таком потеплении климата произойдет существенное сокращение площади сплошных мерзлых пород в Северном полушарии и южная граница их распространения в Западной Сибири может отодвинуться на север на 200-500 км.

Можно сделать вывод, что изменение теплового баланса многолетнемерзлых пород под воздействием инженерных сооружений и глобального потепления климата стало, если уже не стало, одним из основных факторов, определяющих ус¬тойчивость инженерных сооружений.

Деградация мерзлых пород приведет к резким изменениям в условиях функционирования оснований и фундаментов, поскольку прочностные и деформационные свойства грунтов напрямую зависят от температуры.

В результате недостаточного учета особенностей геокриологических условий и их природных и техногенных изменений происходят многочисленные деформации сооружений, иногда даже аварийного характера.

В этом направле¬нии, на наш взгляд, необходимо контролировать и управлять темпера¬турным режимом грунтов в процессе эксплуатации.

Отметим также, что одним из элементов комплексного проектирования в обязательном порядке является термостабилизация грунтов оснований. Системами термостабилизации грунтов оснований могут быть вентилируемое подполье, теплозащитные экраны, сезонно-действующие охлаждающие установки (горизонтального и вертикального типов), охлаждающие установки круглогодичного действия (горизонтального и вертикального типов).

Таким образом, одной из главных проблем успешного проектирова¬ния фундаментов является разработка и промышленное применение новых технических решений по контролю и управлению температурным режимом грунтов оснований.

В связи с этим ОАО НПП «Эталон» разработало систему мониторинга температур протяженных объектов.

Разработанная система мониторинга температур протяженных объектов предназначена для полевого определения температуры грунтов по ГОСТ 25358-82, где требуется получить данные о температуре мерзлых, промерзающих и протаивающих грунтов. А также может использоваться для измерений температур в строительстве, на любых сложных нелинейных объектах, в резервуарах с неагрессивными жидкостями.

Система мониторинга температур протяженных объектов позволяет повысить точность измерения и надежность, упростить существующие системы мониторинга температур, расширить области применения.

Тем самым разработчики ОАО НПП «Эталон» предприняли попытку устранить недостатки в известных системах мониторинга температур, таких как: усложненность, дороговизна и небольшая надежность, низкая герметичность, которая приводит к отказу устройств в условиях промышленной применимости.

Система мониторинга температур протяженных объектов состоит из датчика температуры многозонного цифрового МЦДТ 0922 (далее будем называть – термокоса) и контроллера цифровых датчиков (далее будем называть – контроллер), пример представлен на рисунке 1.

Термокоса, представленная на рисунке 2, предназначена для одновременного измерения температуры в нескольких точках протяженного объекта, в качестве которого может быть трубопровод, скважина в различных грунтах.



Рисунок 1 – Термокоса (МЦДТ 0922) с контроллером (ПКЦД-1/100)

Термокоса представляет собой устройство для многозонного измерения температуры, которое содержит последовательно расположенные измерительные преобразователи (далее назовем – датчики температуры), каждый из которых размещен в отдельном защитном металлическом корпусе, и разъем для подключения к контроллеру. Датчики температуры соединены между собой гибким кабелем, преимуществом которого является возможность расширенного диапазона использования термокосы.

На сегодняшний день разрабатываются и изготавливаются различные варианты термокосы, что говорит о ее многообразии конструкций и особенностях.

Таким образом, одной из особенностей термокосы, расположенной в вертикальном положении, может быть наличие устройства для крепления груза на последнем датчике температуры, что обеспечивает выпрямление термокосы, или наличие

армирующего элемента для длинных термокос, в качестве которого может использоваться трос.

Метрологические и технические характеристики МЦДТ 0922:

• рабочий диапазон измеряемых температур, °С от -50 до +100;

• пределы абсолютной погрешности в рабочем диапазоне измеряемых температур, °С:

от -50 до -30 включ., °С ±(0,1+0,014(|t|-30))

св. -30 до +30 включ., °С ±0,1

св. +30 до +100 включ., °С ±(0,1+0,014(|t|-30))

где |t| - абсолютное значение температуры, оС, без учёта знака

• количество измерительных преобразователей от 3 до 250;

• общая длина, м от 0,5 до 120;

• степень защиты от воздействия пыли и воды по ГОСТ 14254-96 IP56.



Рисунок 2 – Термокоса (МЦДТ 0922)

Контроллер предназначен для считывания результатов измерения температуры с термокос.

ОАО НПП «Эталон» выпускает портативные и стационарные контроллеры.

Контроллер цифровых датчиков портативный ПКЦД (далее – ПКЦД) выпускается в двух исполнениях: ПКЦД-1/16, ПКЦД-1/100 – в зависимости от количества одновременно подключенных датчиков температуры и длины линии связи (рис. 3).

ПКЦД-1/16 может работать с сетями длиной до 25 м, объединяющих до 16-ти датчиков, и считывать результаты измерения от 3 до 60 секунд. Прибор может идентифицировать каждый цифровой датчик и расстояние до него [5].

В отличие от ПКЦД-1/16 контроллер ПКЦД-1/100 позволяет устойчиво считывать измерения с датчиков на расстоянии 100 метров и более, а также поддерживает от 1 до 100 датчиков в сети с интервалом опроса от 3 секунд до 10 минут. Связь с ПК можно осуществлять через COM-порт и посредством USB. При подключении к USB контроллер может работать без элемента питания [5].

ПКЦД представляет собой устройство, способное считывать, отображать, записывать и сохранять информацию во внутреннюю память. ПКЦД обеспечивает индикацию температуры объекта с разрешением 0,06 ºС на жидкокристаллическом индикаторе с подсветкой, обеспечивает связь с IBM-совместимым компьютером. Просмотр содержимого в энергонезависимой памяти можно осуществить как на индикаторе контроллера, так и на компьютере в виде таблицы или графика. При подключении к ПК строятся температурные графики в режиме реального времени, выводятся ранее сохраненные результаты в виде таблиц. Для оформления отчетов возможен экспорт данных в Excel.



Рисунок 3 – Контроллеры (ПКЦД-1/16 и ПКЦД-1/100)

Контроллер цифровых датчиков температуры стационарный СКЦД используется для объединения термокос в общую сеть с помощью интерфейса RS-485 и передачи данных о температуре с каждой термокосы посредством протокола Modbus на компьютер.

Система мониторинга температур протяженных объектов работает следующим образом.

Система мониторинга температур осуществляет в автоматическом режиме измерение температуры протяженных объектов на разных глубинах с определенным шагом при помощи опущенных в них термокос, а также осуществляет анализ температурного распределения вдоль объекта, который выполняется контроллером с целью выявления аварийных для объекта ситуаций.

Датчики температуры производят замеры температуры, перевод аналогового сигнала в цифровой сигнал, и с помощью интерфейса передают результаты измерений в контроллер. С помощью контроллера производится питание термокос, а также с помощью портативного контроллера – идентификация индивидуального обозначения (номер каждого датчика температуры или расстояние до него).

Отметим еще раз преимущества системы мониторинга температур протяженных объектов:

• все датчики температуры подключаются параллельно к одному кабелю, и таким образом, не требуется подводить индивидуальный кабель к каждому датчику температуры;

• в состав системы мониторинга температур протяженных объектов входит программное обеспечение для компьютера оценки и сбора информации;

• система мониторинга температур протяженных объектов значительно компактнее и проще известных систем;

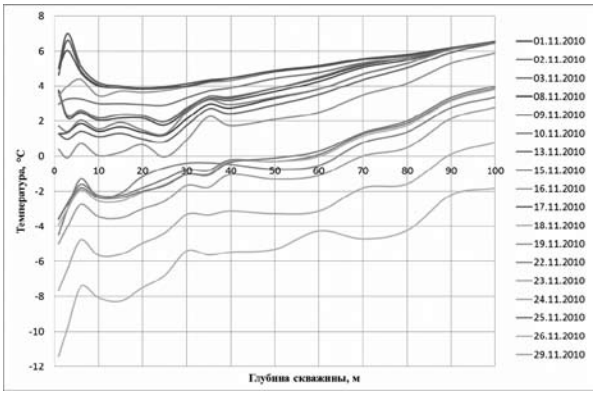


Рисунок 4 – График зависимости температуры грунта от глубины скважины

• для создания системы мониторинга температур протяженных объектов требуется только стандартное сетевое оборудование.

В настоящее время на опытном полигоне ООО НПО «Фундаментстройаркос» г. Тюмень ведутся работы по оценке эффективности работы термостабилизаторов. Для мониторинга температуры грунта вместе с термостабилизатором размещена 100 метровая термокоса МЦДТ 0922. График результатов измерения температуры за ноябрь месяц 2010 года одной термокосы с помощью ПКЦД-1/100 представлен на рисунке 4. Данный график показывает распределение температуры грунта по глубине в течение времени.

На сегодняшний день ОАО НПП «Эталон» занимается разработкой системой мониторинга температур, позволяющей объединять термокосы и контроллеры в общую сеть и передавать данные непосредственно на ПК или посредством интернета в любую точку Земли.

Такая система будет содержать термокосы, средство сбора данных, поступающих от протяженного объекта, средство передачи данных, компьютер сбора и оценки информации, расположенный дистанционно относительно протяженного объекта и предназначенный для приема и оценки данных. Средство сбора данных будет выполнено в виде контроллера датчиков температуры, выполняющего те же функции что и СКЦД, а также будет напрямую поддерживать среду Ethernet и Internet. Средство передачи данных будет выполнено в виде сетевого концентратора и приемопередающего устройства.

Каждый контроллер по сети Ethernet будет подключаться к сетевому концентратору, который объединит контроллеры датчиков температуры в единую сеть с помощью сетевого кабеля и, таким образом, сделает возможным передачу данных в сеть Internet. В случае, если прокладка кабеля затруднена, предусмотрен вариант передачи данных от сетевого концентратора с помощью приемопередающего устройства, которое обеспечивает беспроводную точку доступа в сеть Internet и позволяет передавать данные на расстояние. Беспроводная точка доступа может быть реализована несколькими способами, например, с помощью сетевых операторов, с помощью стандартных беспроводных интерфейсов или с помощью спутниковой связи.

ОАО НПП «Эталон» изготавливает и поставляет необходимое метрологическое оборудование для контроля характеристик системы мониторинга температур в процессе эксплуатации в зависимости от пожеланий заказчика.

Список литературы:

1. Попов А.П., Милованов В.И., Жмулин В.В., Рябов В.А., Бережной М.А. К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны // Инженерная геология, 2008, сентябрь, с. 22-38.

2. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, №4, с. 32-39.

3. Корниенко С.Г. Изучение и мониторинг мерзлых грунтов с использованием данных космической съемки // Материалы 11-й Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформатика в нефтегазовой отрасли».

4. Минкин Марк Строительство нефтегазовых объектов на Севере // Материалы семинара «Вопросы проектирования фундаментов на особых грунтах. Новые геотехнические конструкции и методы их расчетов», 2010.

5. Неделько А.Ю. Контроллеры цифровых датчиков температуры // Промышленные АСУ и контроллеры, 2010, № 8, с. 36-38.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛИТЕЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ГЕОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ В КРИОЛИТОЗОНЕ

С.Н. Стрижков[1], Н.А. Скорбилин[1]

[1]НПО «Фундаментстройаркос», г.Тюмень, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

Анализируются результаты длительных термометрических наблюдений на объектах с установленными системами температурной стабилизации грунтов оснований зданий и инженерных сооружений. Даются статистические данные по установке этих систем и термометрических скважин, их распределения по регионам. Рассматриваются исторические и организационные особенности проведения термометрических исследований в разных районах криолитозоны

Из всей территории Российской Федерации площадью немногим более 17 млн. км2 примерно 11 млн. км2, то есть около 65%, занято многолетнемерзлыми горными породами, формируя обширную криолитозону [1].

К важнейшим особенностям проектирования, строительства и эксплуатации зданий и инженерных сооружений в криолитозоне относится необходимость учитывать и регулировать теплообмен грунтов с этими зданиями и сооружениями, а также с внешней средой. При хозяйственном освоении территории изменения температурного и влажностного режимов грунтов, особенно с переходом температур через 0оС, вызывают изменения состава, строения и свойств грунтов, прочности, несущей способности и сжимаемости мерзлых пород, напряжения и деформации пучения и осадки в промерзающих и протаивающих породах, разрабатываемости мерзлых пород при горных работах, интенсивности развития термоэрозии, наледей, термокарста, солифлюкции и других криогенных процессов и явлений. Это может привести к значительным разрушениям и деформациям строящихся и эксплуатируемых зданий и инженерных сооружений, а также необратимым негативным последствиям для окружающей природной среды. Около 30% всего жилого фонда на российском арктическом побережье составляют деформированные здания, многие из которых находятся в непроектном или аварийном состоянии.. Потери на ремонт и реконструкцию поврежденных зданий составляют около 10% их стоимости. Основные причины деформаций – это осадки многолетнемерзлых грунтов (ММГ) при оттаивании или их пучение при промерзании. Огромные экономические потери по аналогичным причинам отмечаются при строительстве и эксплуатации железых и автомобильных дорог, подземных коммуникаций, плотин и других инженерных сооружений [2].

В связи с этим защита территорий от опасных криогенных процессов и явлений, надежность эксплуатируемых объектов, в первую очередь – их оснований, и экологи¬ческая безопасность окружающей природной среды должны быть обеспечены на всех стадиях формирования и функциониро¬вания геотехнических систем (ГТС), состоящих из совокупности природных объектов и технических сооружений, прямо связанных друг с другом, когда функционирование технического объекта сильно зависит от природного и наоборот [3].

В число наиболее эффективных методов предотвращения и устранения аварийных ситуаций в периоды строительства и эксплуатации зданий и сооружений в криолитозоне входит температурная стабилизация и замораживание талых и охлаждение пластично-мерзлых грунтов. Для этих целей ООО НПО «Фундаментстройаркос» разработало, производит и широко использует системы температурной стабилизации грунтов оснований (ТСГ): системы «ГЕТ» (системы горизонтальные, естественнодействующие, трубчатые), системы «ВЕТ» (системы вертикальные, естественнодействующие, трубчатые), «ТК» (индивидуальные «СОУ»-термостабилизаторы), «СОУ» (сезоннодействующие глубинные охлаждающие устройства) и другие [4-8].

География работ ООО НПО «Фундаментстройаркос», включая разработку, производство, установку, мониторинг и научно-методологическое сопровождение систем ТСГ, охватывает многие регионы России, особенно в ее северной и восточной частях, а также восточные районы Украины (рисунок 1).



Рисунок 1 – География работ ООО НПО «Фундаментстройаркос»

Всего за период 1993-2010 гг. установлено 104428 систем и устройств ТСГ производства ООО НПО «Фундаментстройаркос», в том числе: «ГЕТ» – 1020 систем, «ВЕТ» – 337 систем, «ТК» и «СОУ» – 103071 устройство [9], причем их соотношение по регионам следующее (таблица 1):

Подавляющее большинство систем «ГЕТ» установлено на различных объектах Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) и Ванкорского нефтегазового месторождения, расположенного в Красноярском крае. Подобная ситуация сложилась также с системами «ВЕТ»,

но где вместе с ЯНАО лидером является Республика Саха – Якутия (плотины в районе г.Мирный). Значительное большинство «ТК» и «СОУ» располагается на территории ЯНАО, но с учетом установленных на нефтепроводе Ванкор-Пурпе 60 тысяч устройств этого класса, еще больше их находится на территории Красноярского края.

Таблица 1 - Установленные за период 1993-2010 гг. системы ТСГ по регионам

№	Регион	Количество		
		«ГЕТ»	«ВЕТ»	«ТК»
1	Ямало-Ненецкий автономный округ	606	110	37533
2	Красноярский край	282	-	63001
3	Республика Саха - Якутия	-	191	1218
4	Ненецкий автономный округ	76	36	1015
5	Хабаровский край	46	-	75
6	Иркутская область	10	-	157
7	Чукотский автономный округ	-	-	72

Установка систем ТСГ на объектах происходит в соответствие с проектами температурной стабилизации грунтов, разрабатываемыми и реализовываемыми ООО НПО «Фундаментстройаркос» на основе результатов специальных инженерных (инженерно-геологических, инженерно-геокриологических, инженерно- гидрологических и гидрогеологических) изысканий с учетом конструктивных и технологических особенностей проектируемых сооружений, их теплового и механического взаимодействия с ММГ оснований и возможных изменений геокриологических условий, в том числе в связи с прогнозируемым глобальным потеплением климата. При этом учитываются местные условия строительства, требования к охране окружающей среды, а также имеющийся опыт проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений в аналогичных условиях.

Контроль за эксплуатационной надежностью и долговечностью зданий и сооружений с установленными в их основаниях системами ТСГ, работоспособностью и эффективностью работы последних, состоянием температурного поля грунтов оснований в значительной мере может обеспечивать геотехни¬ческий мониторинг (ГТМ) – система комплексного контроля, прогнозирования и управления состоянием ГТС с целью обеспечения их надежности на всех стадиях жизненного цикла.

В ООО НПО «Фундаментстройаркос» ГТМ включает в себя:

• Разработку на стадии проекта и последующее создание сети ГТМ грунтов оснований, фундаментов и опорных конструкций;

• Режимные наблюдения за динамикой теплового баланса систем ТСГ с грунтами оснований, состоянием фундаментов и опорных конструкций;

• Анализ полученных данных и разработку мероприятий по предупреждению деструктивных процессов с целью обеспечения безаварийной эксплуатации объекта.

Значительное место в программе ГТМ систем ТСГ занимает обязательное проведение регулярных измерений температуры грунтов как в процессе строительства, так и в период эксплуатации сооружения, как и предусмотрено СНиП 2.02.04-88 [10] для всех проектов оснований и фундаментов зданий и инженерных сооружений, возводимых на ММГ. Количество, глубина и размещение необходимых для проведения мониторинга температур грунтов наблюдательных термометрических труб (скважин, ТТ), то есть термометрического мониторинга, его программа определяются разрабатываемыми ООО НПО «Фундаментстройаркос» проектами систем ТСГ, учитывающими назначение, степень ответственности и линейные размеры строящихся зданий и сооружений. Для этих целей также в полной мере используются результаты анализа инженерно-геологических изысканий, генплана застройки территории и особенностей теплового взаимодействия зданий, сооружений, трубопроводов и грунтов их оснований.

Согласно ГОСТ 25358-82 [11], измерения температуры грунтов должны выполняться в заранее подготовленных и выстоянных скважинах переносными или стационарными термоизмерительными комплектами, представляющими собой гирлянды электрических датчиков температуры с соответствующей измерительной аппаратурой или гирлянды «заленивленных» ртутных термометров. Температуру мерзлых, промерзающих и протаивающих грунтов следует выражать в градусах Цельсия с округлением до 0,1°С. В ООО НПО «Фундаментстройаркос» измерения температуры грунтов в сети ТТ, пробуренных на территории объекта, производят с помощью комплекса, состоящего из многозонного цифрового датчика температуры МЦДТ 0922 и многоканального портативного контроллера цифровых датчиков ПКЦД-1/16.

Среди особенностей проектирования ТТ, их оптимального размещения по площадке и проведения в них мониторинговых исследований следует отметить следующие:

• При строительстве и эксплуатации зданий и сооружений с установленными системами ТСГ в качестве объектов термометрического мониторинга в тесном взаимодействии выступают грунты оснований, фундаменты и сами указанные системы, что вызывает необходимость измерений температур грунтов максимально близко к фундаментам, не выходя за пределы зоны действия этих систем. Исключение составляют скважины, предназначенные для определения фоновых значений температур грунтов;

• Для оптимального размещения ТТ по проектируемой площадке требуется соблюдать два основных условия: во-первых, расставлять их достаточно равномерно по площади с расстоянием между двумя соседними скважинами, не превышающими 15-20 м [12]; во-вторых, ставить допол-

нительные скважины в критических местах (например, водоотводные лотки, места ввода или выпуска санитарно-технических коммуникаций, дополнительного источника тепла и т.д.);

• При проектировании одновременно на нескольких смежных площадках необходимо использовать возможность более рационального и эффективного размещения ТТ с учетом всей проектируемой площади.

Большинство зданий и сооружений с установленными системами ТСГ производства ООО НПО «Фундаментстройаркос» и контролирующими их работу термометрическими скважинами находится на территории ЯНАО, однако часть из них располагается в других северных и восточных регионах страны – Красноярском и Хабаровском краях, Якутии, Иркутской области, Ненецком и Чукотском автономных округах (рисунки 2, 3).

Около четверти всех рассматриваемых ТТ установлены на объектах с системами ТСГ, находящимися на территории Уренгойского месторождения с примыкающими к нему территориями г.Новый Уренгой, ст.Фарафонтьевская, Восточно-Уренгойского и Северо-Есетинского месторождений, трасс газопроводов (таблица 2). Среди таких объектов отмечаются УКПГ, ДКС, другие инженерные сооружения и различные здания промышленно-бытового назначения. На указанной территории самыми первыми объектами, на которых в октябре 1989г. начались регулярные термометрические наблюдения силами ООО НПО «Фундаментстройаркос», стали ЦПС-2 и ДКС-2 в районе г.Новый Уренгой.

На территории Бованенковского месторождения находится больше всего объектов с установленными системами ТСГ (136 объектов). Для проведения термометрических наблюдений построены 343 ТТ. Первые такие наблюдения начались в июле 2004г. в грунтах под зданиями теплой стоянки и пождепо промбазы ГП-1.



Рисунок 2 - Схема размещения объектов с системами ТСГ и термометрическими скважинами на севере Западной Сибири (в числителе – число объектов с системами ТСГ, в знаменателе – количество ТТ)



Рисунок 3 - Схема размещения объектов с системами ТСГ и термометрическими скважинами в Азиатской части России (в числителе – число объектов с системами ТСГ, в знаменателе – количество ТТ)

Первые термометрические наблюдения на территории Заполярного месторождения приурочены к апрелю-маю 1998г. Этими объектами с установленными на них системами ТСГ стали теплые стоянки, агрегаты и ЗРУ ПАЭС-2500, котельная «Вайсман».

Еще раньше, в ноябре 1997г., начались термометрические наблюдения на территории Харасавэйского месторождения. Они были проведены на ряде объектов - промежуточном складе ГСМ, производственном корпусе АО «Ямалавтосервис», теплой стоянке строительной техники треста ЯСГД.

На Ямбургском месторождении первым объектом с системами ТСГ, на котором проводились термометрические измерения (март 2002г.), стало здание РЭУ в пос.Ямбург.

Несколько позднее, в июне 2003г. начались термометрические наблюдения на территории Самбургского месторождения, в грунтах под технологическим корпусом подготовки газа и конденсата, резервуарным парком метанола, служебно-эксплуатационным блоком с узлом связи и др.

Характерной особенностью для объектов на территории Южно-Русского месторождения стало отсутствие систем «ГЕТ» и «ВЕТ», что компенсировалось установкой значительного числа ТК (около семи тысяч устройств). Термометрические измерения начались там в мае 2006г. на объектах УКПГ.

По нескольку десятков ТТ было оборудовано для проведения термометрических наблюдений, начавшихся в период 2003-2008гг., на объектах с системами ТСГ, расположенных на территории Сандибинского, Юбилейного и Медвежьего месторождений.

Кроме месторождений углеводородного сырья, системы ТСГ производства ООО НПО»Фундаментстройаркос» размещены на объектах, находящихся непосредственно в населенных пунктах.

Из таких объектов в г.Салехарде следует от-

Таблица 2 - Географическое распределение объектов с системами ТСГ и термометрическими скважинами

№	Регион	Количество				
		Объектов	ГЕТ	ВЕТ	ТК	ТТ
1	Ямало-Ненецкий автономный округ, в т.ч.:	444	606	110	37533	2471
	Уренгойское месторождение	72	3	22	12387	711
	Бованенковское месторождение	136	145	-	5433	343
	Заполярное месторождение	73	47	23	3987	284
	Харасавэйское месторождение	20	175	-	190	209
	Ямбургское месторождение	30	83	14	2340	197
	Самбургское месторождение	45	88	5	1368	192
	Южно-Русское месторождение	17	-	-	6929	148
	Юбилейное месторождение	13	6	12	1155	73
	Медвежье месторождение	5	5	5	221	25
	Сандибинское месторождение	1	12	2	-	20
	г. Салехард	10	18	3	1449	115
	г. Лабытнанги	14	4	24	1256	96
	г. Самбург	7	20	-	289	40
	г. Надым	1	-	-	529	18
2	Красноярский край, в т.ч.:	58	282	-	63001	362
	Ванкорское месторождение	58	282	-	63001	362
3	Республика Саха - Якутия, в т.ч.:	26	-	191	1218	269
	Район г.Мирный	26	-	191	1218	269
4	Ненецкий автономный округ, в т.ч.:	8	76	36	1015	82
	Район пос.Варандей	8	76	36	1015	82
5	Хабаровский край, в т.ч.:	5	46	-	75	49
	Хаканджинское месторождение	5	46	-	75	49
6	Иркутская область, в т.ч.:	1	10	-	157	8
	Верхнечонское месторождение	1	10	-	157	8
7	Чукотский автономный округ, в т.ч.:	2	-	-	72	7
	Западно-Озерное месторождение	2	-	-	72	7
	Всего:	544	1020	337	103071	3248

метить, прежде всего, здания Салехардского РВЗ и аэровокзала, обладающих длинными рядами термометрических измерений, начавшихся, соответственно, в июне 1996г. и октябре 1997г.

В г.Лабытнанги первые термометрические наблюдения начались в мае-июне 1996г. на объектах с системами ТСГ - зданияхГОВДи84-квартирного дома по ул.Дзержинского

Длинный ряд термометрических измерений (с января 1995г.) имеется для находящегося в г.Надым дома №10, в основании которого установлено более 500 ТК и 18 контролирующих их ТТ.

За пределами ЯНАО имеется яркий пример широкомасштабного использования систем ТСГ для замораживания грунтов оснований – Ванкорское месторождение на севере Красноярского края. Там всего установлено на 58 объектах около 300 систем ГЕТ и свыше 63 тысяч ТК, включая магистральный нефтепровод Ванкор – Пурпе. Для контроля их работы проводится регулярный мониторинг температур грунтов оснований в 362 ТТ. Эти наблюдения начались в апреле 2006г. с резервуаров объемом 5000 м3 для хранения дизельного топлива на площадке УПСВ-Ю и хранения воды для пожаротушения на площадке ЦПС.

В районе г.Мирный (Восточная Якутия) получен уникальный опыт успешного замораживания и стабилизации грунтов тела плотин на р.Лиендокит и гидроузла на р.Ирелях с помощью систем ТСГ производства ООО НПО «Фундаментстройаркос». В этом районе системы ТСГ также установлены на других объектах: зданиях и сооружениях промышленно-бытового назначения Мирнинского ГОКа, КНС промстоков, линейных трубопроводах, установке биологической очистки бытовых сточных вод. Начался термометрический мониторинг на объектах с системами ТСГ в январе 2004г. на хвостохранилище первой очереди Мирнинского ГОКа.

Разнообразные и весьма объемные работы по установке и использованию систем ТСГ проведены в Ненецком автономном округе, в районе пос.Варандей. Широкий спектр этих систем применен для замораживания и стабилизациии грунтов оснований зданий и инженерных сооружений Варандейского нефтяного отгрузочного терминала, базы МТС «Дресвянка», Южно-Хыльчуюского нефтегазового месторождения. Термометрические наблюдения на данной территории начались в 2006г. с объектов «Маслосклад» и «Гараж закрытый».

Представления о географии работ по установке систем ТСГ дополняют оставшиеся три района. На золото-серебряном месторождении «Хаканджинское», раположенном на севере Хабаровского края, первые измерения температур грунтов основания здания золотоизвлекательной фабрики произведены в ноябре 2002г. Термометрические исследования грунтов под резервуарным парком пускового комплекса №1 Верхнечонского нефтегазового месторождения, находящимся на трубопроводной трассе «Восточная Сибирь – Тихий океан» в северной части Иркутской области, проведены в декабре 2008г. В 2006г. аналогичные работы осуществлены на объектах с системами ТСГ, относящихся к магистральному газопроводу «УКПГ Западно-Озерного месторождения – АГРС г.Анадырь» (Чукотский автономный округ).

Таким образом, вслед за маштабным вторжением в районы распространения криолитозоны технологий замораживания и стабилизации температурного режима грунтов оснований зданий и сооружений с помощью систем ТСГ производства ООО НПО «Фундаментстройаркос» там развернулись активные термометрические исследования, входящие в состав геотехнического мониторинга. В результате получены уникальные данные по температурам грунтов оснований зданий и сооружений из более чем трех тысяч термометрических скважин с длиной рядов наблюдений до 10-15 лет. Кроме практической пользы от полученных данных для достоверной и своевременной оценки температурного поля грунтов, эффективности работы систем и устройств ТСГ по промораживанию грунтов, теплоизоляции зданий и сооружений, поиска и нейтрализации на объектах техногенных

источников повышенного тепловыделения, несомненен большой научный вклад в изучение процессов и динамики теплообмена грунтов и построенных на них техногенных объектов. Особенно это актуально в свете возрастающей популярности современных научных гипотез о глобальном потеплении климата.

В заключение необходимо остановиться на проблемах, возникающих при проведении термометрических наблюдений на объектах с установленными системами ТСГ:

• Подавляющая часть термометрических скважин находится в весьма сложных и парадоксальных условиях. С одной стороны, они располагаются в непосредственной близости от фундаментов техногенных объектов, что делает их легко уязвимыми для любых деформаций, поломок, разрушений; с другой стороны, эти объекты строятся в отдаленных районах с тяжелыми климатическими и транспортными условиями, что делает их весьма труднодоступными для регулярных исследований;

• Большое количество имеющихся термометрических скважин, что показано выше, требует огромных материальных и людских ресурсов для их регулярного мониторинга. Это накладно даже для такой серьезной и обеспеченной организации как ООО НПО «Фундаментстройаркос». Поэтому надо налаживать тесное сотрудничество в этом деле между всеми заинтересованными организациями, включая Российскую Академию наук;

• Важным дополнительным ресурсом для повышения эффективности использования сети термометрических скважин могло бы стать активное внедрение средств телеметрии и дистанционных методов автоматизированного сбора и доставки в центры обработки всей термометрической информации.

Список литературы

1. Геокриологический словарь /Составители: Г.И.Дубиков, В.И.Аксенов. – М.:ГЕОС, 2003. – 140 с.
2. Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 685 с.
3. Экологический энциклопедический словарь. – М.: Издательский дом «Ноосфера», 2000. – 930 с.
4. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений / Международная конференция: « Криогенные ресурсы полярных и горных регионов», 21-24 апреля 2008, Тюмень, с. 34-39.
5. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Кинцлер Ю.Э. Практический опыт строительства оснований зданий и сооружений в условиях ВМГ. – Тюмень: ООО НПО «Фундаментстройаркос», 2002.
6. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Осокин А.Б. и др. Современная технология строительства оснований и фундаментов на многолетнемерзлых породах с применением парожидкостных охлаждающих установок / Материалы третьей конференции геокриологов России. Том 4. – М.: Изд-во МГУ, 2005.
7. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Стоянов С.А., Залесский К.В. Опыт проектирования, монтажа и эксплуатации систем температурной стабилизации грунтов оснований «ГЕТ» объектов Ванкорского месторождения / Материалы четвертой конференции геокриологов России, 7-9 июня 2011, Том 3. – М.: Университетская книга, 2011, с.273-279.
8. Стрижков С.Н. Стратегия инновационного развития, строительства и освоения территорий в криолитозоне /Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», 19-20 апреля 2011, Тюмень, с. 12-32.
9. Волкова Е.В. Анализ геокриологического мониторинга систем температурной стабилизации грунтов оснований в районах Крайнего Севера /Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», 19-20 апреля 2011, Тюмень, с. 12-32.
10. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2005. – 52 с.
11. ГОСТ 25358-82. Грунты. Метод полевого определения температуры.
12. СТО Газпром 2-2.1-435-2010. Проектирование оснований, фундаментов, инженерной защиты и мониторинга объектов ОАО «Газпром» в условиях Крайнего Севера. – М., 2010.

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ЧАЯНДИНСКОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В.Н. Макаров

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск, Makarov@mpi.ysn.ru

Рассматриваются эколого-геохимические проблемы освоения Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения расположенного в Западной Якутии. Среди факторов, определяющих устойчивость природных комплексов, отмечаются: техногенные - интенсивность, динамика и формы воздействия, и естественные - свойства самих природных систем: их состав, направления основных геохимических процессов и особенности функционирования климата, рельефа и других компонентов.

Чаяндинское нефтегазоконденсатное (НГК) месторождение входит в Ботуобинский нефтегазоносный район, объединяющий газовые и нефтегазовые месторождения (Интехское, Среднеботуобинское, Средневилючанское, Тас-Юряхское, Хотого-Мурбайское, Чаяндинское), расположенные в юго-восточной части Сибирской платформы. В региональном тектоническом плане Ботуобинский нефтегазоносный район располагается в центральной части Ангаро-Ленского прогиба, вытянутого вдоль южной границы Сибирской платформы, в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы. В южной части месторождения находится Пеледуйская зона поднятий – тектоническая структура второго порядка в системе Ангаро-Ленского прогиба. В современной структуре Пеледуйская зона поднятий вырисовывается как область широкого развития сложно дислоцированных отложений нижнего кембрия и относительно неглубокого (2-3 км) залегания крис¬таллических пород фундамента [1]. Основные тектонические структуры выделяются в качестве ан¬тик¬линальных и синклинальных зон. Складчатые структуры осложнены разрывными нарушениями соскладчатого северо-восточного простирания, ограничивающими антиклинальные и синклинальные зоны. Амплитуда вертикальных смещений по разрывным нарушениям достигает 250 м. На наиболее раздробленных участках зон зафиксированы соляные и сероводородные источники. В геологическом строении определяются два структурных этажа. Нижний - фундамент платформы, образованный породами архея и нижнего протерозоя, верхний - вулканогенно-осадочный чехол, состоящий из нескольких структурных ярусов. Верхний ярус осадочного чехла слагают мезозойские отложения, выполняющие наложенные впадины. На территории месторождения развиты кембрийские, юрские, не¬огеновые и четвертичные отложения, а также интрузивные магматические образования.

Кембрийские отложения представлены нижним, средним и вер¬хним отделами. Нижний отдел включает породы алданского (пестроцветная свита) и ленского ярусов (эльгянская, толбачанская, олекминская и чарская свиты). В литологическом отношении кембрийские отложения сложены карбонатными породами: известняками, доломитами, с редкими прослоями мергелей, аргиллитов и кар¬бонатных брекчий.

Средний отдел кембрийских отложений - метегерская свита амгинского яруса, представлен известняками, доломитами и мергелями, с прослоями кремнисто-карбонатных брекчий в основании разреза.

Средний - верхний отделы - верхоленская и илгинская свиты, сложены глинисто-алевролитовыми, песчано-глинистыми и карбонатно-песчано-глинистыми пачками пород.

Юрская система представлена залегающими в депрессиях доюрского рельефа грубообломочными, континентальными песчано-глинистыми отложениями уку¬гутской свиты.

В районе повсеместно распространены четвертичные отложения: аллювиальные, озерно-болотные, элювиально-делювиальные и делювиальные образования.

Интрузивные магматические образования представлены дайками трапповой формации. Дайки сложены темно-серыми и темно-зелеными долеритами. Карбонатные породы на контакте часто мраморизованы, песчаники переходят в брекчированные кварциты.

Непосредственно в пределах площади месторождения мощность мерзлой толщи горных пород изменяется от 108 до более чем 300 м. Температура горных пород варьирует от -1°С в пределах плоских водоразделов и верхних частей залесенных и нижних слабозалесенных пологих склонов южной экспозиции до -3°С на выположенных участках местных депрессий с моховым покровом. Сезонное протаивание грунтов меняется от 0,3-0,5 м в замшелых днищах долин местных водотоков до 4,0 м на участках гарей с уничтоженной растительностью.

В районе активно развиты такие криогенные процессы как морозобойное трещинообразование и термокарст, в меньшей степени – пучение грунтов.

Господствующим зональным типом почв являются мерзлотные дерново-карбонатные почвы, сопутствующими - мерзлотные перегнойно-карбонатные и мерзлотные подзолистые остаточно карбонатные, а также мерзлотные таежные перегнойно-глееватые почвы под заболоченными лесами [2]. По долинам рек и ручьев развиты мерзлотные дерново-луговые, мерзлотные лугово-болотные и мерзлотные болотные почвы, в пойме – мерзлотные пойменные почвы.

Почвы района отличаются повышенной концентрацией свинца, мышьяка и хрома, не¬ско¬лько превышающей санитарные нормы для почвенного покрова. На участках геохимических аномалий комплекс химических эле¬ментов, содержания которых в почвах превышают са¬ни¬тар¬ные нормы, включает - As, Mn, Mo, Pb, Cr и др. (табл. 1).

Поверхностные воды в районе Чаяндинского НГК месторождения - река Нюя и её притоки - Чаянда, Хамака и Сюльдюкар. По химическому составу вода водотоков сульфатно-гидрокарбонатная магниево-кальциевая, с минерализацией 0,2-0,4 г/л. Примером может быть химический состав р. Нюя у Чаянды:

SO4 47 HCO3 45 Cl 8
M 0,3 ---------- pH 7,2 NH4 0,1
Ca 70 Mg 29 Na 1

Средние модули стока на территории месторождения составляют 2-4 л/с км2. Такие незначительные величины среднегодового стока обусловлены малым количеством осадков, небольшими уклонами, заболоченностью и наличием мохового покрова, задерживающего влагу и расходующего ее на испарение. Доля зимнего стока составляет всего 2,0-2,4% от общего годового. Условия формирования минимального стока определяются, главным образом, наличием многолетней мерзлоты. Реки района перемерзают ежегодно. Продолжительность отсутствия стока в них в среднем составляет 140 дней. Использование речных вод в районе месторождения, за исключением р. Нюи, для целей водоснабжения, в связи с их полным перемерзанием в зимний период, без устройства специальных искусственных водохранилищ невозможно.

Таблица 1 - Среднее содержание химических элементов в почвах геохимических аномалий, мг/кг

Элементы	Среднее содержание	ПДК	С/ПДК
Ag	1,0	-	-
Co	60	50	1,2
Zr	1000	-	-
Ni	60	50	1,2
Mo	100	5	20
As	50	2	25
Ce	2000	-	-
Ga	1000	-	-
Zn	300	150	2
Cu	60	30	2
Ba	1000	-	-
Mn	10000	1500	6,7
Pb	100	32	3
Sn	400	50	8
Ti	10 000	5 000	2
Cr	600	100	6
Sr	1000	-	-
P	1000	100	10

Подземные воды представлены надмерзлотным и подмерзлотным водоносными комплексами.

Надмерзлотный водоносный комплекс распространен в пределах терригенных четвертичных отложений, в элювиально-делювиальных отложениях деятельного слоя, озерно-болотных отложениях и в аллювиальных отложениях речных долин. В южной части месторождения речные долины не проморожены и являются зонами активного водообмена. Воды надмерзлотного водоносного комплекса здесь непосредственно контактируют и смешиваются с водами кембрийских водоносных горизонтов. По химическому составу воды надмерзлотного водоносного комплекса преимущественно гидрокарбонатно-кальциевые, ультрапресные и пресные с минерализацией 0,08-0,4 г/л, слабокислые и нейтральные (pH 6,2-7,0), мягкие, неагрессивные. Лишь в зонах водообмена с нижележащими водоносными горизонтами их состав и минерализация незначительно изменяются.

Таблица 2 - Содержание микроэлементов в подземных водах зоны свободного водообмена в среднем течении р. Нюя , мкг/л

Элементы	Бассейн р.Нюя		$ПДК_{рыбохоз.}$
	среднее	максимальное	
Ag	0,03	1.,8	-
Co	0,2	1,8	10
Zr	1,5	300	-
Ni	0,2	18	10
Zn	9,0	1500	10
Cu	0,6	180	1
Ba	15,0	300	-
Mn	8,0	180	10
Pb	2,0	90	10
Sc	0,8	180	-
Ti	8,0	180	-
Cr	0,3	30	1
V	0,3	20	1
Mo	0,3	300	0,4
As	0,5	20	50
Ce	0,5	150	-
Ga	0,5	18	-
Sn	0,8	180	-
Sr	7,5	90	-
P	0,5	300	-
B	1,5	9	17

Средние концентрации микроэлементов в подземных водах зоны свободного водообмена района Чаяндинского месторождения не превышают уровней ПДК. Однако, содержание Mo, Cu, Zn, Cr, V, Mn, Pb в пределах гидрогеохимических аномалий значительно выше са¬ни¬тарных норм для рыборазведения, а Pb, Ti, Mn, Zn, Mo не соответствуют и гигиеническим требованиям (табл. 2).

Подземные воды нижне-среднекембрийского (метегеро-ичеро-чарского) водоносного комплекса в зонах водообмена различны по составу, от сульфатно-кальциевых с минерализацией 0,6-1,8 г/л до хлоридно-натриевых с минерализацией 5-6 г/л. На закрытой территории воды комплекса хлоридно-натриевые с минерализацией от 6 до 59 г/л, возрастающей с глубиной разреза [3]. Воды соленых источников сероводородные, содержание H2S до 8 мг/л, с высокими концентрациями брома (до 200 мг/л), стронция (до 12 мг/л), сульфатов (до 4000 мг/л). Приме-

ром может быть химический состав источника, расположенного в среднем течении р. Нюя (остров Талах-Арыы):

Cl 93 SO4 5 HCO3 2

M 9,5 ---------- pH 7,1 NH4 0,2

Na 90 Ca 6 Mg 4

Подземные воды нижнекембрийского водоносного комплекса хлоридные натриево-кальциевые, практически бессульфатные, сероводородные (до 3 мг/л H2S), с минерализацией 300-360 г/л и высокими содержаниями брома (2-6 г/л) и стронция (1,7-2,5 г/л). При бурении скважины № 810 на Чаяндинском месторождении из пород толбачанской свиты (интервал 752-762 м) получен приток характерных для водоносного комплекса хлоридно-кальциевых рассолов с минерализацией 356 г/л и высоким содержанием Br - 2674 мг/л и J - 5 мг/л.

Подземные воды венд-нижнекембрийского подсолевого водоносного комплекса представлены хлоридно-кальциевыми рассолами с минерализацией 360-420 г/л и высокими содержаниями Br – до 6250 мг/л и J – до 40 мг/л.

Вендский терригенный водоносный комплекс также содержит хлоридно-кальциевые рассолы с минерализацией 350-440 г/л, высокими содержаниями Br, J, Sr, Li, Rb.

Оценка гипергенной миграции техногенных загряз¬няющих веществ в подвижных средах проведена с учетом следующей группы факторов: интенсивности водной миграции, атмосферного переноса локальных загрязнений, конвергентности атмо- и гидрогенных потоков, а также относительной способность почв к самоочищению.

Объём атмосферных выпадений на природные ландшафты в районе месторождения оценивается в 1,88 т/км2 , что соответствует фоновым для юго-запада Якутии и указывает на отсутствие заметного техногенного загрязнения атмосферы на территории Чаяндинского НГК месторождения. Повышенные концентрации аммония и сульфатов в снежном покрове обусловлены региональным атмосферным переносом соединений азота и серы с территории Иркутской области [4].

Для района месторождения характерна высокая устойчивостью ландшафтов: с высокими показателями конвергентности атмо- гидрохимического переноса и самоочищающей способности почв (табл. 3).

Таблица 3 - Классификация природных комплексов Чаяндинского газоконденсатного месторождения по факторам устойчивости к техногенному загрязнению

Вынос водными потоками	Атмосферный перенос	Конвергентность потоков	Способность почв к самоочищению	Устойчивость растительности
++	++	+++	+++	++

Источники атмосферных выбросов на Чаяндинском НГК месторождении включают: факельное сжигание, выпуск и продувка газа, выбросы черного дыма; выбросы при работе дизельных двигателей и газовых турбин; пыль транспортных средств; утечки газа. Газовые потоки формируются из природного газа, ушедшего в воздух в результате утечек и компонентов, образующихся при сжигании не утилизированного газа. В состав газовых потоков входят углекислый газ, окись углерода, метан, летучие органические углеродистые соединения, окиси азота и галогены. Возможны также выбросы сернистого ангидрида при сжигании дизельного топлива. Сжигание газа на факеле и другие процессы горения могут служить источником запахов.

Судьба газовых потоков зависит от состояния атмосферы: отсутствие интенсивного проветривания приземных слоев атмосферы приводит к осаждению многих компонентов газовых потоков вместе с аэрозолями на поверхность растений, почв и водоемов. Атмосферные условия в районе месторождения, иногда будут способствовать локальному загрязнению воздуха из-за инверсий температуры.

Самыми многочисленными центрами формирования техногенных потоков на Чаяндинском НГК месторождении являются эксплуатационные скважины. На стадии бурения и подготовки скважин к эксплуатации основными компонентами техногенных потоков являются буровой раствор и различные химические реагенты: кислоты, поверхностно-активные вещества и цементные растворы. Буровые растворы и промывочные жидкости - доминирующие загрязнители на этапе бурения. Как правило, это водные растворы определенных сортов глины, крепкие растворы каменной соли (при бурении в соленосных толщах) с различными химическими добавками. Наибольшей миграционной способностью в компонентах буровых жидкостей обладают соленые воды, которые в зависимости от рельефа и гидрологического режима образуют ореолы различных размеров и конфигураций. Техногенную нагрузку от этих потоков принимают на себя почвы, грунтовые и поверхностные воды.

Основным веществом, формирующим техногенные потоки от эксплуатирующихся скважин, является пластовая жидкость, содержащая растворенный газ и высоко минерализованной пластовой воды.

Техногенные потоки от скважин загрязняют почвы, поверхностные и грунтовые воды, биоценозы. Основной механизм их распространения - гравитационный (движение по поверхности в сторону уклона местности, просачивание в почвенные горизонты и рыхлые отложения). Попадая в водотоки, техногенный поток рассеивается, загрязняя при этом значительные территории.

Несмотря на тщательное выполнение всех технологических требований и высокую квалификацию персонала не исключается возникновение аварийных ситуаций представляющих угрозу окружающей среде: разливы и утечки топлива, нефти, газа, химических реагентов, опасных веществ и материалов; выбросы нефти или газа из скважины; стихийные бедствия (землетрясения, наводнения и др.); взрывы, пожары.

Выводы:

Разработка месторождения неизбежно будет сопровождаться комплексным преобразованием природных комплексов. Механические нарушения, а чаще полное уничтожение напочвенных покровов приведут к изменению геокриологических условий. Так, удаление напочвенных покровов в густом лесу, повышает температуру грунтов на глубине 15 м на 1,6°, а на участках с поверхностью с разреженным моховым покровом – на 1° [5]. Возрастание глубины оттаивания грунтов приведет к активизации криогенных процессов: термокарст, пучение, морозобойное трещинообразование.

Поверхностные воды рек Нюя, Чаянда, Хамака, Сюльдюкар являются единственным потенциальным источником хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения нефтегазодобывающего производства Чаяндинского месторождения. Запасы пресных поверхностных вод ограничены. Так, в водно-критический период года расход реки Чаянда составляет порядка 1 л/сек (86 м3/сут).

Освоение месторождения потребует использования природных вод для технологических нужд бурового процесса, заводнения продуктивных горизонтов для подержания пластовых давлений, технологических нужд подготовки и переработки нефти, хозяйственно-питьевых целей, противопожарных мероприятий.

Вероятность загрязнения промышленными и бытовыми отходами поверхностных вод при нефте- и газодобыче достаточно высока.

Возможности использования подземных воды района при освоении месторождения ограничены. Наиболее подвержены техногенному воздействию воды сезонно талого слоя, которые могут рассматриваться как транзитная зона накопления и переноса агрессивных техногенных вод в подземные горизонты либо в поверхностные водоемы.

Подземные воды локально-криогенных таликовых подрусловых зон по химико-органолиптическим показателям отвечают требованиям пресных питьевых вод и, как и поверхностные воды, должны быть защищены от загрязнения и истощения.

Подземные воды нижне-среднекембрийского водоносного комплекса (первого от поверхности земли) на площади месторождения из-за высокой минерализации не могут рассматриваться как источник хозяйственно-питьевого назначения. Распространение прерывистой мерзлоты, благоприятствует процессу инфильтрации в подземные горизонты загрязненных поверхностных вод. Подземные воды комплекса, обладая естественным напором и фильтрационным потоком, являются источником поступления в поверхностные воды растворенных солей (хлоридов и сульфатов) и токсичных элементов (Mg, Br, B, Sr). Учитывая мерзлотные условия территории, глубину распространения водоносных коллекторов и местного базиса эрозии, следует подчеркнуть нецелесообразность размещения резервуаров промышленных отходов в границах водоносного горизонта.

Выделяемые в разрезе продуктивных горизонтов высокоминерализованные рассолы – в случае их попадания на дневную поверхность представляют значительную экологическую опасность из-за высокой солености (350-450 г/л) и насыщенности токсичными химическими элементами (Sr, Br, B, F, Mo, Co, Be). Поэтому, в процессе разработки месторождения возникнет проблема утилизации попутных вод.

Так как на территории месторождения практически отсутствуют подземные воды питьевого качества (за исключением подземных вод русловых таликовых зон) необходимо запретить использование для технологических нужд поверхностных вод питьевого качества, исключить «залповые» сбросы сточных вод в период половодья. Для решения задач водоснабжения и охраны природных вод на месторождении рекомендуется проведение специализированной гидрогеологической и геоэкологической съемки масштаба 1:50 000.

Список литературы

1. Мокшанцев К.Б., Гринштейн Д.К., Гусев Г.С. и др. Тектоническое строение Якутской АССР. М.: Наука, 1964. 240 с.

2.Еловская Л.Г., Коноровский А.К. Районирование и мелиорация мерзлотных почв Якутии. – Новосибирск: Наука, 1978. - 175 с.

3. Макаров В.Н. Гидрогеохимические исследования в юго-западной части Якутской АССР. - В сб.: Материалы 8 Всесоюзного междуведомственного совещания по геокриологии. Якутся: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР. 1966, с. 61-71.

4. Макаров В.Н., М.М.Щац, А.Н.Слепцов. Геоэкологические условия территории нефтяного комплекса Талакан-Витим. - "Наука и образование", Якутск, 1998, № 2, с. 100-106.

5. Макаров В.И., Усвят Ю.Я. и др. Фундаменты линий электропередач и подстанций // Геокриологические исследований в Западной Якутии. – Н.: Наука, 1981, - с. 10-22.

АНАЛИЗ РИСКОВ ГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Т.А. Капитонова[1], А.И. Левин[2], Г.П. Стручкова[1]

[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru
[2]Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск, e-mail: a.i.levin@prez.ysn.ru

Территория Республики Саха (Якутия) занимает обширные площади и имеет широкий спектр угроз как природного, так и техногенного характера. Уровень риска и негативные последствия от техногенных природных аварий и катастроф в последние 3-5 лет становятся неприемлемыми для дальнейшего социально-экономического и экологического развития республики. В настоящее время на территории Республики Саха (Якутия) ведется интенсивная реализация масштабных инвестиционных проектов: строительство магистрального нефтепровода Восточная Сибирь - Тихий океан (ВСТО), железной дороги Беркакит-Якутск-Магадан, ГЭС на реках Алдан, Олёкма, Тимптон и Учур и других. Задачи мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС), оценки потенциальных угроз и районирование территории края по уровню риска возникновения ЧС приобретают при этом острую жизненную необходимость.

На решение проблемы обеспечения техногенной безопасности в последнее время выделяются значительные научные и финансовые ресурсы. В России, как и во многих других странах, оценка риска постепенно становится основным механизмом, влияющим на принятие научно обоснованных решений по уменьшению и предупреждению техногенного воздействия на окружающую среду. Анализом негативных процессов в техносфере и биосфере занимаются корпорация RAND и Институт сложных систем (США), Институт системного анализа (Австрия), Международный институт безопасности (Россия), Институт безопасного развития атомной энергетики РАН (Россия) и др.

Разработки по анализу природно-техногенной безопасности первоначально были проведены по экспертизе технического состояния газопровода Мастах-Берге-Якутск, за которым сотрудники ИФТПС СО РАН наблюдают на протяжении 30 и более лет.

На территории республики сосредоточены огромные запасы газа и нефти, которые составляют наравне с Иркутской областью преобладающую часть запасов газа Восточной Сибири и Дальнего Востока. Природный газ потребителями Центрально-Якутского энергорайона используется с 1967 г., а Западно-Якутского — с 1983 г. В разработке находятся три месторождения: Средневилюйское и Мастахское ГКМ, а также Среднеботуобинское НГКМ, расположенные в Западной Якутии. [1,2].

К настоящему времени сложилась следующая структура газопотребления: АК «Якутскэнерго» - 53%, коммунально-бытовое хозяйство - 18%, АК «АЛРОСА» - 11%, Агропромышленный комплекс - 11%, население - 3%. Газопотребление характеризуется большой сезонной и суточной неравномер¬ностью: коэффициент неравномерности составляет 0,6.

Поставка газа потребителям Центрально-Якутского энергорайона осуществляется по 2-ниточному магистральному газопроводу Кысыл-Сыр - Мастах - Берге - Якутск диаметром 530 мм, протяженностью 466 км и газопровод - отводами диамет¬ром от 100 до 325 мм. Магистральный газопровод с проектной производительностью 4,2 млн. м3 в сутки в зимние пиковые периоды эксплуатируется с большой перегруз¬кой. В связи с этим ведется поэтапное строительство III нитки газопровода Средневилюйское ГКМ — Мастах — Берге — Якутск протяжен¬ностью 384 км, диаметром 720 мм.

В Западно-Якутском энергорайоне природный газ подается потребителям по однониточному магистральному газопроводу Таас-Юрэх — Мирный — Чернышевский диаметром 530 мм, протяженностью 226,8 км, производительностью 1 млрд. м3/год.

Поставка газа сельским населенным пунктам, расположенным в зоне прохожде¬ния магистральных газопроводов, осуществляется по газопроводам - отводам.

Переработка газа осуществляется в ограниченных объемах и в настоящее время — только на Средне-Вилюйском месторождении.

На территории республики имеются следующие газохранилища:

• Мастахское газоконденсатное месторождение, п. Мастах - метанол 7 резервуаров - 1440 куб.м. - газоконденсат 3 подземных резервуара – 7800 куб.м.

• СреднеВилюйское газоконденсатное месторождение, п. Кысыл-Сыр - метанол 5 резервуаров – 9000 куб.м.

В настоящее время общепризнанно, что безопасность сложной продукции является одним из важнейших факторов неценовой конкурентоспособности, определяющим инвестиционную привлекательность наукоемких технологий. Изучение причин большого числа техногенных катастроф показало, что необходима разработка методологии управления риском аварий, которая позволила бы оценить баланс между масштабами возможного ущерба от потенциальных аварий системы с ее технико-экономическими преимуществами.

Сбор и обработка статистически данных по отказам газопровода Мастах - Берге - Якутск ведутся с момента его ввода в эксплуатацию. На основе этих данных была построена гистограмма количества отказов и аварий за весь период эксплуатации (рис.1).

Используемый порядок анализа рисков ориентирован на рассмотрение неопре¬деленных ситуаций состояния объектов, производств и процессов проекта, при которых имеется возможность негативного воздействия на механизм получения прибылей. К этим воздействиям следует отнести риск-факторы, приводящие как к прямым финансовым, так и к косвенным потерям, которые связаны с потерями на компенсацию произведенного ущерба [3]. К этим риск-факторам относятся в первую очередь воздействия, имеющие место при возникновении аварийных ситуаций, которые оказывают негативное влияние на окружающую среду.

В этом случае анализ риск-факторов должен включать:

идентификацию опасностей;

определение причин, которые могут привести к возникновению опасных ситуа¬ций;

разработку вероятных сценариев развития нежелательных событий;

составление списка мер безопасности, которые могут предотвратить наступле¬ние таких событий;

составление списка мер по снижению масштабов ущерба потенциального происшествия;

описание последствий, происшествие которых может оказать влияние на людей и окру¬жающую среду;

анализ частот реализации сценариев на основе фактических данных за прошлый период;

нанесение отметки риска на матрицу риска;

фиксирование любых дополнительных мер или действий, которые могут быть рассмотрены в целях дальнейшего уменьшения риска, связанного со сценарием.

Идентификация опасностей или риск - факторов. В настоящей методике под опасностью или риск-фактором понимается потенциальный источник потерь (вреда), ко¬торый может быть нанесен людям, имуществу или окружающей среде, а также любое не¬контролируемое событие или условие, способное самостоятельно или в совокупности с другими событиями и условиями привести к инциденту, аварийной или чрезвычайной ситуаций. При этом выделяются опасности, которые при наличии неопределенной ситуации, могут привести к возможным серьезным последствиям.

Выявление источников возникновения риск - факторов. После определения риск-факторов необходимо установить источники их возникновения. Наиболее типичные источники возникновения опасных ситуаций приведены в Таблице 1.

Сценарии аварийных ситуаций.

Сценарии разрабатываются исходя из опасностей, обнаруженных на этапе их иден¬тификации и анализе последствий проявления. Детальность проработки сценариев опреде¬ляется наличием исходной информации и условиями определения характера и условий во¬зникновения последствий.

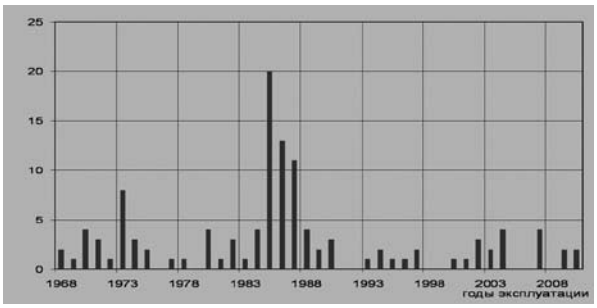


Рисунок 1 - Гистограмма количества отказов и аварий

При определении возможного набора сценариев учитывается, что одно и то же со¬бытие может вызывать различные последствия, которые, в свою очередь, обусловлены различными риск-факторами и их сочетанием. При этом учитывается, что к инциденту могут привести несколько одновременно или последовательно возникающих опасностей.

Обычной практикой является выделение так называемых базовых (как правило, связанных с наиболее серьезными последствиями) сценариев. Обычно это выполняется на основе предшествующего опыта и анализа аварий. В дальнейшем в целях полноты анализа рассматриваются различные модели развития сценариев. С этой целью:

- изменяется последовательность развития начального (базового) сценария;
- для каждого события определяются дополнительные условия возникновения;
- вводятся менее вероятные предположения и условия развития сценария.

Конечной целью данного

Таблица 1 - Источники возникновения риск-факторов (опасностей)

Категория	**Характеристика неопределенной ситуации и ее опасных последствий**
Ошибка персонала	Неверное включение/выключение оборудования, ошибки в определении показаний контрольно-измерительной аппаратуры, неправильный выборрежимов работы.
Отказ оборудования	Неправильное срабатывание запорной аппаратуры, превышение нагрузок на насосно-компрессорном оборудовании, замыкание электрических цепей, коррозия, структурные дефекты материалов
Отказ управления оборудованием	Потеря управления оборудованием, отказы систем безопасности.
Авария	Потеря устойчивости оборудования, обрыв и / или опрокидывание подъемного оборудования, прекращение подачи энергии и рабочих сред для питания и управления технологическим процессом
Внешние силы и нагрузки	Сейсмические явления, экстремальные гидрометеорологические явления, наводнение, удар молнии, падение перемещаемых грузов

этапа является обеспечение полноты анализа, то есть оп¬ределение возможных путей наступления опасных последствий и цепочек событий от вы¬явленных опасностей к этим последствиям. В наибольшей степени этим целям удовлетво¬ряют методы построения и анализа логико-временной последовательности событий и деревьев отказов (см. АДС и АДО в Методических указаниях РД 03-4 8-0) [4,5].

Опенка воздействия и последствий. Опасные воздействия и последствия инци¬дентов, аварийных и чрезвычайных ситуаций обычно рассматриваются для следующих категорий:

здоровье и безопасность персонала и населения;

воздействие на окружающую среду;

ущерб имуществу.

В соответствии с Методическими указаниями РД 03-4 8-0 [4,5] в данном исследовании каждая из указанных категорий воздействий будет характеризоваться уровнем воздейст¬вий, отражающим их тяжесть. Уровни воздействий представляют собой разбиение всего диапазона возможных последствий по качественным признакам (таблицы 2.2, 2.3, где уровень I соответствует наиболее тяжелым последствиям с понижением серьезности по¬следствий при переходе к более низким уровням II, III и IV).

Таблица 2 - Характер и уровни воздействий на окружающую среду

Уровни воздействия	*Категории воздействий*	
	Воздействия на окружающую среду	
	Прямые	
	Воздействия	Затраты и ущербы
I	Значительные и	
II	Продолжительные воздействия Сильные	Полное восстановление нарушений Требуются значительные ресурсы
Ш	Умеренные	Используются ограниченные ресурсы
IV	Малые	Восстановление не требуется

Таблица 3 Характер и уровни воздействия на безопасность людей

Уровни Воздействия	Категории воздействия
	Воздействия на безопасность людей
	Воздействия
I	Смертельные случаи
П	Тяжелые телесные повреждения
Ш	Телесные повреждения, требующие лечения
IV	Легкие телесные повреждения

Анализ частот реализации сценариев. Оценки возможных частот наступления событий и реализации сценариев, используемые в данном исследовании, приведены в таблице 6.

Окон¬чательные результаты анализа риска являются так называемым «остаточным риском», за¬щита от которого должна осуществляться в рамках планов реагирования на чрезвычайные ситуации. Такие планы могут быть реализованы собственными и/или привлеченными силами (ликвидации аварийных разливов нефти, планы борьбы с открытыми фонтанами на скважинах, план пожаротушения, план эвакуации персонала). Разработка таких пла¬нов производится в рамках или по требованиям специального раздела проектной докумен¬тации «Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны. Мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций », подлежащего обязательной разработке на этапе ТЭО (проект).

Выделены ос¬новные функциональные процессы:

- прогнозирование вероятности, масштабов ЧС, возможных по¬следствий;
- планирование мероприятий по защите от ЧС и смягчению их по¬следствий;
- выполнение мероприятий и контроль.

На основе анализа причин, условий и ущерба произошедших отказов и аварий на объектах добычи, переработки и транспортировки газа, газоконденсата и нефти Республики Саха (Якутия) оценены и определены следующие основные риск-факторы аварийных ситуаций магистральных трубопроводов эксплуатируемых в зоне вечномерзлых грунтов.

При возникновении крупных производственных аварий, катастроф и стихийных бедствий на территории республики может сложиться следующая обстановка:

- возникновение пожаров и взрывов на объектах добычи, переработки и транспортировки газа, газоконденсата и нефти.

Анализ возможных сценариев развития аварий на объектах добычи, переработки и транспортировки газа, газоконденсата и нефти республики.

1. Основными факторами риска аварий являются:

• Сложные природно-климатические условия эксплуатации: низкие температуры, нерегулярное электроснабжение, ветровые нагрузки, снежный покров, обледенение, возможность подтопления, многолетнемерзлые грунты;

• большое количество речных переходов;

• большая протяженность магистрального газопровода;

• непроектные участки трубопроводов на слабонесущих участках (болота, мари и поймы рек);

• большая вероятность образования газоконденсатных и гидратных пробок;

• большой объем технологических трубопроводов выработавших свой ресурс;

• лесные пожары;

• человеческий фактор.

Схематично факторы, влияющие на аварии и отказы оборудования при эксплуатации магистральных трубопроводов в условиях Севера можно разделить на обусловленные опасными

природными явлениями и опасными геологическими процессами, представленными на рис.2.

2. На основе анализа отказов и аварий на данном объекте и на объектах находящихся в похожих климатических условиях, с близкими объемами транспортировки и имеющих сходное оборудование, выбраны следующие последствия аварий (в порядке убывания вероятности)

• образование свищей, разливы газоконденсатов на суше, так и на водной поверхности (на поймах рек, озера и болота);
• пожары в лесах и в окрестностях магистрального газопровода;
• пожары и взрывы в населенных пунктах;
• горение паров газоконденсата в открытом пространстве при высоких летних температурах;
• загрязнение воздуха токсичными продуктами горения;
• загрязнение воды населенных пунктах;
• взрыв, пожар и «огненные шары» при пожаре в газораспределительных стациях и объектах газодобычи и переработки;
• пожар в жилых помещениях;
• отключение подачи газа на объекты ЖКХ и коммунально-бытового хозяйства;
• отключение подачи газа на объекты АК «Якутскэнерго»;
• отключение подачи электроэнергии на центральном энергетическом районе республики;
• размораживание объектов ЖКХ и коммунально-бытового хозяйства;
• прекращение работы всех жизненно важных объектов центрального района республики.

Последствия аварий могут быть колоссальны по ущербу и человеческим жертвам, если техногенная катастрофа произойдет в период зимних низких температур.

3. Поражающими факторами рассмотренных аварий являются:

• ударная волна;
• тепловое излучение и горячие продукты горения;
• открытое пламя и горящие газонефтепродукты (газоконденсат);
• токсичные продукты горения;
• осколки разрушенного оборудования, трубопроводов и емкостей, обрушение зданий и конструкций.

4. По величине вероятных зон действия поражающих факторов на персонал объекта и оборудование наиболее опасными сценариями являются следующие:

• взрыв, крупный пожар газа и пролива с выходом газоконденсата за пределы охранной зоны;
• горение газовоздушной смеси в воздухе;
• попадание газотранспортирующего и перерабатывающего оборудования, сосудов и емкостей с газоконденсатами в открытое пламя и образование «огненного шара».

Опасные природные явления.

Заторообразование и паводки на реках. Трассы трубопроводов пересекают реки, на которых, как правило, в весенний период образуются заторы, иногда очень мощные с катастрофическими последствиями. Заторы формируются, как правило, в одних и тех же местах – очагах заторообразования и охватывают большие участки русла. Протяженность заторных участков скопления льда достигает 100 и более километров. Продолжительность существования заторов в среднем составляет 3-5 суток, а наиболее мощных – до 10 суток. В результате образования заторов льда подъем уровней воды над зимним уровнем достигает в среднем 5-8 метров.

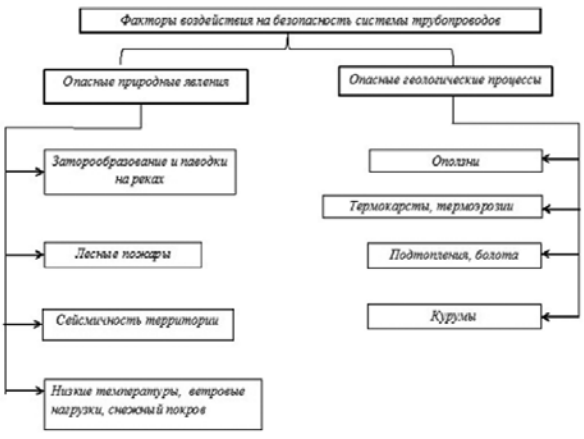


Рисунок 2 - Факторы влияющие на безопасную эксплуатацию трубопровода в условиях Севера

Размыв грунта дна и берега реки в районе перехода в период формирования и разрушения заторов может привести к оголению трубы нефтепровода и повреждению ее под действием гидродинамического воздействия потока и давления заторного льда.

Лесные пожары. На территории республики могут возникнуть одновременно до 100 очагов природных пожаров, общей площадью около 110 тыс. га. Непосредственная угроза может возникнуть для 134 населенных пунктов, расположенных в зонах прогнозируемых природных пожаров. Наиболее пожароопасными районами являются: Горный, Олекминский, Хангаласский, Мегино-Кангаласский, Таттинский, Намский, Усть-Алданский, Чурапчинский, Верхневилюйский, Вилюйский, Нюрбинский, Сунтарский улусы, территория администрации г. Якутска. При этом возможно возникновение пожароопасной ситуации на объектах НГК, что может привести к возникновению чрезвычайных ситуаций регионального масштаба.

Землетрясения. Из опасных геофизических явлений источником чрезвычайных ситуаций со средним уровнем риска являются землетрясения.

В центральной части Якутии, к востоку и западу от г. Якутска, сейсмическая обстановка более

спокойная. За последние годы отмечено усиление в этом регионе сейсмической активности. Здесь известны 6-ти балльные землетрясения у п. Кангалассы, Мырыла, в бассейнах р.р. Суола и Синяя, на р. Меличан (правый приток р. Бирюк), у п. Витим, в приустьевой части р. Олёкмы и др. Эти данные позволяют предполагать возможность усиления сейсмической опасности в этих регионах.

Для участка трассы трубопровода характерны следующие природные криогенные процессы и явления:

• криогенное пучение грунтов, которое распространено почти на всей территории выделенных геокриологических участков трассы;

• наледеобразование, которое развивается, в основном, в северной части исследуемой территории в пределах области развития вечномерзлых пород;

• процессы эрозии и термоэрозии, в разной степени развитые на ряде геокриологических участках и вызывающие возникновение процессов оседания, обрушения, осыпания, оползания и др;

• солифлюкция и оползнеобразование, развитые в пределах некоторых геокриологических участков и по воздействию на инженерные сооружения также относящихся к числу опасных;

• термокарст, который образуется в связи с оттаиванием льдонасыщенных грунтов и вытаиванием подземных льдов, приводящий к проседанию поверхности земли, возникновению отрицательных форм рельефа и их заболачиванием.

5. Возможные сценарии развития аварий на промыслах, нефтегазопроводах и газораспределительных станциях могут происходить по следующей схеме:

• гидратная пробка (нарушение технологического режима),
• свищ,
• разрыв (трещина) трубы,
• утечка газа (нефти),
• образование газовоздушного облака (смеси),
• взрыв,
• возгорание газовоздушной смеси.

6. В максимальную гипотетическую аварию могут быть вовлечены следующие количества опасных веществ [3,7,8]:

• при проливе газоконденсата на поверхность воды – до 22 т;
• при пожаре пролива РВС-3000 до 2536,5 т. н/п;
• при горении паров газоконденсата в облаке может находиться до 1т. н/п;
• при возникновении «огненного шара» на автоцистерне – до 10,5 т бензина, газоконденсата.

Зоны действия поражающих факторов при этом составляют:

• для «огненного шара» - 100-250 м;
• при дрейфе облака с сохранением способности к воспламенению – до 350 м;
• при пожаре пролива – десятки метров.

Для примера рассмотрим некоторые крупные аварии происшедшие на территории республики [6].

20 ноября 1987 г. в процессе эксплуатации под давлением 35,5 атм. при температуре наружного воздуха –500С на участке 171-174,3 км произошло разрушение температурных компенсаторов первой нитки газопровода Мастах–Берге–Якутск с кратковременным воспламенением газа. Анализ общей картины катастрофического разрушения выявил, что разрушению подвергся участок протяженностью 3,3 км, имеющий помимо прямолинейных участков 6 компенсаторов. Наиболее интенсивное разрушение обнаружено в местах расположения компенсаторов рис. 4.

Изучение остатков труб показало, что нитка трубопровода при аварии разрушилась, в основном, в поперечном сечении по основному металлу вблизи кольцевых сварных соединений. Общая последовательность разрушения прослеживается следующим образом: в кольцевом сварном соединении, расположенного в основании компенсатора на 173 км около дефекта в виде поры накопились повреждения, которые послужили зародышем усталостной трещины. При достижении усталостной трещиной критических размеров началось хрупкое распространение трещины по металлу кольцевого сварного соединения с последующим выходом в основной металл. В результате мгновенного раскрытия трубы компенсатор подвергся воздействию динамической реактивной силы истечения газа почти ударного характера, что привело к разрушению компенсатора. При этом произошло преобразование накопленной потенциальной энергии в кинетическую энергию перемещения прямолинейных участков газопровода.

9 апреля и 17 апреля 2003 г. на 185 и 183 км II-й нитки магистрального газопровода произошли аварии с разрушением металла трубопровода. Авария на 185 км представляет собой раскрытие металла вдоль газопровода общей протяженностью разрушения 2,16 м. Разрушение носило взрывной характер без возгорания, распространение трещин происходило механизмом отрыва с многочисленными ветвлениями на местах остановки трещины, переходящим на квазихрупкий вид с пластическими составляющими. Авария на 183 км представляет собой разрыв кольцевого сварного шва с последующим выбросом труб от оси укладки с радиусом 30-50 м. Общая длина разрушения 22 м. Установлено, что значительных следов коррозии, и утонения размеров стенки не наблюдается. Диаметр трубы соответствует 530 мм толщина стенки 7 мм.

Физическая природа разрушения газопроводов остается раскрытой не полностью, т.к. на процесс протекания разрушения влияют множество прямых и косвенных факторов (циклические температурные и механические напряжения, особенности влияния мерзлых грунтов, процесс старения материала и т.д.). После разрушения газопровода трудно установить роль этих особенностей на процесс зарождения и развития разрушения. Поэтому единственным источником информации о физических причинах разрушения газопровода остается излом разрушившейся части металла труб. Фрактографический анализ поверхности излома позволяет косвенным образом описать процесс протекания разрушения и установить причины его зарождения. Данный подход был использован при исследовании причин разрушения газопровода на 185 и 183 км магистрального газопровода Берге-Якутск и расчетной оценки внутреннего давления в момент разрушения. Для этого были проведены визуальные и фрактографические обследования изломов, спектральный анализ материала труб и оценка уровня старения металла труб и сварного шва на основе структурного анализа и механических испытаний образцов, вырезанных из катушки трубопровода [6].

На исследование была представлена катушка разрушенного участка трубопровода общей длиной 6 м. Общий вид разрушения на 185 км II нитки газопровода Берге-Якутск и схема разрушения показаны соответственно на рис.5 и рис. 4. Разрушение представляет собой раскрытие металла вдоль трубопровода на верхней части с многочисленными ветвлениями трещины. После аварии собрано 6 разрушившихся фрагментов общей протяженностью разрушения 2160 мм, кольцевой шов разорван поперек шва на 4 отдельных участка со следующими длинами: 1010 мм, 235 мм, 315 мм, 127 мм, соответственно. Общая длина шва по периметру составляет – 1687 мм. Разрушение носило взрывной характер без возгорания, распространение трещин происходило механизмом отрыва на местах остановки трещины переходящим на механизм сдвига с пластическими составляющими [6].

Исследование поверхности излома разрушения труб выявило, что очаг разрушения расположен с внутренней стороны трубы перпендикулярно кольцевому шву в зоне термического влияния на месте соединения основного металла и сварного шва, и имеет достаточную протяженность, и долговременность роста трещины. Поверхность излома разрушения свидетельствует о длительном развитии трещины, рис.5.

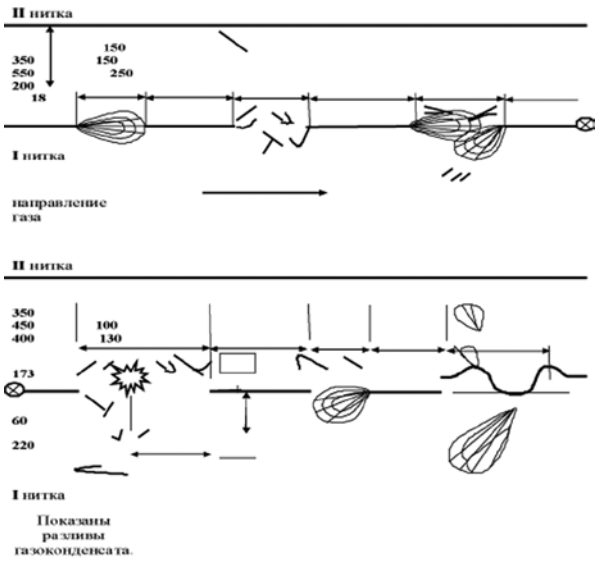


Рисунок 4 - Схема разрушения газопровода 1987 г.



Рис.5. Общий вид разрушения газопровода 185 км Бэргэ-Якутск.

Современные методы оценки риска и моделирования катастрофических природных процессов и техногенных аварий все теснее взаимодействуют с информационными технологиями, такими как геоинформационные технологии, реляционные СУБД и хранилища данных, сбор и обработка данных дистанционного зондирования (аэро- и космических снимков), архивация и хранение растровых изображений , Интернет, и т.д. В ИФТПС СО РАН [7,8] выполнен анализ аварийных ситуаций на газопроводах и объектах энергетики Республики Саха (Якутия) с частичной оценкой антропогенного воздействия. Собраны, проанализированы и введены в базу геоинформационных данных (БГД) данные о чрезвычайных происшествиях, техногенных авариях и природных стихийных явлениях на территории РС(Я) за период 1963 – 2006 годов, проведены оценки индивидуальных и комплексных рисков для отдельных территорий (улусов), построены карт риска и районирование риска РС(Я). Разработаны методические, технологические подходы, позволяющие на основе мониторинга, анализа риск-факторов и моделирования по данным многолетних наблюдений и статистики получить и прогнозировать риски аварийных ситуаций; разработана концепция управления природно-техногенной безопасностью с учетом низких климатических температур.

Список литературы

1. Информационные материалы. Межрегиональное совещание в республике Саха (Якутия) «Перспективы освоения месторождений углеводородного сырья Восточной Сибири и Дальнего Востока», г. Якутск, 18 февраля 2004 г. 30 с.

2. Топливно-энергетический баланс Республики Саха (Якутия) / М-во экон. развития Респ. Саха (Яку-

тия), ин-т физ. - техн. Проблем Севера СО РАН: [науч. рук. и отв. исполн. д.т.н. Н.А. Петров]. – Якутск: Сахаполиграфиздат, 2005, ч.I, - 2005. – 160 с.

3. Левин А.И. Хладостойкость и надежность трубопроводов Крайнего Севера. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. - Якутск; ЯФ издательства СО РАН, 2002.-32 с.

4. Методические рекомендации по составлению декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта (РД 03-357-00). 2002, НТЦ «Промышленная безопасность», Москва, 120 с.

5. Методические рекомендации по проведению анализа риска опасных производственных объектов (РД 03-418-01). ,2002, НТЦ «Промышленная безопасность», Москва, 80 с.

6. Лыглаев А.В. О природе катастрофических разрушений больших систем // Доклады АН СССР. –1990.- Т.312. - №3 - С. 555-557.

7. Слепцов О.И., Лыглаев А.В., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П. Исследование техногенных аварий и антропогенных воздействий на экологическую безопасность Республики Саха (Якутия) // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2007. - № 4. - С. 88-94.

8. Слепцов О.И., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П. Геоинформационные технологии в Республике Саха (Якутия) // Вычислительные технологии: 2008 г., спец. вып. - Т.12-Вып.3.-С.90-99.

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ФАКТОР РИСКА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ.

Ю.В. Рузов, В.В. Самсонова

ТюмГНГУ, кафедра Криологии Земли, г. Тюмень

Трубопроводные системы России обладают мощным энергетическим потенциалом. Большая часть трубопроводного транспорта расположена в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. При строительстве и эксплуатации трубопроводного транспорта в зонах распространения ММГ нарушается хрупкий баланс геоэкологической среды, что в итоге приводит к существенным изменениям геокриологической составляющей и активизации опасных геокриологических процессов. Это актуализирует вопросы оценки рисков опасных геокриологических процессов и геотехнического мониторинга.

Уникальная газотранспортная система имеет протяженность 150 тыс. км, в том числе трубопроводы диаметром 1220-1420 мм составляют 60%. На газопроводах работают 249 компрессорных станций общей мощностью 40,2 млн кВт. Годовая производительность единой системы газоснабжения (ЕСГ) страны измеряется в 600 млрд м3. Помимо внутренних потребителей газ поставляется в 25 зарубежных стран.

Трубопроводная сеть АК «Транснефть» самая крупная нефтепроводная система в мире. Она имеет протяженность 46,8 тыс. км со средним диаметром 860 мм. Средняя дальность трубопроводной поставки нефти — 2000 км. На магистральных нефтепроводах работает 395 насосных станций (НС), резервуарные парки насчитывают 898 резервуаров общей вместимостью 13,1 млн м3. Трубопроводный транспорт — самый экологически чистый вид транспорта углеводородов, но при условии проектирования, строительства и эксплуатации газопроводов и нефтепроводов на современном технологическом и техническом уровне с соблюдением жесткой экологической дисциплины [1].

В России общая площадь районов распространения вечной мерзлоты равна приблизительно 1,07 x10^7 км^2, что составляет около 63 % территории страны.

На Севере России сосредоточено более 30 % разведанных запасов нефти, около 60 % - природного газа, огромные залежи каменного угля и торфа, создана разветвленная инфраструктура объектов ТЭК. Для расположенных в районах Крайнего Севера сооружений (дорог, нефте- и газопроводов, резервуаров, площадок нефтегазопромысловых объектов, зданий и др.) наибольшую опасность представляет таяние вечной мерзлоты. Многие из них построены на свайных фундаментах, используют многолетнемерзлый грунт в качестве оснований и рассчитаны на эксплуатацию в определенных температурных условиях [2].

В процессе строительства и эксплуатации трубопроводных геотехнических систем (ГТС) происходит вживление их техногенных элементов в естественную природную среду. Часто это происходит с нарушением динамического равновесия и сопровождается активизацией опасных природных процессов, оказывающих существенное негативное влияние на техническое состояние трубопроводов и приводящих нередко к аварийным ситуациям.

К подобным реакциям «отторжения» относятся просадка или всплытие (выпучивание) сооружений, активизация мерзлотных, эрозионных, оползневых процессов и процессов обводнения-заболачивания на трассах магистральных и промысловых трубопроводов различного назначения. Это особенно характерно для легко ранимых и практически невосстанавливающихся ландшафтов севера Западной Сибири, где высокая чувствительность северной природы очень быстро переводит экологические проблемы строительства и эксплуатации в технологические и экономические.

Исследования показали, что при оттаивании мерзлых грунтов изменяются их физико - механические свойства (объёмный вес, влажность, пористость, адгезия к сваям - основаниям), что, в конечном счете, уменьшает несущую способность фундаментов, приводя к повреждению построенных на них сооружений. Не менее серьезную угрозу представляет оттаивание льдонасыщенных грунтов и пластов погребенного льда, мощность которых может достигать нескольких метров. Таяние содержащегося в грунте льда сопровождается просадками земной поверхности и развитием опасных мерзлотных процессов: термокарста, термоэрозии и др. В результате происходят значительные изменения рельефа, которые ухудшают напряженно-деформированное состояние трубопроводов и других сооружений, расположенных в данной местности [2].

При строительстве и эксплуатации трубопроводного транспорта в зонах распространения ММП нарушается хрупкий баланс геоэкологической среды, что в итоге приводит к существенным изменениям геокриологической составляющей.

Если современные тенденции сохранятся, а именно на это указывают теоретические прогнозы климата, опасные геоэкологические последствия деградации вечной мерзлоты будут неизбежны. В результате возможны массовые деформации зданий и сооружений, построенных без учета

климатического потепления. Многие факты свидетельствуют о том, что в последние десятилетия деструктивное воздействие криогенных процессов на объекты инфраструктуры в области распространения вечной мерзлоты усилилось. Согласно опубликованным данным, в Западной Сибири ежегодно происходит около тридцати пяти тысяч отказов и аварий на нефте- и газопроводах. Около 21 % всех зафиксированных аварий вызваны механическими воздействиями, в том числе связанными с потерей устойчивости фундаментов и деформацией опор [3].

Таблица 1 – ИГЭ, выявленные в разрезах

Обозначение ИГЭ	Характеристика ИГЭ
Многолетнемерзлые грунты	
ИГЭ – 1	торф пластичномерзлый, среднеразложившийся, нормальнозольный массивной криотекстуры
ИГЭ – 2	глина легкая, твердомерзлая, льдистая слоистой криотекстуры с примесью органических веществ
ИГЭ – 20	глина легкая, твердомерзлая, слабольдистая слоистой криотекстуры с примесью органических веществ
ИГЭ – 3	суглинок легкий, твердомерзлый, слабольдистый слоистой криотекстуры
ИГЭ – 4	суглинок легкий, твердомерзлый, льдистый, слоистой криотекстуры
ИГЭ – 5	песок мелкий, твердомерзлый, слабольдистый, массивной криотекстуры, слабозасоленные
ИГЭ – 7	песок средней крупности, твердомерзлый, слабольдистый, массивной криотекстуры, слабозасоленные
ИГЭ – 8	песок пылеватый, твердомерзлый, слабольдистый, массивной криотекстуры, слабозасоленные
ИГЭ – 9	супесь твердомерзлая, слабольдистая, слоистой криотекстуры
ИГЭ – 10	погребенный лед
ИГЭ – 21	суглинок легкий, пылеватый, пластичномерзлый, льдистый, слоистой криотекстуры
ИГЭ – 22	суглинок пластичномерзлый, слабольдистый, слоистой криотекстуры с включением гравия и гальки
ИГЭ – 27	суглинок легкий, твердомерзлый, сильнольдистый, слоистой криотекстуры
ИГЭ – 30	суглинок легкий, пылеватый, пластичномерзлый, слабольдистый, слоистой криотекстуры
ИГЭ – 31	супесь пластичномерзлая, льдистая, слоистой криотекстуры
ИГЭ – 32	суглинок пластичномерзлый, льдистый, слоистой криотекстуры с включением гравия и гальки
ИГЭ – 33	суглинок пластичномерзлый, очень сильнольдистый, слоистой криотекстуры
ИГЭ – 34	супесь твердомерзлая, слабольдистая, слоистой криотекстуры с включением гравия и гальки
ИГЭ – 36	суглинок легкий, пылеватый, пластичномерзлый, сильнольдистый, слоистой криотекстуры, с примесью органических веществ
Талые грунты	
ИГЭ – 11	глина полутвердая с примесью органических веществ
ИГЭ – 12	глина легкая пылеватая тугопластичная с примесью органических веществ
ИГЭ – 13	суглинок тяжелый пылеватый полутвердый
ИГЭ – 14	суглинок легкий пылеватый мягкопластичный
ИГЭ – 15	песок мелкий, средней плотности, средней степени водонасыщения и насыщенный водой
ИГЭ – 16	песок средней крупности насыщенный водой и средней степени водонасыщения
ИГЭ – 17	супесь пылеватая пластичная
ИГЭ – 18	гравийно-галечниковый грунт
ИГЭ – 25	суглинок легкий текучепластичный
ИГЭ – 26	песок мелкий с примесью гальки и гравия (русловой)
ИГЭ – 28	суглинок легкий пылеватый мягкопластичный с включением гравия и гальки
ИГЭ – 29	суглинок легкий текучепластичный с включением гравия и гальки
ИГЭ – 35	супесь пылеватая текучая

Поэтому необходимо принимать во внимание, что реакция отторжения при строительстве трубопроводного транспорта в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов будет так или иначе проявлять себя. Что, в конечном счете, будет выражено в некотором денежном эквиваленте – ущербе.

Это актуализирует вопросы по оценке геокриологических рисков, возможных ущербах, вызванных негативным влиянием криогенных процессов на строительство и режим работы трубопроводного транспорта.

Для решения проблем оценки ущербов и риска отказов магистральных трубопроводов, других вопросов практики очень часто необходимо иметь общие характеристики, т.е. рассматривать трубопровод как единое сооружение и оценивать частные риски в относительных количественных показателях.

Кроме этого совершенно не разработаны вопросы, касающиеся оценки рисков, связанных с деформациями сооружения под воздействием изменения геокриологических условий и развития опасных криогенных (мерзлотных) процессов в грунтах основания. Поэтому общепринятой методики оценки таких рисков не существует.

Область оценки криогенных, особенно геокриологических рисков, очень обширна и практически не разработана. К геокриологическим рискам можно отнести риски, связанные с опасными криогенными процессами в грунтах основания, проявление и активизация которых обусловлена изменениями теплообмена на поверхности. К таким изменениям относятся и колебания климата, которыми человечество не умеет управлять и не

может изменить. В настоящей статье под геокриологическим риском понимается опасность деформаций сооружения как следствие изменения геокриологических условий в грунтах основания, а предметом оценки являются геокриологические риски развития деформаций опорной компоненты ГТС, тесно связанных с колебаниями климата следующих криогенных процессов:

- термокарста - криогенного процесса, характерного и обычного для периодов потепления климата;

- пучения (площадного и неравномерного, сезонного и многолетнего), которое наблюдается в промерзающих грунтах.

Оценка риска выполнена для участка трубопровода надземной прокладки со свайными фундаментами, наиболее уязвимыми для процессов, обусловленных колебаниями климата. Этот участок рассматривался в качестве геотехнической системы, т.е. как целое, в пределах которого возможны деформации, связанные с проявлениями криогенных процессов. Такой подход дал возможность оценить удельный геокриологический риск опасных деформаций системы в относительных единицах.

Были использованы следующие методические приемы: группировка грунтов по ведущему опасному признаку, классификация разрезов, типизация разрезов, теплотехнические расчеты, анализ результатов.

Для оценки геокриологических рисков трассы трубопровода была проведена типизация инженерно геологических элементов (ИГЭ), которые были выявлены в разрезе по изменчивости частных значений показателей физико-механических свойств грунтов (табл. 1).

На первом этапе был выполнен анализ неоднородности инженерно-геологических характеристик грунтов основания по оси трассы трубопровода по имеющимся данным. Для этого были рассмотрены разрезы грунтов для определения мощностей и площади распространения данных нам ИГЭ.

На втором этапе были выделены группы ИГЭ со схожими физическими и теплофизическими свойствами и в каждой группе было выделено по одному ИГЭ, наиболее характерному для этой группы и опасному для развития одного из потенциально опасных криогенных процессов - пучения либо термокарста. 36 типов встречающихся по оси трассы ИГЭ были объединены в 9 групп ИГЭ с разной литологически обусловленной опасностью развития процессов (пучения либо термокарста) - 5 групп для многолетнемерзлых грунтов и 4 группы для талых). Результаты группировки приведены в таблице 2.

На третьем этапе с использованием такой группировки ИГЭ выделялись типовые разрезы. Конкретные разрезы (конкретных скважин) были классифицированы в виде таблицы, в которой приведены данные по местоположению участка трассы (пикеты), номеру скважины, глубине протаивания и выявленные типы разрезов с учетом группировки по ИГЭ и их мощности. Пример вида классификации участков трассы приведен на рисунке 1. Таким образом, было выделено триста пятьдесят два участка трассы трубопровода. Затем были выделены наиболее часто встречающиеся – типичные, разрезы. Однако для оценки степени геокриологических рисков необходимо проанализировать инженерно-геологические условия трассы трубопровода и выявить – выделить, наиболее опасные и наименее опасные участки трассы.

Имея данные по льдистости грунтов и пучинистости можно оценить опасность развития одного из рассматриваемых в работе криогенных процессов (термокарст, пучинистость). Получив классифицированные участки трассы трубопровода, из всех типов разрезов были выделены наиболее типичные и наиболее опасные для этой трассы.Таким образом, было получено семнадцать типовых разрезов для линейной части (за исключением переходов через водотоки и участков, для которых не имеется достоверной информации о температуре ММП), которые были использованы для формирования модели исходных данных при моделировании теплового взаимодействия трубопровода с вмещающими грунтами основания. Прогнозная оценка теплового воздействия трубопровода необходима для оценки рисков техно-природных криогенных процессов (пучения или термокарста) в процессе эксплуатации.

Таблица 2 – Группировка ИГЭ

Многолетнемерзлые грунты	
Наиболее опасный ИГЭ	Группа ИГЭ, сходных по свойствам для развития опасных процессов
ИГЭ – 1	ИГЭ – 1
ИГЭ – 4	ИГЭ – 4, ИГЭ – 2, ИГЭ – 20, ИГЭ – 3, ИГЭ – 4, ИГЭ – 5, ИГЭ – 8, ИГЭ – 30, ИГЭ – 34
ИГЭ – 7	ИГЭ – 7, ИГЭ – 9
ИГЭ – 27	ИГЭ – 27, ИГЭ – 21, ИГЭ – 22, ИГЭ – 31, ИГЭ – 32
ИГЭ – 33	ИГЭ – 33, ИГЭ – 36
Талые грунты	
ИГЭ – 12	ИГЭ – 12, ИГЭ – 11
ИГЭ – 15	ИГЭ – 15, ИГЭ – 16, ИГЭ – 18, ИГЭ – 26
ИГЭ – 25	ИГЭ – 25, ИГЭ – 13, ИГЭ – 14, ИГЭ – 28, ИГЭ – 29
ИГЭ – 35	ИГЭ – 35, ИГЭ – 17

Используя программу «WARM» для теплотехнических расчетов, температурные замеры грунтов на глубине до 10 м, теплофизические данные грунтов и данные о снегонакоплении по метеостанции, итерационным подбором определялась эффективная величина (норма) снега на каждом выделенном участке трассы трубопровода и затем вычислялась глубина протаивания грунтов при техногенном накоплении снега (в 1,5 раза больше нор-

	A	B	C	D	E
1	пикет				
2	начало	конец	№осн. скв.	глубина протаивания	ИГЭ
3	0	2	3	1	4
4	2	6	13	1	4
5	6	7	15	1	1(0,5), 4
6	7	10	переход через ручей		
7	10	15	22	1	1(1,1), 4
8	15	17	24	1	1(1,1), 4
9	17	19	26	1	1(1,1), 4
10	19	22	28	1	1(0,5), 4
11	22	26	29	1	1(0,5), 4
12	26	28	31	1	1(0,5), 4
13	28	30	32	1	1(1,1), 4
14	30	38	35	1	1(0,5), 4
15	38	40	37	1	4
16	40	42	39	1	4
17	42	45	40	0,5	4
18	45	47	42	0,5	4
19	47	51	43	0,5	4
20	51	53	45	0,5	4
21	53	57	46	0,5	4
22	57	61	48	0,5	4
23	61	63	50	0,5	4
24	63	65	51	0,5	1(0,5), 4
25	65	69	52	0,5	1(0,5), 4
26	69	71	55	0,5	1(1,7), 4
27	71	73	57	0,5	1(4), 4

Рисунок 1 – Пример классификации участков трассы

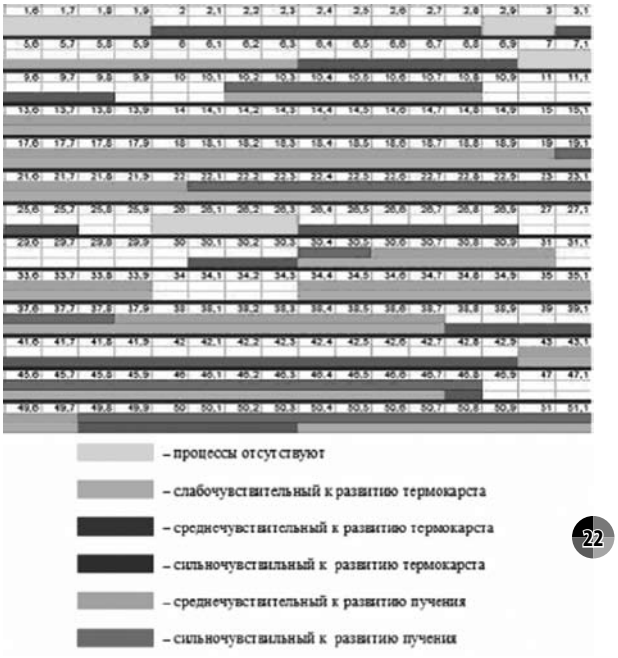


Рисунок 2 – Пример графического изображения результатов оценки риска деформаций, обусловленных развитием опасных криогенных процессов по оси трассы трубопровода

мы), т.е. с учетом влияния надземного способа прокладки трубопровода. Таким образом, расчетным путем определялось косвенное влияние трубопровода на глубину протаивания грунтов, исходя которого можно оценивать возможность развития опасных техно-природных криогенных процессов, воздействие которых будут испытывать свайные фундаменты в процессе эксплуатации.

Для удельной оценки риска деформаций, обусловленных развитием опасных криогенных процессов по оси трассы трубопровода, в работе использована формула 1.

криогенных процессов по оси трассы трубопровода, в работе использована формула 1.

$$U = l / L, \quad (1),$$

где U – развитие соответствующего геокриологического процесса, уд. ед.;

l – протяженность участков, на которых развивается опасный геокриологический процесс, км;

L – протяженность оцениваемой трассы, км.

Помимо этого риск деформаций по каждому процессу был оценен исходя из чувствительности грунтов основания для проявления опасных процессов по оси трассы трубопровода с выделением участков с разной степенью риска деформаций фундаментов.

В результате были определены удельный риск деформаций выпучивания фундамента, связанный с развитием процессов неравномерного выпучивания в процессе промерзания (сезонного, многолетнего) и удельный риск деформаций осадки фундамента связанный с развитием процессов термокарста в процессе оттаивания. Неравномерность этих процессов и представляет наибольшую опасность.

Графическое изображение результатов оценки риска деформаций, обусловленных развитием опасных криогенных процессов по оси трассы трубопровода представлены на рисунке 2.

Список литературы

1 - Добываем нефть и газ: технологии добычи нефти, переработки нефти [Электронный ресурс] / - Взаимовлияние систем трубопроводного транспорта и природной среды.

Режим доступа: http://oilneft.ru/?p=107

2 - Анисимов, О.А., Лавров, С.А. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных обьектов ТЭК. // Технологии ТЭК. 2004. № 3: с. 78 - 83.

3 - Вартанова, О.В. Методические подходы к оценке надежности и экологической безопасности промысловых трубопроводов. // Нефтяное хозяйство. 1998, № 11, с. 47 - 48.

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОД ЛАБОРАТОРНЫМ КОРПУСОМ ИГАРСКОЙ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИМЗ СО РАН.

С.В. Познаркова, Н.И. Тананаев

Игарская геокриологическая лаборатория –
филиал Учреждения Российской академии наук Институт мерзлотоведения
им. П.И. Мельникова СО РАН e-mail: igl@igarka.net

В работе кратко описаны результаты применение поверхностного фундамента-оболочки в северном строительстве. Элементы геотехнического мониторинга были внедрены в 2010 г. для анализа устойчивости лабораторного корпуса Игарской геокриологической лаборатории ИМЗ СО РАН. Инженерно-геологические изыскания, выполненные параллельно с геотермическими исследованиями и нивелировками основания позволили сделать вывод о том, что основной угрозой устойчивости здания является его просадка. Дополнительные напряжения в конструкции создаются также неравномерным морозным пучением.

Введение

С самого начала истории северного строительства отмечены многочисленные случаи деформаций зданий и сооружений, связанные с изменением геотемпературных условий грунтов оснований в ходе их эксплуатации. Чаще основной причиной деформаций является потеря несущей способности грунтов вследствие деградации многолетнемерзлых пород (ММП). Реже в качестве причины выступают касательные и нормальные силы пучения, развивающиеся при новообразовании и аградации ММП [1].

Город Игарка расположен в 160 км от Северного полярного круга, в достаточно суровых климатических условиях. Среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции Игарка составляет -8,2°С, средняя скорость ветра 4,0 м/с, среднее число морозных дней в году более 250. При таких условиях всегда имеется температурный потенциал для образования многолетнемёрзлых толщ (ММТ), хотя в целом для региона характерно их прерывистое и островное распространение. Температурное состояние грунтов связано с их механическим составом: в талом состоянии преимущественно находятся крупноскелетные грунты, в то время как глины и суглинки ниже сезонно-талого слоя чаще всего являются многолетнемёрзлыми. Максимальная мощность ММТ в пределах города составляет около 40 м, температуры грунтов (на глубине нулевых теплооборотов) колеблются в пределах от -0,1°С до -0,4°С. Наблюдениями в натурных условиях и расчетами установлено, что азональный характер мерзлотных условий обусловлен отепляющим влиянием снега и, в меньшей степени, локальными гидрогеологическими условиями [2,3].

Строительство на Енисейском Севере осуществляется обычными для северных территорий методами: применяют, как правило, свайные фундаменты, глубина погружения которых зависит от физико-механических свойств рыхлых грунтов основания, а также от наличия скальных пород. В таликах прочность грунтов незначительна, к тому же они довольно часто водонасыщены. В таких случаях обычно применяют свайные фундаменты глубокого заложения, что существенно удорожает строительство. Впрочем, многочисленные примеры деформаций отмечены и для этого типа фундаментов, в частности, на мостовых переходах Норильской железной дороги, обследованных специалистами ИМЗ СО РАН в полевой сезон 2010 г., деформируются устои мостов («башмаки»), опирающиеся на группы из 16 висячих свай проектной длиной 40 м.

Свайные фундаменты являются наиболее распространённым типом фундамента, использовавшимся при массовом промышленном и гражданском строительстве в г. Игарка. Однако региональная специфика инженерно-геокриологических условий (островное распространение ММТ, широкое распространение высокотемпературных и сильнольдистых толщ, локальная засолённость грунтов) наряду с недоучётом температурной динамики оснований в период строительства и эксплуатации зданий неоднократно приводили к деформациям последних (вплоть до полной их деконструкции). В связи с этим коллективом Игарской научно-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения СО РАН разработан оригинальный тип фундамента – поверхностный вентилируемый пространственный фундамент-оболочка (рис. 1). С целью изучения напряженно-деформированного состояния и прочности элементов систем «основание-фундамент» и «основание-фундамент-здание» Игарской НИМС в 1980-е годы были проведены многочисленные модельные и натурные испытания фрагментов фундамента [4], на основании которых разработаны оптимальные конструкции фундаментов-оболочек. В конце 1980-х – начале 1990-х гг. было также выполнено экспериментальное проектирование и строительство зданий различной этажности на площадках, имеющих различные инженерно-мерзлотные условия в городах Игарке и Норильске [5,6].

В настоящее время из сохранившихся и эксплуатируемых с момента строительства зданий,

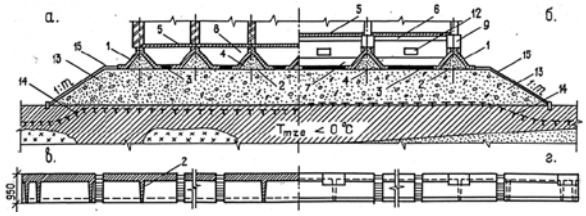


Рисунок 1 - Схема строения фундамента-оболочки на мерзлых грунтах.



Рисунок 2 - Здание административно-бытового комбината в г. Норильске, 2011 г.



Рисунок 3 - Торцевая часть секции фундамента лабораторного корпуса ИГЛ (с бетонной заглушкой).

построенных на фундаменте этого типа, самым крупным остаётся здание лабораторного корпуса Игарской НИМС (в настоящее время – Игарская геокриологическая лаборатория) ИМЗ СО РАН. Здание административно-бытового комбината в г. Норильске заброшено и в настоящее время не эксплуатируется (рис. 2), а экспериментальный гараж-стоянка с отоплением в г. Игарке в силу эксплуатационных причин демонтирован.

Здание лабораторного корпуса расположено на второй надпойменной террасе р. Енисей в черте существующего 1 микрорайона г. Игарки. Поверхность террасы заболочена, имеет уклон к юго-западу, абсолютные отметки поверхности террасы находятся в пределах от 28 до 45 м. Пространственный фундамент был организован на талых грунтах, однако для него также была отсыпана песчано-гравийная подушка мощностью до 2 м. Вентиляционные каналы в торцевых секциях фундамента были заделаны бетонными заглушками (рис. 3).

Первые признаки деформации здания лабораторного корпуса начали появляться уже в первые годы после его строительства, пока происходила «усадка» изолирующей подсыпки под действием веса здания. В настоящее время внутренние и, меньше, внешние стены секутся трещинами, в основном проходящими по оконным и дверным проемам. Наибольшее раскрытие трещин на внутренних поверхностях от 4 до 6 мм, на внешних – от 2 до 4 мм. Причины нарушения целостности здания, однако, до последнего времени оставались неисследованными – во время строительства были нарушены установленные для целей мониторинга марки на отдельных элементах фундамента, наблюдательные термоскважины оборудованы не были. В то же время в процессе эксплуатации здания могло произойти нарушение естественного температурного режима грунтов основания, что в свою очередь способно привести к нарушению безопасности его функционирования. Для г. Игарка в целом характерно возникновение аварийных ситуаций на объектах строительства, связанное с аградацией мёрзлой толщи в ходе эксплуатации зданий и прилегающих территорий (особенно связанное с удалением снежного покрова с придомовых территорий и внутриквартальных проездов) [1].

В июне 2010 г. для уточнения температурного состояния грунтов под зданием, выявления потенциально негативных геокриологических процессов и, впоследствии, предотвращения дальнейших деформаций строения были организованы натурные наблюдения, которым коллектив пытался придать комплексные очертания. В их состав вошли инженерно-геологические изыскания, геотермический мониторинг и наблюдение за стенными марками. В настоящей обзорной работе суммированы результаты годового цикла мониторинговых исследований, охарактеризованы современные инженерно-геологические и инженерно-мерзлотные условия, сделаны предварительные выводы о состоянии грунтового основания здания, негативных процессах и их тенденциях.

Инженерно-геологические условия

Для уточнения инженерно-геологических условий основания были пройдены с отбором керна 3 скважины на незначительном расстоянии от стен здания и 1 скважина – в контуре здания (схема приведена на рис. 4). По данным изысканий определена следующая характеристика слагающих участок отложений. В геологическом строении участка участвуют покровные делювиальные суглинки, аллювиальные и ледниковые – гравелистые супеси, гравийно-галечниковые грунты и эффузивная туфобрекчия – скальная порода (вскрывается на глубине от 4,9 до 6 м). По данным механического анализа верхняя часть разреза (до 2,1 м) сложена гравийно-песчано-цементной смесью. Средняя часть разреза от подошвы отсыпки до кровли скальных пород сложена суглинками, в основном легкими пылеватыми суглинками и супесями с включениями гравийно-песчано-галечникового

материала (с глубины 2,6 до 5 м). Ниже, от 4,9 м на всю пройденную мощность залегает скальная порода. Ниже приведена краткая геологическая характеристика отобранных кернов по скважинам и инженерно-геологический разрез по линии I-I (рис. 5) [7].

Скважина №1

0,00-0,50 Бетонная плита.

0,50-1,00 Галечниково-гравийная песчано-цементная строительная смесь.

T = 9,6°C, W_{tot} = 18%.

1,00-1,20 Песок гравелистый.

1,20-2,10 Гравий с песчаным заполнителем.

T = 8,0°C, W_{tot} = 9%, p = 1,89 г/см^3.

2,10-3,30 Суглинок легкий, пылеватый, рыхлый, примесь органических веществ.

T = 5,8°C, W_{tot} = 22%, p = 1,96 г/см^3.

3,30-5,00 Супесь пылеватая, с включением гравия.

T = 4,2°C, W_{tot} = 20%, p = 2,0 г/см^3.

5,00-5,50 Эффузивная туфобрекчия.

Скважина №2

0,00-0,10 Бетон

0,10-1,90 Отсыпка дресвяно-гравийная.

T = 10,7-11,4°C, W_{tot} = 6%.

1,90-2,60 Суглинок легкий пылеватый, с массивной криотекстурой.

T = 1,9°C, W_{tot} = 23%, p = 1,88 г/см^3.

2,60-3,10 Супесь пылеватая, слоистая с тонкошлировой криотекстурой.

W_{tot} = 46%, p = 1,60 г/см^3.

3,10-4,00 Суглинок пылеватый, с сетчатой криотекстурой.

T = -0,3°C, W_{tot} = 22%, p = 1,99 г/см^3.

4,00-4,90 Супесь пылеватая с валунами, с массивной криотекстурой.

T = 0,4°C, W_{tot} = 24%, p = 2,06 г/см^3.

4,90-5,10 Супесь галечниковая.

W_{tot} = 17%.

5,10-5,50 Эффузивная туфобрекчия.

T = 1,2°C.

Скважина № 3

0,00-1,60 Отсыпка гравийная с песчаным заполнителем, валуны до 20 см и более.

T = 11,6°C, W_{tot} = 9%, p = 2,09 г/см^3.

1,60-2,30 Супесь пылеватая с сетчатой криотекстурой. Редкие включения гравия.

T = 5,2°C, W_{tot} = 45%, p = 1,70 г/см^3.

2,30-2,60 Суглинок пылеватый с массивной криотекстурой.

W_{tot} = 31%, p = 1,91 г/см^3.

2,60-2,90 Галечниковый грунт, на глубине 2.65 м вскрыты грунтовые воды.

W_{tot} = 18%.

2,90-3,65 Суглинок легкий пылеватый с сетчатой криотекстурой.

T = -0,3°C, W_{tot} = 25%, p = 1,90 г/см^3.

3,65-4,60 Грунт галечниковый с массивной криотекстурой. С 4 м включает обломочный материал и камни.

T = 0,9°C, W_{tot} =14%.

4,60-4,90 Гравий с песчаным заполнителем.

T = 1,7°C.

4,90-5,50 Эффузивная туфобрекчия.

Скважина №4

0,00-0,10 Бетонная плита.

0,10-1,60 Отсыпка песчано-гравелисто-галечниковая.

T = 14,1°C, W_{tot} = 6%.

1,60-1,90 Галечниковый грунт.

T = 4,7°C, W_{tot} =46%, p = 1,64 г/см^3.

1,90-3,50 Супесь пылеватая, сетчатая криотекстура. На глубине 2 м встречаются растительные остатки, насыщенные водой.

T = -0,3°C, W_{tot} = 22%, p = 2,01 г/см^3.

3,50-5,00 Песок гравелистый с массивной

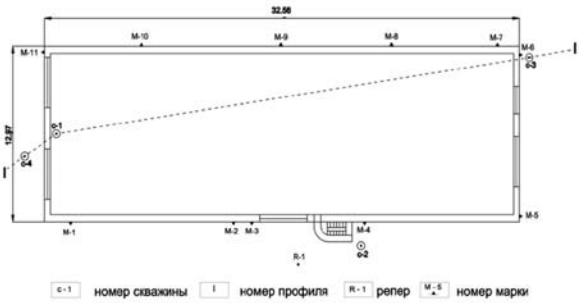


Рисунок 4 - План геокриологических скважин, настенных марок и инженерно-геологического разреза на территории ИГЛ.

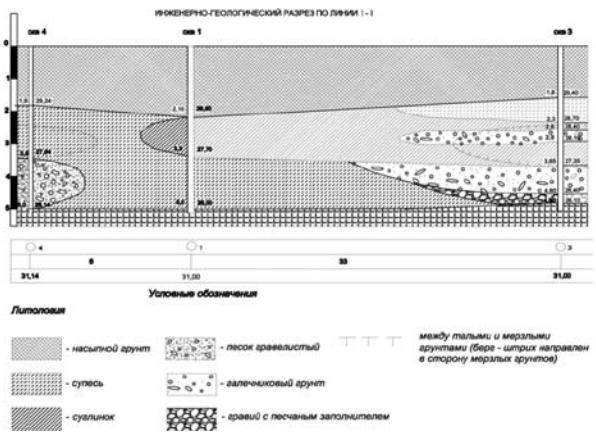


Рисунок 5 - Инженерно-геологический разрез по линии I-I.

криотекстурой.

T = 0,2˚C, W_{tot} = 18%.

5,00-5,50 Эффузивная туфобрекчия.

T = 0,9˚C.

Инженерно-геокриологические условия

Буровые работы проводились в начале летнего периода; дневная поверхность по данным первичных термометрических исследований повсеместно талая, однако во всех скважинах, пройденных вне контура здания, в диапазоне глубин 2.6-3.4 м были вскрыты высокотемпературные (-0.3˚C) сильнольдистые (от 25 до 75%) мёрзлые грунты, суглинистые и супесчаные. Для уточнения геотемпературных полей под зданием в скважинах был организован термический мониторинг, с июля 2010 г. по апрель 2011 г. термогирляндами через 1 м по глубине, с апреля 2011 г. – термокосами, собранными в ИМЗ СО РАН и установленными непосредственно в скважины, через 0.5 м по глубине. Отличием вновь установленных термокос является отсутствие необходимости определения сопротивлений и последующего их пересчёта в температуры – термокосы подключаются напрямую к портативному компьютеру, программа сбора данных обращается к преобразователю данных и после его опроса сохраняет в память компьютера файл с готовым температурным разрезом. Таким образом, полученный ряд температурных данных не является полностью стационарным из-за смены средств измерения, однако в целом анализ полученных материалов не показал заметных отклонений и несостыковок в рядах. Температурные кривые по скважинам 2-4 приведены на рисунках.

Хорошо заметно значительное охлаждение дневной поверхности на участках, где в зимний период снежный покров удаляется снегоуборочной техникой (скв. 2 и 3). Именно на этих участках, на глубинах 2.7-3.2 м, в суглинистых или супесчаных грунтах, формируются мёрзлые перелетки, полностью протаивающие только к концу сентября. Одного годового цикла геотермического мониторинга, безусловно, недостаточно для окончательных выводов о том, способна ли в этих условиях сформироваться многолетнемёрзлая толща. Однако уже сейчас полученные данные характеризуют антропогенное изменение характеристик снежного покрова как один из мощных локальных факторов техногенного криолитогенеза.

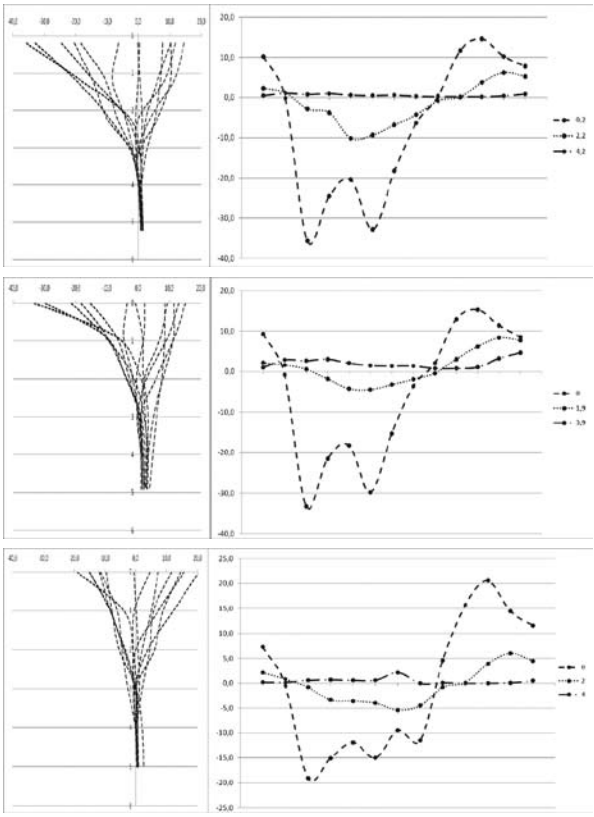


Рисунок 6 - Температурные кривые в скв. 2 (А), 3 (Б), 4 (В).

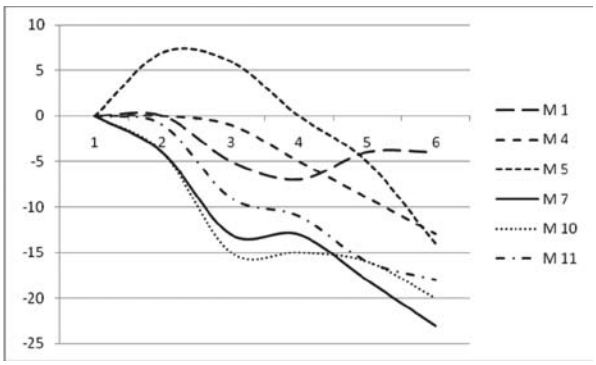


Рисунок 7 - Нивелировочные кривые по некоторым стенным маркам.

Устойчивость основания здания

Для контроля устойчивости основания здания лабораторного корпуса организовано инструментальное наблюдение за высотными отметками стенных марок. С августа 2010 по июнь 2011 г. выполнялась нивелировка системы стенных марок относительно установленной вблизи здания временной закреплённой точки. Результаты последовательных нивелировок, оформленные в графическом виде, приведены на рис. 7. Поскольку при выполнении этого вида мониторинговых работ были встречены определённые затруднения (связанные с недостаточной точностью метода) с зимнего периода 2011-2012 г. нивелировки будут заменены на тахеометрическую съёмку по закреплённым точкам не только в стенах, но и на примыкании фундамента к бетонным плитам, его обрамляющим.

Полученные в ходе нивелировок материалы, хоть и с недостаточной точностью, отражают направленность и темпы смещения основания здания. Основной тенденцией деформаций основания является его направленная просадка со скоростями от 0.5 до 3.5 мм в месяц. Наиболее интенсивная просадка (2.5-3.5 мм/месяц) характерна для северо-восточной секции здания, которая при строительстве отсыпкой была на 4-5 м приподнята относительно уступа тер-

расы. В то же время южная секция здания в начале зимы испытала повышение отметок, после чего просадка продолжилась.

Заключение

Творческим коллективом Игарской геокриологической лаборатории ИМЗ СО РАН в течение 2010-2011 гг. проводились мониторинговые исследования за состоянием грунтового основания и фундамента лабораторного корпуса в г. Игарка. Научный и прикладной интерес к работам такого рода определяется уникальностью самого здания, эксплуатирующегося на экспериментальном пространственном фундаменте-оболочке, а также тем, что это здание единственное, сохранившее свои эксплуатационные характеристики. В рамках исследований были организованы отдельные элементы геотехнического контроля состояния здания: проведены инженерно-геологические изыскания с геотермическими наблюдениями в пройденных скважинах, наблюдаются высотные отметки контура здания, предварительные результаты выполненных работ суммированы выше.

Проведённые работы к настоящему времени позволили выявить основные негативные факторы, воздействующие на устойчивость основания здания. Основным и наиболее опасным для целостности конструкции в целом является её просадка, особенно заметная в северо-восточной секции здания. Вероятнее всего, просадке здесь сопутствует общее смещение строения вниз в направлении уступа II надпойменной террасы. Механизмом, способным обусловить такое развитие процесса, является скольжение слоя отсыпки, перенасыщенного грунтовыми водами, по подстилающим их мёрзлым супесям и суглинкам (по типу солифлюкции) под действием веса здания. В полевой сезон 2012 г. планируется дополнительно к уже проводимым работам организация наблюдений за устойчивостью склона на данном участке. Созданию дополнительных напряжений в конструкции здания способствует неравномерное промерзание грунтового основания южной секции здания с образованием высокольдистых (до 75%) мёрзлых прослоев, что приводит к неравномерному по контуру здания пучению грунтов. Температурный режим грунтов основания определяется здесь удалением снежного покрова в течение всей зимы. Полученные результаты в целом подтверждают сделанные ранее более общие выводы о преобладающей роли новообразования и аградации ММТ как негативного фактора устойчивости сооружений на территории г. Игарка [1].

Список литературы

1. Казанский О.А., Тананаев Н.И. Особенности техногенной трансформации многолетнемерзлой толщи в городах Енисейского Севера // Промышленное и гражданское строительство. 2010. – №11. – С.21-23.

2. Григорьев Н.Ф. Мерзлотно-гидрогеологические особенности района г. Игарки.- Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 1992.- 56 с.

3. Казанский О.А. Криотекстурный метод реконструкции палеомерзлотных условий. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 1996. –100 с.

4. Гончаров Ю.М. Эффективные конструкции фундаментов на вечномерзлых грунтах.– Новосибирск: Наука, 1988 г. – 190 с.

5. Гончаров Ю.М. Эффективный тип фундамента для строительства на многолетнемёрзлых грунтах // Наука и техника в Якутии. 2004. - №1(6).- С. 20-23.

6. Гончаров Ю.М. Опыт строительства зданий на обводнённых таликах // Наука и техника в Якутии. 2006. – №1(10) . – С. 12-16.

7. Познаркова С.В., Зепалов Ф.Н. Оценка 20-летней эксплуатации фундамента-оболочки в г. Игарка // Труды IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. – 4 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ В КРИОЛИТОЗОНЕ ЯКУТИИ

Л.Г. Нерадовский[1], В.П. Мельчинов[2]

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, leoner@mpi.ysn.ru
Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, melchvp@sitc.ru

На примере инженерно-геологических условий г. Якутска описаны некоторые результаты экспериментальных исследований в условиях in situ температурной зависимости затухания амплитуды сигналов георадиолокации в слое годовых теплооборотов. Показывается, что эта зависимость имеет вероятностный характер и наблюдается на застроенной территории в виде нелинейной корреляционной связи среднего показателя затухания со средней температурой мёрзлых дисперсных грунтов в слое годовых теплооборотов ниже сезонноталого слоя и со среднегодовой температурой вечномёрзлой толщи на подошве этого слоя. Представлен анализ ошибок определения средних характеристик температурного поля, вычисленных по записям сигналов георадиолокации с использованием уравнений регрессии. Предлагается использовать термозависимое свойство – затухание для неразрушающего контроля и прогноза тенденций изменения во времени и по площади застроенных территорий уровня и направленности температурного поля, происходящих в мёрзлых грунтовых основаниях инженерных сооружений под влиянием климата и техногенеза. Высказаны соображения о совместном использовании георадиолокации и термометрии скважин для построения комплексных мониторинговых температурных сетей в освоенных и осваиваемых районах не только Якутии, но и северных территорий России.

Введение

На территории г. Якутска, которую зачастую называют “Большим Якутском”, накоплен очень большой объём фактического материала по термометрии и георадиолокации инженерно-геологических скважин, пробуренных преимущественно проектно-изыскательскими организациями в 80-90-х годах прошлого века. Из имеющегося архивного материала, касающегося экспериментального изучения температурной зависимости сигналов георадиолокации в камеральных условиях, только малая его часть заново переосмыслена, обработана на более высоком техническом уровне и опубликована [1, 2].

Кроме этой публикации есть публикации, освещающие опыт первого натурного эксперимента, поставленного в ноябре 2009 г. в жилом секторе г. Мирного [3], затем камерального эксперимента по материалам изыскательских работ в г. Нерюнгри [4]. И, наконец, обобщающие публикации по экспериментам в центрах освоенных районов криолитозоны Якутии [5-7].

В настоящей статье приведены ещё не опубликованные последние данные (за 2010-2011 гг.). В них описана методика проведения серии экспериментов в натурных условиях и результаты, полученные Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН совместно с сотрудниками кафедры радиотехники Северо-Восточного Федерального Университета (СВФУ) им. М.К. Аммосова в ходе реализации программы государственного контракта №753 по геокриологическому мониторингу территории административных округов г. Якутска.

Постановка проблемы и путь её решения

Одной из проблем освоенных и осваиваемых северных территорий России является острейшая научно-техническая проблема создания полноценных мониторинговых сетей температурного контроля, которые бы охватывали не только мёрзлые грунтовые основания зданий и сооружений, пришедших в аварийное состояние, но и всю площадь селитебных и промышленных зон урбанизированных территорий. При этом сети должны обеспечивать не кратковременный, а долговременный контроль динамики температурного состояния мёрзлых грунтовых оснований инженерных сооружений в течение их строительства и всего нормативного срока эксплуатации.

Попытки построить такие сети на базе использования только одного традиционного метода термометрии скважин не привели к желаемым результатам. Причина кроется в дороговизне организации, построении и эксплуатации таких сетей. К тому же, бурение большого количества скважин для обустройства равномерной сети контроля не только дорого, но и не везде возможно и разрешено на застроенной территории муниципалитетов населённых пунктов. Более того, пробуренные и обсаженные скважины трудно сохранить длительное время для режимной термометрии. Чаще всего, через несколько лет после установки скважин они приходят в негодность из-за забивки бытовым мусором, смятия обсадных труб техникой или закупорки ледяными пробками.

Путь решения обозначенной важной народно-хозяйственной проблемы напрашивается сам собой. Это дополнение термометрии скважин быстрыми и недорогими геофизическими методами. Среди известных методов геофизики криолитозоны таковым, безусловно, является метод геора-

диолокации. Благодаря технико-конструктивным решениям и физической основе этот метод обладает лучевыми свойствами и способен с высокой точностью и разрешением изучать строение, состояние, а также количественно оценивать показатели некоторых важных физико-химических и механических свойств мёрзлых грунтов.

Приведённые выше ссылки на публикации показывают, что георадиолокации вполне под силу изучение температуры многолетнемёрзлых пород, используемых в качестве грунтовых оснований инженерных сооружений. Эта ранее неизвестная возможность георадиолокации содержит в себе большой инновационный потенциал и потому представляет в настоящее время и ближайшее будущее предмет пристального научного внимания и систематического изучения, прежде всего, применительно к нуждам строительной индустрии и жилищно-коммунального хозяйства.

Пока речь идёт о расширении географии научно-исследовательских работ (НИР) на территории Якутии с целью проверки и выяснения инженерно-геокриологических условий применимости экспериментально обнаруженной температурной зависимости затухания амплитуды сигналов георадиолокации.

В дальнейшем, при получении положительных результатов, НИР по изучению температурной зависимости целесообразно выполнить в других освоенных или осваиваемых районах криолитозоны России. Только после этой всесторонней региональной проверки (экспертизы) температурной зависимости с использованием разных организаций и предприятий есть смысл вести речь о пригодности георадиолокации и его внедрения в производство, как радиометода неразрушающей диагностики, контроля и прогноза температурного состояния мёрзлых грунтовых оснований инженерных сооружений в масштабах всей страны.

Методика экспериментов

Для проведения экспериментов в натурных условиях требуется два метода изучения мёрзлых грунтовых сред: георадиолокация и термометрия скважин.

Метод термометрии производится в специально оборудованных скважинах и заключается в измерении разными приборами какой-либо термочувствительной физической величины, материала, вещества. К таковым относятся, например, электрическое сопротивление электротехнических материалов (электронных проводников или полупроводников), частота колебания струны или, что привычнее и нагляднее, высота столбика спирта или ртути в термометрах различного назначения. Все они приводятся в количественное соответствие с температурой посредством разнообразных градуировок в виде таблиц или эмпирических и аналитических зависимостей.

Выбор способа термометрии зависит от решаемых научно-практических задач и требуемой для их решения, точности нахождения температуры.

Сделаем небольшое отступление в сторону терминологии.

Употребление словосочетания «нахождения температуры» не случайно. Строго говоря, говорить об измерении температуры некорректно. В каком-то смысле это справедливо и оправдано, когда человеческий глаз снимает показания температуры по шкале термометров или иных приборов с температурной шкалой. Во всех остальных случаях следует говорить о вычислении температуры по математическим моделям (функциональным или вероятностным) зависимости с выбранной термочувствительной физической величиной.

В настоящее время в производстве изыскательских работ и научных исследованиях в области инженерной геологии и геокриологии продолжают широко использоваться в качестве термочувствительного датчика терморезисторы. Они тщательно подбираются по параметрам, градуируются по специальной методике [8] с высокой точностью (порядка ±0,01 оС), а затем монтируются в так называемые «термокосы» и опускаются в скважины на заданную глубину.

Расстояние между терморезисторными датчиками температур выбирают равномерным или неравномерным. Неравномерный вариант обычно используется при геотермии глубоких поисково-разведочных геологических ли гидрогеологических скважин.

В инженерно-геокриологических исследованиях для изучения температурного режима мёрзлых грунтовых сред неглубокими скважинами (до 10-20 м) чаще используется равномерный вариант с размещением терморезисторов по стволу скважин через один метр.

Такая схема термометрии скважин была применена для многоразового определения температуры слоя мёрзлых грунтов до глубины 10-12 м при проведении геокриологического мониторинга на территории г. Якутска. Выбор глубины бурения скважин оптимален. Ограниченный сметной стоимостью объём буровых работ обеспечивают проходку скважин до глубины залегания нижней границы (подошвы) слоя годовых теплооборотов (СГТ).

По результатам обобщений многолетней термометрии, полученных ИМЗ СО РАН для района г. Якутска, подошва СГТ имеет тенденцию залегать на глубине 12-15 [9].

По другим сведениям (мониторингу экзогенных процессов и опасных явлений, проведённому Якутской поисково-разведочной экспедицией в 2000-2003 гг.) подошва СГТ на застроенной территории г. Якутска колеблется в большем диапазоне глубин, но в большинстве случаев находится на глубине 10 м.

Заметим, что на глубине залегания подошвы СГТ с неизменной температурой грунтов в годовом цикле по требованиям СНиП должно устанавливаться острие висячих свайных фундаментов в

мёрзлых дисперсных грунтах. В действительности это не всегда выполняется в ходе строительных работ, как и режимная термометрия в годовом цикле, которая обязательно должна проводиться изыскательскими организациями для установления истинного положения подошвы слоя годовых теплооборотов под каждым зданием или сооружением.

Первичным материалом эксперимента со стороны термометрии служили две важнейшие характеристики температурного поля верхней части криолитозоны, которые используются проектировщиками для задания критических температур нормальной работы свайных фундаментов. Это эквивалентная средняя температура мёрзлых грунтов в СГТ ниже залегания сезонноталого слоя ($t_э$) и среднегодовая температура вечномёрзлой толщи на подошве СГТ (t_z).

Обозначения характеристик температурного поля приняты условно.

Характеристика $t_э$ даёт необходимое представление о тепловом состоянии или температурном режиме в зоне работы боковой поверхности свайных фундаментов за счёт сил сцепления с мёрзлыми грунтами. Характеристика t_z дополняет это представление в зоне работы острия свайных фундаментом на глубине их установки.

Обе характеристики являются независимыми переменными в матрице эксперимента.

Надо сказать, что точность их определения в реальных условиях из-за влияния различных не учтённых и не контролируемых факторов, например, неплотной и неравномерной засыпкой грунта между датчиками «термокосы» и поверхностью обсадной трубы скважины, снижается на порядок по сравнению с точностью градуировки в лабораторных условиях, т.е. до уровня ±0,1 оС. Причём, точность определения температуры распределена неравномерно не только по глубине скважин, но и по диапазону изменения значений температурного поля. Всё это нужно учитывать при сравнении температур мёрзлых грунтов, полученных методом термометрии и методом георадиолокации.

Метод георадиолокации состоит в производстве дискретных или непрерывных записей сигналов с поверхности Земли с использованием разных моделей георадаров и антенных устройств.

Для постановки эксперимента был использован георадар "ОКО-2" с антенной АБ-250, работающей в воздушном пространстве на центральной частоте спектра радиоизлучения 250 МГц. На этой частоте при максимальной длительности записи сигналов (до 400 нс.), глубина изучения толщи мёрзлых песчано-глинистых грунтов достигала 8-12 м, т.е. в среднем соответствовала глубине термометрии скважин.

Полевая часть эксперимента выполнена в 2 этапа.

Первый этап разведочный. На нём записи сигналов были сделаны в сентябре-октябре 2010 г. по 17 точкам скважин. К сожалению записи сигналов георадиолокации не удалось сделать своевременно, т.е. сразу же после термометрии скважин. Разрыв по времени достигал одного года.

Второй этап эксперимента основной. Он начался в марте 2011 г. после получения положительных результатов на первом этапе. Записи сигналов сделаны по 38 точкам скважин и тоже с опозданием на целый год.

Записи сигналов производились в непрерывном режиме по линиям коротких одиночных профилей, заданных вблизи устья скважин. Длина профилей 6-18 м. Местоположение и ориентация линий профилей выбиралась произвольно и зависела в основном от плотности застройки и характера дневной поверхности.

Каждая трасса сигнала, записанная по линии профиля, рассматривалась, как случайная амплитудно-фазовая реализация импульсов, отражённых, рассеянных и дифрагированных от плоских границ грунтовой среды и её неоднородностей.

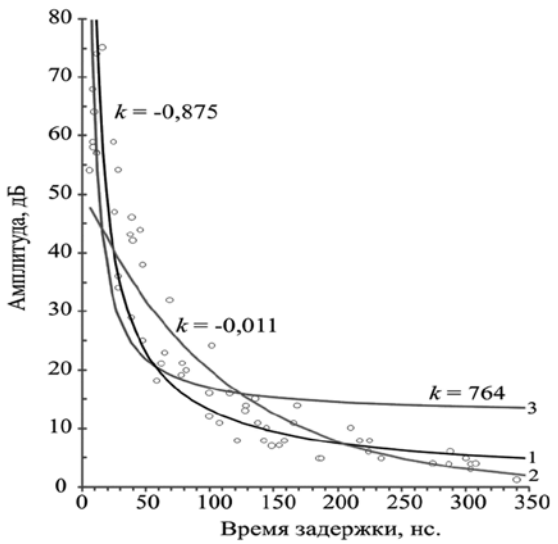


Рисунок 1 - Пример аппроксимации поля амплитудно-фазовых вариаций импульсов в линейной группе из 5 трасс сигналов для определения среднего показателя затухания k: 1 – степенная функция $A = \alpha_0 \cdot \tau^k$, 2 – экспонента $A = \alpha_0 \exp^{(-k\tau)}$, 3 – гипербола $A = \alpha_0 + k/\tau$

Совокупность трасс, очищенная от явно бракованных трасс и трасс, осложнённых сильными индустриальными помехами и природными шумами, являлась первичным материалом для определения среднего показателя затухания амплитуды сигнала георадиолокации в диапазоне временных задержек, соответствующего заданной глубине изучения разреза до 10 м. Такие определения сделаны в 55 точках скважин термометрии. В качестве показателя затухания принимался показатель степенной функции k. Она лучше экспоненциальной и гиперболической функций описывает на фоне случайных вариаций затухание амплитуды сигналов георадиолокации в самых главных частях: начальной и дальней зоне временных задержек (рис. 1).

Методика линейного группирования трасс сигналов для нахождения среднего k учитывает их стохастическую природу, но не учитывает, в отличие от методики площадного группирования, анизотропию мёрзлых аллювиальных от-

ложений долины р. Лены, слагающих грунтовые основания инженерных сооружений г. Якутска.

В матрице эксперимента величина k является зависимой переменной.

Точность определения k зависит от способа сбора и накопления первичного материала, количества реализаций сигналов, собранных возле точек скважин, знания средней скорости по разрезу, способа аппроксимации случайных вариаций сигналов.

В рассматриваемом случае при плотности записи 12 трасс/метр на каждой скважине записано по 72-216 реализаций сигналов. Это большой объём информации, которого с избытком хватает, чтобы определять k с точностью более 1%. Для его обработки требуются компьютерные программы, написанные по алгоритму, составленному автором. Таких программ пока нет. Поэтому обработку сигналов и вычисление k приходится выполнять ручным способом.

Накопленный опыт изучения температурных зависимостей говорит о том, что стремиться к высокой точности вычисления среднего показателя затухания k нет смысла по той причине, что на эту величину помимо температуры действуют иные мерзлотно-грунтовые факторы, а также неизбежные ошибки, связанные с поверхностными условиями записи сигналов. Имеется в виду неровный контакт поверхности антенн с дневной поверхностью. Совместное влияние упомянутых факторов нивелируют и обесценивают высокую точность вычисления k.

Таблица 1 - Точность вычисления k в зависимости от общего числа зарегистрированных импульсов в сигналах георадиолокации в точке СКВ.№13

Число импульсов	Параметры показателя затухания k (отн.ед)		
	Среднее	Асимптота	Ошибка, %
8	-0.561	-0.260	73.3
25	-0.483	-0.260	60.0
41	-0.457	-0.260	55.0
65	-0.401	-0.260	42.7
72	-0.362	-0.260	32.8
88	-0.344	-0.260	27.8
100	-0.323	-0.260	21.6
121	-0.301	-0.260	14.6
143	-0.294	-0.260	12.3
160	-0.273	-0.260	4.9
172	-0.267	-0.260	2.7
207	-0.264	-0.260	1.5
315	-0.263	-0.260	1.1
383	-0.260	-0.260	0.0

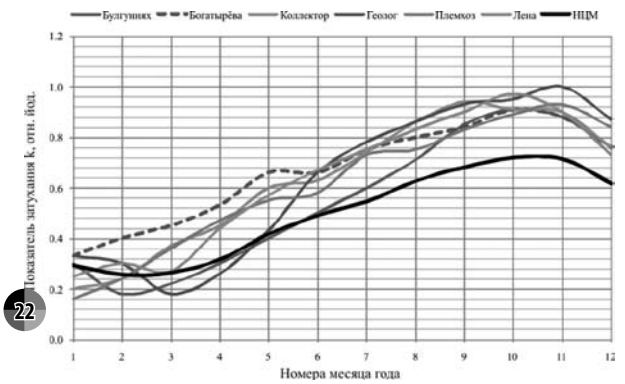


Рисунок 2 - Сезонные вариаций 2001 г. среднего показателя затухания амплитуды сигналов георадиолокации в слое мёрзлых дисперсных грунтов до глубины 10 м. Площадки мониторинга экзогенных процессов и опасных явлений в г. Якутске.

В силу сказанного, при вычислении k достаточно ограничиться точностью не ниже 10-15%, принятой за граничное условие оценки приемлемого качества геофизических работ в нормальных полях. Для достижения такой точности при вышеупомянутой плотности записи будет не обременительно обработать вручную 12-18 трасс сигналов. При условии, что в каждой трассе зарегистрировано в среднем по 10-15 импульсов, образовавшихся в мёрзлой грунтовой среде.

Связь точности вычисления k с количеством зарегистрированных импульсов найдена опытным путём для условий г. Якутска на одной из точек скважин термометрии, участвующих в эксперименте (табл. 1). В качестве относительной меры точности использована разница между частными значениями k и асимптотическим значением k, которое наблюдаются при большом числе зарегистрированных импульсов. Это значение принято, как выборочная оценка, близкая к истинному значению в генеральной совокупности с бесконечным числом определений k.

Прежде, чем начать изучение корреляционной связи между переменными матрицы эксперимента, нужно было привести значения k к одному временному уровню, т.е. к какому-то одному сезону года. Зачем это нужно делать, станет понятным из рассмотрения рис. 2.

Из представленных графиков видно, что в разное время года на одном и том же месте и в одном и том же слое среднее затухание амплитуды импульсов не остаётся постоянным и носит характер монотонного возрастания в направлении от зимы к осени. Минимальное затухание наблюдается преимущественно в феврале-марте, а максимальное – в октябре-ноябре, т.е. в то время года, когда сезонноталый слой (СТС) полностью промерзает или достигает максимальной мощности.

Если не обращать внимания на детали, то черты монотонных сезонных вариаций затухания сохраняются в разных местах застроенной части г. Якутска. На фоне непостоянства абсолютных значений затухания просматривается пространственная устойчивость относительного его роста в годовом цикле. Такая закономерность с высоким уровнем детерминации (R2=0,887) описывается уравнением полинома 3-го порядка:

$$k = -0{,}0019 \cdot \tau^3 + 0{,}0319 \cdot \tau^2 - 0{,}0737 \cdot \tau + 0{,}3031, \quad (1)$$

где, τ – номер календарного месяца года.

Уравнение (1) важно тем, что даёт возможность вычислять устойчивые пространственно-временные оценки среднего затухания для всего г. Якутска. Несмотря на то, что уравнение (1) получено по записям сигналов аппаратурой 17ГРЛ-1, работающей на центральной частоте около 40

МГц, оно вполне пригодно для иных частот и, в частности, частоты 250 МГц, если речь идёт о нахождении сезонных поправок для приведения разновременных значений k, к одному времени года.

Если этого не сделать и собрать разновременный экспериментальный материал в одно целое, то разброс значений k увеличится и станет совсем непредсказуемым. В результате связь с переменной t_z ослабнет, а с переменной $t_э$ и вовсе будет потеряна.

Таблица 2 -Осенняя матрица эксперимента на объектах геокриологического мониторинга г. Якутска в 2009-2010 гг.

Адрес объекта (улица, дом)	Номер СКВ	Дата термометрии	Переменные эксперимента		
			t_z (°C)	$t_э$ (°C)	k (отн.ед.)
Оз. Чочур-Муран	2	11.11.2009	-1.6	-1.65	-0.73
Петровского, 2	3	29.10.2009	-2.1	-1.47	-0.7
МКР 202, корп.14	4	27.10.2009	0.8	0.41	-0.97
МКР 202, корп.16	5	27.10.2009	1.8	4.51	-1.21
МКР 202, корп.16	6	27.10.2009	-0.2	-0.11	-0.83
Хабарова, 1	7	27.10.2009	-4.8	-4.14	-0.38
Ярославского, 2	8	27.10.2009	-4.9	-4.23	-0.35
Хабарова, 5	9	27.10.2009	-3.8	-3.74	-0.45
Чиряева, 4	10	27.10.2009	-4.1	-3.51	-0.36
Чиряева, 8	11	28.10.2009	-3.9	-4.14	-0.45
Чиряева, 8	12	28.10.2009	-3.5	-3.23	-0.50
Ярославского, 4	13	27.10.2009	-5.5	-4.77	-0.26
Хабарова, 21/2	14	29.10.2009	-3.5	-2.98	-0.51
Хабарова, 27/2	15	28.10.2009	-3.0	-2.28	-0.62
П. Алексеева, 4/1	16	27.11.2009	-2.4	-1.68	-0.41
Каландаришвили, 1	17	10.11.2009	-2.7	-1.74	-0.66
Мерзлотная, 28	18	29.10.2009	-4.2	-3.14	-0.43
Стационар ИМЗ, 36	20	13.11.2009	-2.0	-1.46	-0.70
Лермонтова, 36/1	40	21.09.2010	-6.4	-5.40	-0.27
Можайского, 19/1	42	29.09.2010	-4.8	-3.92	-0.36
Курнатовского, 3/3	43	25.10.2010	-3.3	-3.04	-0.53
Кржижановского, 75/1	44	25.10.2010	-4.3	-3.66	-0.45
Ф. Попова, 2/1	45	25.10.2010	-2.9	-2.48	-0.70
Кальвица, 1	46	25.10.2010	-6.5	-5.04	-0.15
МКР 202, корп.7	47	27.10.2010	1.2	0.50	-1.30
Чернышевского, 22/2	48	27.10.2010	-4.2	-3.94	-0.49
Борисовка-3, А-2	50	25.10.2010	-3.7	-3.21	-0.54
Билибина, 19./3	51	25.10.2010	-5.0	-4.28	-0.36
Автодорожная, 40/2	52	21.10.2010	-3.7	-3.41	-0.53
Госплемобъединение	54	25.10.2010	-5.0	-4.16	-0.40
Строителей, 8/2	55	25.10.2010	-3.2	-2.58	-0.56
Петровского, 29/1	56	28.10.2010	-5.8	-4.76	-0.22
Новокарьерная, 27	57	28.10.2010	-5.4	-4.78	-0.30
Автодорожная, 20	58	27.10.2010	-3.2	-2.78	-0.60
Рыдзинского, 18/7	59	28.10.2010	-3.4	-2.84	-0.58
Кулаковского, 16	60	27.10.2010	-4.7	-4.57	-0.38
Стадухина, 80/2	37	21.09.2010	-5.9	-5.18	-0.21

Таблица 3 - Летняя матрица эксперимента на объектах геокриологического мониторинга г. Якутска в 2009-2010 гг.

Адрес объекта (улица, дом)	Номер СКВ	Дата термометрии	Переменные эксперимента		
			t_z (°C)	$t_э$ (°C)	k (отн.ед.)
Ленина, 11	26	21.06.2010	-4.8	-5.39	-0.39
Орджоникидзе, 3/1	27	21.06.2010	-4.4	-4.76	-0.35
Ленина, 35	28	21.06.2010	-4.2	-4.73	-0.34
Ленина, 37	29	08.07.2010	-3.1	-2.83	0.62
Ленина, 46	30	21.06.2010	-2.5	-2.61	-0.67
Октябрьская, 21	31	21.06.2010	-4.0	-4.34	-0.45
Орджоникидзе, 45	32	21.06.2010	-5.0	-5.3	-0.29
Сергеляхская, 10/2	33	24.06.2010	-4.0	-4.06	-0.47
Пояркова, 10	34	22.06.2010	-5.2	-5.63	-0.38
Петра Алексеева, 73	35	22.06.2010	-2.8	-3.11	-0.61
Петра Алексеева, 79	36	07.07.2010	-4.1	-4.87	-0.30
Космонавтов, 17/1	38	23.06.2010	-6.0	-6.90	-0.28
Дзержинского, 26	41	25.08.2010	-1.6	-1.50	-0.76

Таблица 4 - Весенняя матрица эксперимента на объектах геокриологического мониторинга г. Якутска в 2009-2010 гг.

Адрес объекта (улица, дом)	Номер СКВ	Дата термометрии	Переменные эксперимента		
			t_z (°C)	$t_э$ (°C)	k (отн.ед.)
Мерзлотная, 5	21	16.04.2010	-0.8	-0.88	-0.77
Якова Потапова, 18	22	16.04.2010	-2.6	-3.77	-0.60
Якова Потапова	23	16.04.2010	-1.4	-2.57	-0.72
Сергеляхское шоссе, 1	24	16.04.2010	-0.2	+0.10	-0.97
Окружная дорога	25	16.04.2010	-0.4	+0.24	-0.90

Для введения сезонных поправок k экспериментальный материал сначала сортировался по годам, а затем делился на группы по дате термометрии скважин.

Сортировка скважин образовала три группы.

Первая группа самая большая. В неё вошли 37 точек скважин, пробуренных в 2009-2010 гг., но с термометрией в одно и то же время – сентябре-ноябре.

Вторую группу образовали 13 точек скважин 2010 г. с термометрией в летнее время 2010 г. (в июне-августе).

Третья группа самая малочисленная. Она образована из 5 точек скважин с термометрий в весеннее время 2010 г. (в апреле).

Весенние записи сигналов приведены к уровню осени умножением на сезонную поправку k_s=2,14. Для летних записей применялась средняя поправка k_s=1,29.

Откорректированная матрица эксперимента репрезентативна. Представленные в ней данные охватывают широкий спектр пестрых инженерно-геокриологических условий эксплуатации мёрзлых грунтовых оснований жилых зданий г. Якутска.

Из-за большого объёма данных матрица приводится частями (табл. 2 - табл. 4)

Положительные температуры в матрице представлены всего тремя скважинами, которые были пробурены в экспериментальном микрорайоне МКР 202 на намывных грунтах. Включение скважин в матрицу сделано с целью изучения температурной зависимости сигналов георадиолокации в более широком температурном диапазоне.

Температуры выбраны из журналов термометрии, где они записаны с точностью 0,1 оС. С этой же точностью приведены в таблицах значения tz. В отличие от них, значения tэ вычисляются по отрицательным температурам ниже СТС в интервале глубин 3-10 м и потому приведены в таблицах с точностью 0,01 оС.

Значения k вычислены с точностью 0,0001 и округлены до сотого знака.

Обсуждение результатов эксперимента

Статистика экспериментального материала показывает, что на изученной площади г. Якутска среднегодовая температура грунтов на глубине 10 м изменяется в диапазоне минус 6,5 оС – плюс 1,8 оС при среднем значении минус 3,5 оС.

Среднее значение температуры мёрзлых грунтов в СГТ находится в диапазоне минус 6,9 оС – плюс 4,5 оС при среднем уровне минус 3,2 оС.

Как видим, вечномёрзлое основание объектов геокриологического мониторинга - жилых каменных 5-ти этажных зданий, составляющих большую часть селитебной территории г. Якутска, в целом находится в удовлетворительном для эксплуатации низкотемпературном состоянии. По показателю затухания k этого не скажешь. Его значения заключены в диапазоне минус 0,15-1,3 со средним значением минус 0,53.

Высокий уровень фонового (среднего) затухания говорит о том, что культурный слой, сформировавшийся на дневной поверхности за вековую историю г. Якутска и мёрзлые дисперсные грунты, слагающие разрез до 10 м, в существенной мере затронуты техногенными процессами химическо-

го загрязнения. По данным изыскательских работ глубина проникновения в мёрзлые грунтовые основания инженерных сооружений ореола техногенного засоления быстрорастворимыми солями достигает в настоящее время 5-7 м.

У температуры размах изменчивости частных значений выше, чем у затухания температуры и затухания. Относительная разница соответственно составляет 200% и 160%. Из этого следует, что по отношению к термометрии скважин чувствительность метода георадиолокации к изменению температурного состояния грунтов существенно ниже, но всё же достаточно высока для использования в практических целях.

Корреляционные связи между переменными матрицы изучались попарно. Сначала для tz → k и tэ → k, а затем для tэ → tz. Третья парная связь представляет особый интерес для изучения теплового состояния СГТ методом георадиолокации, о чём более

На первый взгляд поле корреляции имеет линейный характер, но при более пристальном рассмотрении графиков приходишь к выводу, что это не так. Нелинейный характер парных связей оказывается более приемлемым и по содержательной части, и по уровню детерминации, но не проявляет себя из-за недостаточного количества экспериментального материала в области высоких отрицательных температур и положительных температур. В любом случае, исследуемые переменные формально связаны между собой и это есть экспериментально установленный факт, не верить которому нет убедительных оснований.

Корреляционная связь отражает две эмпирические закономерности:

1. В изученной части СГТ повышение (понижение) температуры мёрзлых дисперсных грунтов вызывает увеличение (уменьшение) среднего показателя затухания амплитуды сигналов георадиолокации (рис. 3, а).

2. Повышение (понижение) средней температуры мёрзлых дисперсных грунтов в изученной части СГТ вызывает увеличение (уменьшение) температуры на подошве этого слоя (рис. 3, б).

Дадим комментарии ко второй закономерности.

То, что она обнаружена, есть факт нарушения основных теоретических положений теплофизики мёрзлых сред. В соответствие с ними колебания температуры, происходящие в СГТ, не должны изменять среднегодовую температуру на его подошве. Во всяком случае, амплитуда колебания температуры на этой границе не должна превышать принятую в геотермии погрешность её определения –0,1 оС. Если это условие не выполняется, то тем самым, граница, принятая за подошву СГТ, таковой не является. Выходит, что во всех изученных случаях подошва СГТ залегала глубже 10 м. Если это и влияет отрицательно на результат проведённого эксперимента, то только в той его части, которая заведомо искажает в сторону ухудшения истинную точность расчётного определения tz по данным георадиолокации.

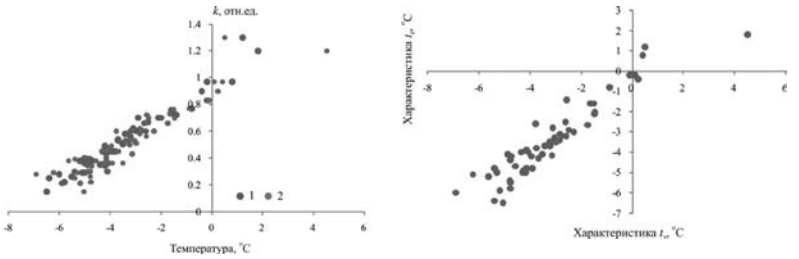


Рисунок 3 - Поле корреляций среднего показателя затухания k с характеристиками температурного поля в слое мёрзлых грунтов до глубины 10 м (а) и характеристик температурного поля между собой (б). 1- температура на глубине 10 м (tz), 2-средняя температура мёрзлых грунтов на глубине 3-10 м (tэ)

Обратим внимание также на то, что наблюдаемые закономерности отражают характер площадных изменений теплового состояния мёрзлых грунтовых оснований инженерных сооружений и не имеют никакого отношения к регулируемому изменению температуры во времени, как это принято делать на образцах грунта в лабораторных условиях.

Коснёмся кратко выяснения природы связи между такими физическими величинами, как температура и затухание.

При внешнем различии они с разных сторон выражают одно и то же – реакцию мёрзлых горных пород или грунтовых сред на их внешнее возбуждение с дневной поверхности. Температура – на постоянное возбуждение квазигармоническим тепловым полем, затухание – на импульсное возбуждение электромагнитным полем. В результате этого возбуждения геологическая среда проявляет ранее скрытые свойства. В рассматриваемом случае это теплофизические, электрофизические и волновые свойства. Аналогичным образом, проявляются механические свойства (прочностные и деформационные) при статистических (постоянное давление) и динамических (кратковременный удар и вибрации) нагрузках на геологическую среду.

Источником, порождающим и связывающим в единое целое все упомянутые свойства, является то, что делает геологическую среду индивидуальной и неповторимой, т.е. её минеральный и гранулометрический состав. Ему строго соответствует плотность и влажность. Это именно те базисные характеристики, на которые обращает внимание и логически их обосновывает И.Е. Гурьянов [10].

Таким образом, температура и затухание по необходимости связаны друг с другом, но связь эта носит опосредствованный характер и передаётся от одного свойства к другому свойству мёрзлых грунтов по цепочке: **температура → незамёрзшая вода → электропроводность и диэлектрическая проницаемость → затухание**.

Первое и второе звено цепочки хорошо изучены в лабораторных условиях на электротехнических материалах и образцах мёрзлых горных пород и грунтовых сред. Влияние температуры на электрофизические свойства давно используется в разных областях науки, техники и производства. Яркий пример тому – термометрия скважин, где температура вычисляется по электрическому сопротивлению терморезисторов, измеренному мостами постоянного тока и др. приборами.

Третье звено цепочки экспериментально не изучено, но теоретически устанавливает её существование по формулам теории электромагнитного поля [11] зависимость волновых свойств (затухания) от электрофизических свойств. Зависимость находятся в полном согласии с практикой работ методом георадиолокации.

Влияние температуры на затухание, обнаруженное в проведённом эксперименте и предшествующих экспериментах, не только доказывает истинность предложенной эмпирико-теоретической цепочки, но и возводит её в статус причинно-следственных отношений. На этой и только на этой основе, имеющей физический содержательный смысл, следует заниматься вопросами практического использования температурной зависимости сигналов георадиолокации.

Ниже пойдёт речь об обратных математических моделях, устанавливающих формальное количественное соответствие между средним показателем затухания k и характеристиками температурного поля tz и tэ. Понятно, что физического смысла это соответствие не имеет, но оно необходимо для вычисления температуры по данным георадиолокации.

Поиск адекватных обратных математических моделей $k \rightarrow t_z$ и $k \rightarrow t_э$ осуществлялся в узком классе нелинейных аналитических функций - классе трансцендентных функций, так как они удовлетворительно показали свои аппроксимационные способности в экспериментах, ранее проведённых в г. Мирном и г. Нерюнгри. В отличие от универсального полинома эти функции более грубы в передаче локальных особенностей эмпирических зависимостей, но устойчивы к изменению небольшого числа наблюдений на концах рабочего интервала аргумента.

Заметим, что степенные функции работают только с положительным значением аргумента. По этой причине отрицательный знак k пришлось убрать, как при изучении прямых моделей температурной зависимости показателя затухания и построении их графиков (см. рис. 3, а), так и для выполнения расчётов по обратным моделям.

Наилучшей моделью в ходе поисков оказалась не обычная степенная функция, заложенная в библиотеке функций MS Excel, а модифицированная степенная функция из библиотеки одномерных регрессионных моделей программы “Stadia” [12]. При описании экспериментальных данных она имеет более высокий уровень детерминации, чем у альтернативной модели натурального логарифма и описывается уравнением:

$$t = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \sqrt{k} \qquad (2)$$

где, t – температура в °С, α_0 и α_1 – эмпирические параметры, зависящие от времени, места проведения эксперимента и строения, состава и свойств мёрзлых грунтов, k – средний показатель затухания амплитуды сигнала георадиолокации в отн. ед.

К сожалению, класс степенных функций не работает не только при отрицательных значениях аргумента, но и при отрицательных значениях независимой переменной. В данном случае мнимо зависимой переменной – температуры. Такое ограничение вынуждает переводить отрицательные значения температуры мёрзлых грунтов из шкалы Цельсия в шкалу Фаренгейта, в которой они становятся положительными.

Для вычисления температуры мёрзлых и талых грунтов по шкале Фаренгейта подобраны следующие уравнения:

$$t_z = 11{,}0 + 20{,}8 \cdot \sqrt{k} \text{ ; } R^2=0{,}935 \qquad (3)$$

$$t_э = 11{,}5 + 20{,}7 \cdot \sqrt{k} \text{ ; } R2=0{,}831 \qquad (4)$$

Контроль работы уравнений сделан на материале эксперимента и показал удовлетворительные результаты.

Проведём анализ ошибок вычисления температуры по уравнениям (3) и (4), переведённых в шкалу Цельсия.

Описательная статистика показывает, что степенные модели работают сбалансировано. Они с почти равной вероятностью завышают или занижают данные термометрии. При широте размаха частных значений 4,9 °С и 2,1 °С средние ошибки вычисления t_z и $t_э$ с вероятностью 95% находятся в интервале ±0,13°С и ±0,22 °С.

Приблизительно в 70% случаев ошибка вычисления характеристик tz и tэ не выходит за границы ±0,48 и ±0,82. Если из данных убрать три больших ошибки превышающих 1,0°С, образовавшихся при вычислении температуры талых грунтов, то ошибка определения температуры мёрзлых грунтов выравнивается до ±0,5 °С.

При желании работать с положительными и отрицательными температурами точность вычисления характеристики tэ можно повысить до ±0,3 °С через высокую, но мнимую корреляцию с характеристикой t_z, используя для этого полиномиальное уравнение 4-го порядка:

$$t_э = 0{,}0135 \cdot t_z^{\,4} + 0{,}1506 \cdot t_z^{\,3} + 0{,}4605 \cdot t_z^{\,2} + 1{,}0184 \cdot t_z^{\,1} - 0{,}5534 \text{ ; } R2=0{,}961 \qquad (5)$$

Вариограммы ошибок вычисления температуры по уравнениям (3) и (4) приведены на рисунке 4.

Посмотрим, как ведут себя ошибки модели при изменении температуры грунтов в изученной части слоя годовых теплооборотов. На рис. 5 видно, что на общем фоне рассеяния частных опреде-

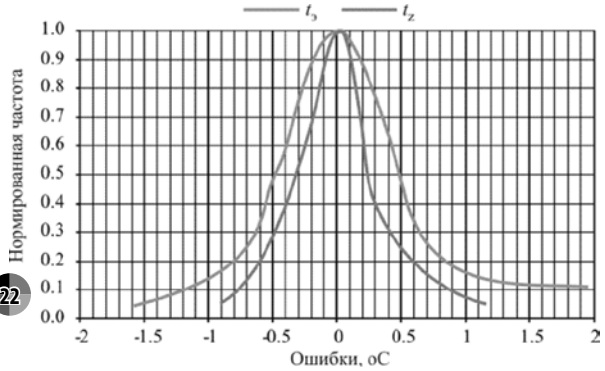


Рисунок 4 - Вариограммы ошибок вычисления характеристик температурного поля t_z и $t_э$ по моделям степенных модифицированных функций.

лений, график средней ошибки вычисления tz и tэ ведёт себя по-разному. На глубине 10 м (рис. 5, а) ошибки знакопеременны с амплитудой ±0,2°С в диапазоне температур минус 6,5-2,0 °С. В слое до 10 м ошибки близки к 0,0°С в диапазоне средних температур минус 5,0-1,0°С (рис. 5, б). В целом, средние ошибки начинают резко возрастать при переходе в область высоких отрицательных (выше минус 2,0°С по t_z) и положительных температур (выше 0,0°С по $t_э$).

Интересные и вместе с тем поучительные результаты получились при проверке точности и устойчивости работы обратных степенных моделей с выходом за границы условий их применимости, т.е. в тех местах, где эксперимент не проводился. Для такого внешнего контроля были выбраны хорошо изученные комплексом геолого-геофизических методов ключевые участки местности «Большого Якутска». На них в 2000-2003 гг. Якутская поисково-съёмочная экспедиция (ЯПСЭ) проводила мониторинг экзогенных процессов и опасных явления.

Сопоставление температур, вычисленных по уравнениям (3) и (4), с данными термометрии оказалось неудовлетворительным. В расчётных данных присутствовала систематическая ошибка, которая указывала в сторону занижения истинной температуры мёрзлых грунтов приблизительно на один градус.

Ситуация изменилась в лучшую сторону после устранения систематической ошибки. Это было сделано путём введения в расчётные данные температурной поправки обратного знака, т.е. поправки повышающей заниженную температуру. За поправку принималось среднее медианное значение систематической ошибки. Для характеристик tz и tэ поправки соответственно составили 0,71°С и 0,94°С.

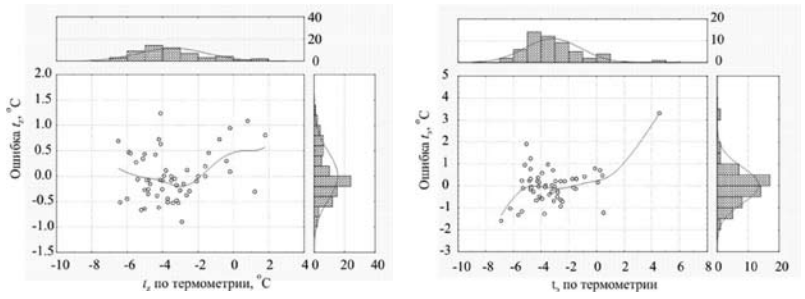


Рисунок 5 - Диаграммы Бокса, иллюстрирующие распределение ошибок модели степенноймодифицированной функции в зависимости от температуры грунтов: а – на глубине 10 м, б – в слое до глубины 10 м.

В итоге, удалось добиться не только сбалансированности модели около нулевого среднего с разбросом ±0,22-0,25°С, но и уменьшить среднеквадратичное отклонение ошибок до ±0,7-0,8°С.

Остановимся на рассмотрении причин появления систематической ошибки при апробации степенной модели. Зададимся вопросом: почему произошло занижение расчётной температуры мёрзлых грунтов на один градус?

Пестрота инженерно-геокриологических условий, царящая на застроенной территории г. Якутска, в принципе не может носить систематический характер.

Причина кроется в частотной дисперсии сигналов георадиолокации, записанных разной георадарной техникой. В точках геокриологического мониторинга селитебной части г. Якутска сигналов записывались георадаром «ОКО-2» на центральной частоте 250 МГц. На ключевых мониторинговых участках ЯПСЭ записи сигналов производились одним из первых образцов отечественной аналогово-цифровой георадарной техники - аппаратурой 17ГРЛ-1 на центральной частоте около 40 МГц.

Разница в частотах большая. Более высокая частота излучения сигнала георадиолокации привела к систематическому завышению затухания в среде на величину . Поэтому при равных значениях k степенная модель систематически занижает температуру мёрзлых грунтов на $\Delta t = 1{,}0$ °С (рис. 6).

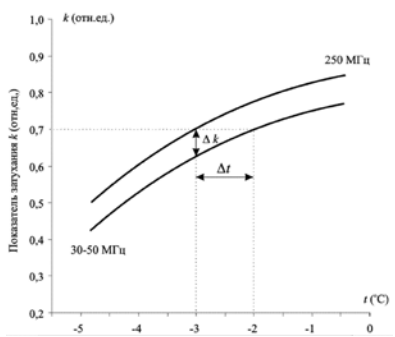


Рисунок 6 - Иллюстрация частотной зависимости показателя затухания сигналов георадиолокации на территории г. Якутска.

Продолжим анализ ошибок.

Взглянем на них с несколько иных неклассических позиций. Для этого построим графики функций плотность вероятности распределения не ошибок, а значений температуры, установленных по данным термометрии скважин и вычисленных методом георадиолокации. Посмотрим, насколько точно математическая модель степенной модифицированной функции воспроизводит или точнее сказать, отображает картину термометрического распределения температур в изученной части слоя годовых теплооборотов (рис. 7).

Сходство эмпирических распределений характеристик тем-

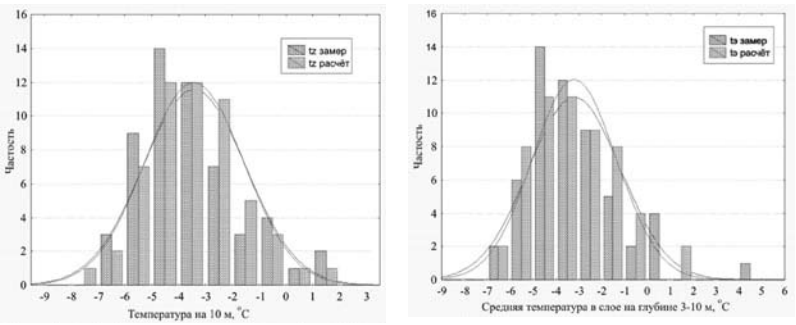


Рисунок 7 - Гистограммы и графики функций плотности вероятности расчётной и измеренной температуры песчано-глинистых грунтов, слагающих разрез г. Якутска: а – характеристика t_z, б – характеристика $t_э$.

пературного поля высокое, а их описание теоретическими функциями закона нормального распределения или закона больших чисел ещё выше.

Получается, что математическая модель степенной модифицированной функции обладает не только диагностическими, но и мониторинговыми и прогностическими свойствами. Она с высокой точностью отображает по среднему показателю затухания амплитуды сигналов георадиолокации реальный вероятностный характер распределения частных значений температурного поля застроенной территории со сложными инженерно-геокриологическими условиями строительства и эксплуатации зданий и сооружений г. Якутска.

Проведём мысленный эксперимент.

Сожмём изученную территорию г. Якутска в одну точку. Тогда она соберёт в себе всю информацию о строении и температурном режиме мёрзлой грунтовой среды. Такая информация по своей природе изменчива, а после сбора в одну точку станет и вовсе непредсказуемой, случайной.

Пробурим в точке скважину глубиной 10 м. Проведём в ней 55 определений характеристик температурного поля t_z и $t_э$ и среднего показателя затухания k, как это было сделано в ходе эксперимента на территории г. Якутска.

Все определения значений tz, tэ и k будем считать выборкой случайных реализаций из генеральной совокупности бесконечного множества физических свойств мёрзлых пород и грунтовых сред. Тогда выборка будет подчиняться законам математической статистики и теории вероятности. Воспользуемся ими и вычислим для t_z, $t_э$ и k две основные параметрические статистики для нормального закона распределения случайных величин. Это среднее арифметическое значение и среднеквадратичное отклонение или, короче говоря, стандарт (табл. 5).

Средние показатели температуры с точностью до 0,1°С не отличаются друг от друга по данным термометрии и георадиолокации. С доверительной вероятностью 95% средние оценки температуры не выходят за границы ±0,51-0,51°С (по термометрии) и ±0,49°С (по георадиолокации).

Таблица 5 - Статистика мысленного эксперимента в одной точке г. Якутска по 55 определениям

Статистика эксперимента	Термометрия		Георадиолокация	
	t_z (°С)	$t_э$ (°С)	t_z (°С)	$t_э$ (°С)
Среднее значение	-3.44	-3.21	-3.45	-3.21
Стандарт	1.90	2.00	1.83	1.82

Частные значения температуры с доверительной вероятностью около 70% (один стандарт) варьируют в интервале: ±1,83-1,90°С (по t_z) и ±1,82-2,00°С (по $t_э$).

Статистика, что называется, говорит сама за себя. Сравнительно высокая природно-техногенная изменчивость частных значений температур не мешает оценивать их среднее значение методом георадиолокации с точностью ±0,5 °С.

Итак, результат мысленного эксперимента выводит на понимание весьма важной детали, высвечивающей главную направленность методики расчётного определения температуры по данным метода георадиолокации. Такой деталью являются средние значения. Только их использование даёт основание для рассмотрения георадиолокации, как радиометода неразрушающего контроля температурного (теплового) состояния мёрзлых грунтовых оснований инженерных сооружений, сравнимого по точности с методом термометрии скважин.

Заключение

Натурный эксперимент, проведённый на территории г. Якутска, показал, что затухание амплитуды сигналов георадиолокации является термозависимым свойством. Его, как и электросопротивление терморезисторов, можно с пользой использовать в практических целях для быстрого и недорого расчётного определения средних показателей температуры мёрзлых дисперсных грунтов по данным георадиолокации.

Понятно, что ни в близкой, ни в далёкой перспективе метод георадиолокации нельзя рассматривать, как альтернативу методу термометрии скважин. Это в принципе невозможно и ошибочно с точки зрения здравого смысла.

Функциональные или почти функциональные теоретико-эмпирические модели температурной зависимости электрического сопротивления полупроводников, которые использует термометрия, существенно отличаются от вероятностных моделей температурной зависимости затухания амплитуды сигналов георадиолокации.

Модели термометрии однофакторные и точно предсказуемые, а модели георадиолокации нет. Они зависят от целого ряда не контролируемых факторов, главными из которых являются

мерзлотно-грунтовые факторы. Среди них особую роль оказывают на затухание сигналов влажность, льдистость и засолённость.

С позиций стратегического развития инженерного мерзлотоведения методу георадиолокации отводится роль нового вспомогательного метода, дополняющего метод термометрии скважин. Взаимное использование достоинств методов и восполнение их недостатков поможет, наконец, создать полноценные долговременные сети температурного контроля мёрзлых грунтовых оснований инженерных сооружений на урбанизированных северных территориях не только Якутии, но и всей России.

Разумеется, реализация таких планов требует коллективного труда учёных и инженеров и невозможна без моральной и финансовой помощи государства.

Список литературы:

1. Neradovski L. Radiophysical Properties of Saline Groundwater in the Yakutsk Frea // Proceedings of the Eighth International Symposium on Permafrost Engineering. 15-17 October, 2009, Xian, China / Edited by Ming Huo, Wei Ma & Fujun. Lanzhou University Press – Pp. 576-583.

2. Нерадовский, Л.Г. Возможности динамической георадиолокации по оценке температурного состояния мёрзлых грунтовых оснований г. Якутска / Л.Г. Нерадовский // Научное обеспечение решения ключевых проблем развития г. Якутска. – Якутск: ООО «Издательство Сфера», 2010. - С. 146-150.

3. Нерадовский, Л. Г. Влияние температуры многолетнемёрзлых грунтов на затухание электромагнитной энергии / Л.Г. Нерадовский // Геофизика. – 2009. – № 2. – С. 57–67.

4. Нерадовский, Л. Г. Температурная зависимость динамического показателя георадиолокации в области распространения островной мерзлоты / Л. Г. Нерадовский, Н. Л. Зыков // Геофизика. – 2010. – № 5. – С. 53–60.

5. Нерадовский Л.Г. Температурные зависимости динамического показателя георадиолокации освоенных районов криолитозоны Якутии // Материалы IX Международного симпозиума по развитию холодных регионов 1-5 июня 2010 (ISCORD 2010). – Якутск, 2010 (Запись на электронном диске).

6. Нерадовский, Л. Г. Влияние температурного поля на затухание электромагнитного поля в освоенных районах криолитозоны Якутии / Л.Г. Нерадовский // Криосфера Земли, 2010. – Том XIV, №4. – С. 56-65.

7. Нерадовский Л. Г. Температурные зависимости сигналов георадиолокации в криолитозоне Якутии /Л.Г. Нерадовский // IV всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Научное творчество XXI века». Приложение к журналу «В мире научных открытий». Вып. 2. – Изд-во Научно-инновационного центра. – Красноярск, 2011. – С. 269-270.

8. Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геотермических измерений / В. Т. Балобаев, Б. В. Володько, В. Н. Девяткин, А. И. Левченко, В. Г. Русаков. – Якутск, ИМЗ СО РАН СССР, 1985. – 48 с.

9. Скрябин, П. Н. Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района г. Якутска / П. Н. Скрябин, С. П. Варламов, Ю. Б. Скачков. – Новосибирск, 1998. – 144 с.

10. Гурьянов, И.Е. Инженерная криолитология: прочность вечномёрзлых грунтов / И.Е. Гурьянов ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. – Новосибирск : Академическое изд-во “Гео”, 2009. – 139 с. – ISBN 978-5-9747-0151-1 (в пер.).

11. Финкельштейн, М.И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П. Золотарёв; под ред. М. И. Финкельштейна. – М.: Изд-во Недра, 1986. – 128 с.

12. Кулаичев, А. П. Методы и средства комплексного анализа данных / А. П. Кулаичев. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. – 512 с.

ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА И ГЛУБОКОЕ СЕЗОННОЕ ПРОМЕРЗАНИЕ ГРУНТОВ, КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ КАК ПРИРОДНЫЙ ФЕНОМЕН

А.И. Андриянов

ОАО «Проекттрансстрой», г. Москва, pts@ptst.ru

В данном докладе сделана попытка объяснить причину, вернее первопричину образования вечной мерзлоты на Земле в целом. Данная точка зрения является крайне неординарной, может быть даже антинаучной, но при определенных допущениях она отвечает на многие вопросы, которые долгое время считаются спорными и вряд ли они разрешатся при общепринятом подходе в осмыслении причин образования многолетнемерзлых толщ.

В докладе приводится весьма простое и логичное объяснение таких природных явлений как: оледенение, потепление, их стадийность. Объясняется стадийность таких геологических процессов как тектонические складчатости (Герцинская, Каледонская, Альпийская и пр.).

Сделана определенная попытка объяснить такие актуальные сегодня проблемы, как грядущее потепление климата, проблемы «парникового эффекта» и выброс углекислоты в атмосферу. Показана неактуальность, а порой просто непрофессиональная пиар-акция в освещении проблем и вопросов вечномезлых толщ.

Во второй части доклада кратко освещено и показано состояние дел строительства железной дороги Томмот-Кердем на участке «ледового комплекса» на первом ее этапе. Показано существующее состояние части участка в сочетании с прогнозной и проектной составляющей. Должного анализа и мониторинга не проведено по причине минимального периода после начала строительства. Проведен некоторый сбор фактического материала, который несомненно должен быть продолжен и в дальнейшем проанализирован.

Все мы знаем о периодах похолоданий, потеплений, а так же мир наполнен всевозможными слухами и «убийственными доводами» предстоящего потепления и катастрофических последствий парникового эффекта. Не берусь обсуждать и тем более опровергать всю эту информацию, хотя своего негативного отношения к ним не скрываю. Я хочу высказать вслух некоторые свои мысли, которые однажды меня посетили и не хотят покидать. Оговорюсь сразу, что мои высказывания не тянут на какую-то стройную гипотезу, но определенную логическую цепочку имеют и являются моим частным мнением.

Чтобы понять причину промерзания земли на такую большую глубину, необходимо попытаться определить первопричину данного процесса, т.е., что послужило толчком такого резкого изменения всех процессов на земле. Ведь очевидно, что один климат измениться так кардинально не может, был комплекс причин, в том числе и планетарных (космических). Меня не может убедить довод в том, что повышение температуры воздуха на 3-4 градуса приведет к таянию ледяных «шапок» Антарктиды и Гренландии. Очевидно, что повышение температуры приведет к увеличению испарения, образования облачности и повышению осадков. Следует отметить, что Антарктида является самодостаточной регулируемой системой, которая сама себя выхолаживает, то есть своеобразной «кухней погоды». Увеличение осадков над Антарктидой будет только в твердой фазе. Следовательно, увеличение осадков приведет к росту «ледяных шапок», а не наоборот.

Я склоняюсь к мысли о том, что изменение на земле произошло единовременное и катастрофическое для планеты в целом. Попытаюсь отрежессировать прошлые земные события, которые привели планету к современному облику. За отправную точку я возьму гипотезу Мулдашева, которая мне нравится и я с ней согласен. В частности он утверждает, что наша планета в свое время изменила магнитную полюсность, вследствие чего она единовременно провернулась на определенный угол и изменила плоскость эклиптики. Далее, рассуждая логически, очевидно, что земля повернулась, а водная масса «осталась» на месте или пришла в движение с опозданием. Фантазируя дальше мы видим, что вода смыла все живое и неживое на планете и переотложила все в месте своей разгрузки. Этим можно легко объяснить концентрацию запасов каменного угля, по всей видимости это переотложенная и похороненная древесина, а так же запасы наших углеводородов. Это не что иное, как переотложенные биоорганические морские и земные остатки.

Рассуждая дальше мы приходим к выводу, что после воды, с некоторым опозданием, приходит в движение магма, что приводит к тектоническому переустройству поверхности планеты. Эти процессы происходят не одну тысячу лет. В атмосферу выбрасывается колоссальное количество пепла и газов, которая полностью перекрывает поступление солнечной радиации на землю на тысячу или более лет. Вследствие этого наша земля остывает, как обыкновенное космическое тело. Вероятно температура атмосферы близка к температуре абсолютного нуля.

Вследствие этого, вполне очевидно, что наша планета была промерзшая полностью на глубину, ограниченную влиянием теплопотока магмы снизу. После очищения атмосферы и постепенного прогрева земной поверхности, а так же в силу широтной зональности вся «лишняя» мерзлота оттаяла и сегодняшняя граница мерзлоты не что иное, как своеобразная остаточная точка нуля,



Рисунок 1 - Участок трассы, где запроектирована замена сильнольдистых грунтов на непросадочные. Замена проходила зимой. Участок замены показан стрелкой. На прилегающих участках активно развиваются процессы термокарста. На мой взгляд, разумнее не заменять сильнольдистые грунты, что сильно удорожает строительство, а просто засыпать проявившийся термокарст в летнее время, что позволит в определенной мере минимизировать затраты. По крайней мере эти участки уже не оттают.



Рисунок 2 - Вырубленная зимой просека, где работы летом не проводятся. Наблюдаются процессы прогрессирующего термокарста с образованием озер, на котором строители ловят уток сетями. Очевидно, что данный участок необходимо засыпать в летнее время.



Рисунок 3 - Процессы термокарста в стадии «самозатухания»



Рисунок 4 - Видимых неблагоприятных процессов не наблюдается.

точка неустойчивого равновесия.

На основании вышесказанного имею основания предположить, что таких катаклизмов было несколько: от Байкальской до Альпийской складчатостей. Этим можно так же объяснить количество оледенений и потеплений на планете, а так же исчезновение динозавров и т.д.. Да и наша цивилизация на планете является не первой, а по некоторым оценкам – пятой. Всемирный библейский потоп по всей видимости тоже имеет под собой определенную подоплеку, а не взят с потолка.

Я сильно сомневаюсь в том, что понижение температуры на несколько градусов способно привезти к такому мощному и глубокому промерзанию грунтов. Ведь даже на полюсе холода в Оймяконе и Верхоянье глубина проникновения годовых колебаний температуры не превышает 20 метров. Мощность же многолетнемерзлых грунтов в ее максимальном значении приближается к 2 километрам. Очевидно, что такое мощное промерзание возможно только при постоянном отрицательном тепловом балансе, то есть при отсутствии сезонного оттаивания.

В заключение хочу высказать свое мнение по глобальному потеплению. Все мы знаем о разнопериодной климатической цикличности: трехсотлетние, столетние. Минимальный цикл 30-40 лет. Если обернуться назад и проследить новейшую историю примерно с середины тридцатых годов прошлого столетия, то мы увидим эту цикличность в развитии нашей страны.

Тридцатые-сороковые годы характеризовались неким климатическим оптимумом (потеплением), что привело к уменьшению ледовитости северных морей и развитию нашего ледокольного флота. В это время был открыт северный морской путь. Построены первые советские ледоколы, которые при явной незначительной мощности успевали за одну короткую навигацию проходить северный морской путь с запада на восток и обратно.

Следующий климатический минимум пришелся на семидесятые годы прошлого столетия, что привело к увеличению ледовитости северных морей. Наши современные ледоколы, такие как «Сибирь», «Россия» и другие, зачастую не могли пройти севморпуть за одну навигацию, их просто затирало льдами. Все эти события проходили на наших глазах.

Сейчас очевидно наступает очередной климатический оптимум.

Я убежден, что наша планета в состоянии регулировать свою необходимую экосистему. Все попытки некоторого политического электората защиты от глобального потепления сведены к подписанию Киотского протокола, что приводит не к уменьшению выброса в атмосферу, а к его перераспределению и получению прибыли определенных кругов за выброс грязного воздуха в атмосферу. В заключение хочу показать несколько фотографий со строительства железной дороги Томмот-Кердем на участке «ледового комплекса»

Следует отметить, что процент поврежденных термокарстом участков невелик, не более 3-4%. В целом же просека не претерпела сильных изменений. См. фото 3 и 4. Видно, что грунты льдистые, но процессы термокарста не имели своего дальнейшего развития. Вполне вероятно, что процессы прогрессирующего термокарста начинаются после определенного критического значения льдистости, чем и объясняется их локальное и неповсеместное развитие. Острый дефицит скальных грунтов и большая дальность возки с действующих карьеров делает вырезку и замену сильнольдистых грунтов на скальные крайне дорогим и неэффективным мероприятием.

Все сказанное лишний раз доказывает правильность версии о том, что даже при идеальном проектном решении невозможно избежать нежелательных процессов и связанных с ними деформаций на начальном этапе строительства и эксплуатации.

Необходимо дать время и возможность самой природе максимально «залечить» нанесенные ей деформации и после определенной паузы «лечить» проявившиеся «больные» места. Это будет дешевле и эффективнее.

ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ

М.П.Акимов

Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К.Аммосова Институт математики и информатики г. Якутск, ул. Кулаковского 48, КФЕН, ИМИ, e-mail: mirpet@mail.ru

В настоящее время в Центральной Якутии эксплуатируются опытно-промышленные варианты внутриквартальных подземных трубопроводов горячего водоснабжения и теплоснабжения из сшитого полиэтилена с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке. Исследование динамики температурного поля подземного полимерного трубопровода с теплоизоляцией в процессе эксплуатации на вечномерзлый грунт позволит разработать рекомендации по применению перспективных трубопроводов в регионах холодного климата, а также будет способствовать внесению изменений в существующие отраслевые и строительные нормативные документы. На основе решения задачи Стефана исследуется процесс оттаивания-промерзания грунтов вокруг подземного трубопровода теплоснабжения из сшитого полиэтилена с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке, эксплуатируемой в пригороде г. Якутске с целью прогнозирования динамики границы протаивания на длительный срок. Приводятся результаты прогнозирования теплового режима грунта. Установлено, что после 11 лет эксплуатации теплопровода глубина протаивания стабилизируется и достигает примерно 3,5 м. На основе полученных данных могут быть выбраны мероприятия по сохранению устойчивости тепловых сетей.

В настоящее время в Центральной Якутии эксплуатируются опытно-промышленные бесканальные варианты внутриквартальных подземных трубопроводов горячего водоснабжения и теплоснабжения из сшитого полиэтилена, армированного нитью из арамидного волокна (кевлара), с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке. Преимущества такого способа укладки принципиально новых видов труб – из полимерных материалов в заводской теплоизоляции очевидны: они не подвержены коррозии, не зарастают отложениями и потому служат многие десятки лет. Весьма ценным качеством является их гибкость, позволяющая поставлять их на объекты длинномерными отрезками необходимой длины, в подавляющем большинстве случаев обходиться без стыков и проходить повороты трассы без применения фасонных деталей. Такие трубы не требуют компенсаторов. Благодаря малому весу труб монтажные работы осуществляются без применения грузоподъемной техники. Тем не менее, нормативная база по проектированию и монтажу таких трубопроводов отстает от требований практики. Исследование динамики температурного поля подземного полимерного трубопровода с теплоизоляцией в процессе эксплуатации на вечномерзлый грунт является актуальной задачей, решение которой позволит разработать рекомендации по применению перспективных трубопроводов в регионах холодного климата, а также будет способствовать внесению изменений в существующие отраслевые и строительные нормативные документы. Кроме того, согласно существующим нормативным документам [1] при строительстве тепловых сетей в районах вечномерзлых грунтов выбор мероприятий по сохранению их устойчивости должен выполняться на основе расчетов зоны оттаивания мерзлого грунта около трубопроводов. Расстояния в свету по горизонтали от тепловых сетей при их подземной прокладке до фундаментов зданий и сооружений, строящихся по принципу I (с сохранением вечной мерзлоты), должны приниматься не менее 2м от зоны оттаивания грунта около канала, определяемом расчетом. В то же время, численному моделированию теплового взаимодействия трубопровода с грунтом уделяется недостаточное внимание.

При решении задачи методом конечных разностей трудности возникают вследствие сложности рассматриваемой области. В плоском случае границы расчетной области представляют собой отрезки прямых и полуокружностей, что затрудняет выбор системы координат для построения расчетной сетки. Обычно такую задачу решают, используя уравнение теплопроводности в декартовой системе координат [2]. Такой подход для определения температурного поля в многослойной трубе осложняется ввиду наличия условий теплового контакта между слоями. При исследовании влияния теплоносителя в трубе на тепловое состояние грунта, приближенное задание границ в непосредственной близости от теплообменной поверхности может привести к существенным погрешностям при определении границ оттаивания. Для более точного описания температурного поля в окрестности трубы с теплоносителем перспективным представляется решение задачи теплопроводности в полярных координатах. Естественно, при этом приближенно будут описаны прямые участки границ области, что также снизит точность расчета, но можно предположить, что их влияние на определение границ оттаивания будет значительно ниже.

Постановка задачи. Примем допущение, что температурный режим теплоносителя в трубопроводе вдоль трубы меняется слабо, а величина заглубления теплопровода практически не меняется по трассе, что позволяет пренебречь тепловыми потоками вдоль теплопровода. Тогда задачу о формировании температурного режима в системе «труба-грунт» можно рассматривать как двух-

мерную в полярных координатах (рис.1).

Математическая постановка задачи Стефана со сглаженными коэффициентами формулируется следующим образом: Требуется определить нестационарное температурное поле T (r, φ, t) , удовлетворяющее уравнению теплопроводности в полярных координатах:

$$c\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial\varphi}\right),\quad (r,\varphi)\in\Omega \qquad (1)$$

граничному условию на дневной поверхности грунта:

$$\lambda\left(\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial\varphi}\sin\varphi-\frac{\partial T}{\partial r}\cos\varphi\right)\Big|_{\Gamma_1}=-\alpha(T(r,\varphi,t)-T_{окр}(t)); \qquad (2)$$



Рисунок 1 - Расчетная область грунта вокруг теплопровода.

граничным условиям на границах Γ_2, Γ_3 и Γ_5:

$$\lambda\left(\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\sin\varphi-\frac{\partial T}{\partial\varphi}\cos\varphi\right)\Big|_{\Gamma_2}=0 \qquad -\frac{\partial T}{\partial\varphi}\Big|_{\Gamma_3}=0, \qquad \frac{\partial T}{\partial\varphi}\Big|_{\Gamma_5}=0 \qquad (3) \qquad (4)$$

граничному условию на внутренней поверхности теплопровода:

$$\pi\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\Gamma_4}=\alpha(T(r,\varphi,t)-T_{воды}(t)) \qquad (5)$$

и начальному условию:

$$T(r,\varphi,0)=T_н(r,\varphi) \qquad (6)$$

На границах слоев заданы условия идеального теплового контакта:

$$\begin{cases}\lambda_i\dfrac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r-0}=\lambda_i\dfrac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r+0}\\ T(r_{i-0},\varphi,t)=T(r_{i+0},\varphi,t)\end{cases} \qquad i = 1,2,3 \qquad (7)$$

Численное решение производится на неравномерной сетке

$$\widehat{\omega}_{h1}=\left\{r_i,i=\overline{0,n_1},h_i^1=r_i-r_{i-1},i=\overline{1,n_1}\right\},h^1=h_r,h_{i+1}^1=r_{i+1}-r_i$$

$$\widehat{\omega}_{h1}=\left\{\varphi_k,k=\overline{0,n_2},h_k^2=\varphi_k-\varphi_{k-1},k=\overline{1,n_2}\right\}\ h^2=h_\varphi,h_{k+1}^2=\varphi_{k+1}-\varphi_{ki}$$

$$\widehat{\omega}_{\tau}=\left\{t_j,t_j=t_{j-1}+\tau_j,j=\overline{1,N_\tau},t_0=0,t_{N_\tau}=T_G\right\}\text{ где }T_G-\text{время конца счета}$$

$$\widehat{\omega}_{h\tau}=\widehat{\omega}_{h_1}\times\widehat{\omega}_{h_{21}}\times\widehat{\omega}_{\tau},\ h=\frac{h_i+h_{i+1}}{2}$$

Двумерное уравнение теплопроводности (1) записывается в форме удобной для решения методом сквозного счета, решается численно конечно-разностным методом. Используется схема расщепления в целых шагах с методом суммарной аппроксимации.

На каждом временном интервале $[t_{j-1},t_j]$ задача решаются две одномерные задачи с граничными условиями, полученными естественным методом расщепления [3-4].

$$\begin{cases}c\rho\dfrac{\partial T}{\partial t}=\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\dfrac{\partial T}{\partial r}\right)\\ T_r(r,\varphi,0)=T_0(r,\varphi)\\ T_r(r,\varphi,t_j)=T_\varphi(r,\varphi,t_j)\\ \lambda\dfrac{\partial T}{\partial r}=\alpha(T(r,\varphi,t)-T_{окр}(t))\cos\varphi\Big|_{\Gamma_1}\\ \lambda\dfrac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\Gamma_4}=\alpha(T(r,\varphi,t)-T_{воды}(t))\\ \dfrac{\lambda}{\sin\varphi}\dfrac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\Gamma_2}=0;\end{cases} \qquad (8)$$

$$\begin{cases}c\rho\dfrac{\partial\widetilde{T}}{\partial t}=\dfrac{1}{r^2}\dfrac{\partial}{\partial\varphi}\left(\lambda\dfrac{\partial T}{\partial\varphi}\right),t_j<t<t_{j+1}\\ \widetilde{T}(r,\varphi,t_j)=T(r,\varphi,t_{j+1})\\ \lambda\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\widetilde{T}}{\partial\varphi}=-\alpha(\widetilde{T}(r,\varphi,t)-\widetilde{T}_{окр}(t))\sin\varphi\Big|_{\Gamma_1}\\ \dfrac{\lambda}{r\cos\varphi}\dfrac{\partial T}{\partial\varphi}\Big|_{\Gamma_2}=0\\ -\dfrac{\partial T}{\partial\varphi}\Big|_{\Gamma_3}=0\\ \dfrac{\partial T}{\partial\varphi}\Big|_{\Gamma_5}=0\end{cases} \qquad (9)$$

Приближенным решением задачи (1)-(7) является решение задачи (10), т.е. $\widetilde{T}^{j+1}\approx T^{j+1}$ Таким образом, решение одной из задач является начальным условием для другой. Алгоритм решения сформулированной задачи заключается в последовательном решении одномерных задач по первому и второму направлениям. Каждую из одномерных задач решаем методом сквозного счета.

Разностная краевая задача

Задачу (8)-(9) аппроксимируем консервативной разностной схемой, построенной методом баланса

$$\begin{cases} cp_i \dfrac{y_i^{j+1}-y_i^j}{\tau} = \dfrac{1}{r_i h_i^1}\left(\lambda_{i+\frac12}\dfrac{y_{i+1}^{j+1}-y_i^{j+1}}{h_{i+1}^1} - \lambda_{i+\frac12}\dfrac{y_i^{j+1}-y_{i-1}^{j+1}}{h_i^1}\right), i < n_{3к} \\ y_i^0 = T_0(r_i,\varphi_k) - \ нач.\ условие \\ cp_0\dfrac{y_0^{j+1}-y_0^j}{\tau} = \dfrac{1}{r_0 h_0^1}\left(r_{\frac12}\lambda_{\frac12}\dfrac{y_1^{j+1}-y_0^{j+1}}{h_1^1} - \alpha\ r_0\left(y_0^{j+1}-T_{воды}(t)\right)\right), -гр.условие\ \ \Gamma_4 \\ cp_{n_1}\dfrac{y_{n_1}^{j+1}-y_{n_1}^j}{\tau} = \dfrac{1}{r_{n_1}h_{n_1}^1}\left(-r_{n_1-\frac12}\lambda_{n_1-\frac12}\dfrac{y_{n_1}^{j+1}-y_{n_1-1}^{j+1}}{h_{n_1}^1}\right), на\ границе\ \Gamma_2 \\ \lambda_{n_1-\frac12} \approx \dfrac{\lambda_{n_1}+\lambda_{n_1-1}}{2} \\ cp_{n_{3к}}\dfrac{y_{n_{3к}}^{j+1}-y_{n_{3к}}^j}{\tau} = \dfrac{1}{r_{n_{3к}}h_{n_{3к}}^1}\left(-\alpha\ r_{n_{3к}-\frac1z}\left(y_{n_{3к}}^{j+1}-T_{окр}(t)\right)\cos\varphi - r_{n_{3к}-\frac1z}\lambda_{n_{3к}-\frac1z}\dfrac{y_{n_{3к}}^{j+1}-y_{n_{3к}-1}^{j+1}}{h_{n_{3к}}^1}\right) \\ \lambda_{n_{3к}-\frac1z} \approx \dfrac{\lambda_{n_{3к}}+\lambda_{n_{3к}-1}}{2} \qquad -гр.условие\ \Gamma_1 \end{cases} \tag{10}$$

Здесь $n_{3к} = n_1 - (j_\varphi - nf_1)$, где n_1 - общее число узлов сетки по радиусам, j_φ - номер угла, nf1 - число узлов равномерной сетки по углам до пересечения с дневной поверхности.

Теплофизические функции для полярных координат вычисляются по формулам [5]:

$$c\rho_i = \frac12(\overline{c\rho}_{i+1} + \overline{c\rho}_i) + d_i^+ + d_i^-,\ \ c\rho_0 = \overline{c\rho}_0 + d_0^+,\ c\rho_N = \overline{c\rho}_N + d_N^-$$

$$\overline{cp_i} = \begin{cases} \theta cp(T_i)\left(r_i + \dfrac{\theta\ h_{i+1}}{2}\right) + (1-\theta)cp(T_{i+1})\left(r_i - \dfrac{(1-\theta)h_{i+1}}{2}\right), \\ (T_i - T_\phi)(T_{i+1} - T_\phi) < 0, \\ cp(T_i)(r_i + h_{i+1})\ \ (T_i - T_\phi)(T_{i+1} - T_\phi) > 0 \end{cases} \tag{11}$$

$$d_i^+ = \begin{cases} \dfrac{(1-\theta)(r_i - \theta h_i)}{|T_{i+1} - T_i|},\ (T_i - T_\phi)(T_{i+1} - T_\Phi) < 0 \\ 0,\ \ (T_i - T_\phi)(T_{i+1} - T_\Phi) > 0 \end{cases} \tag{12}$$

$$d_i^+ = \begin{cases} \theta(r_i - (1-\theta)h_{i+1}), & (T_i - T_\Phi)(T_{i+1} - T_\Phi) < 0 \\ 0, & (T_i - T_\Phi)(T_{i+1} - T_\Phi) > 0 \end{cases} \tag{13}$$

$$\lambda_{i+\frac12} = \begin{cases} \dfrac{h_{i+1}}{\dfrac{1}{\lambda(T_i)} + \ln\dfrac{r_i + \theta h_{i+1}}{r_i} - \dfrac{1}{\lambda(T_{i+1})}\ln\left(\dfrac{r_i + \theta h_{i+1}}{r_i}\right)}, & (T_i - T_\Phi)(T_{i+1} - T_\Phi) < 0 \\ \dfrac{\lambda(\mathrm{T_i})h_{i+1}}{\ln\dfrac{r_{+1}}{r_i}}, & (T_i - T_\Phi)(T_{i+1} - T_\Phi) < 0 \end{cases} \qquad \theta = \frac{T_\Phi - T_i}{T_{i+1} - T_i} \tag{14}$$

По второму направлению имеем аналогичную разностную задачу:

$$\begin{cases} c\rho_k\dfrac{z_k^{j+1}-Z_k^j}{\tau} = \dfrac{1}{r_i^2 h_k^2}\left(\lambda_{k+\frac12}\dfrac{z_{k+1}^{j+1}-z_k^{j+1}}{h_{k+1}^2} - \lambda_{k-\frac12}\dfrac{z_k^{j+1}-z_{k-1}^{j+1}}{h_k^2}\right), k < n_3 \\ \lambda_{k+\frac12} \approx \dfrac{\lambda_k + \lambda_{k+1}}{2} \\ \lambda_{k-\frac12} \approx \dfrac{\lambda_k + \lambda_{k-1}}{2} \\ z_{ik}^j = y_{ik}^{j+1} \ \text{- нач. условие} \\ c\rho_{n_3}\dfrac{z_{n_3}^{j+1}-Z_{n_3}^j}{\tau} = \dfrac{1}{r_i^2 h_{n_3}^2}(-r_i\alpha(z_{n_3}^{j+1} - T_{окр}(t))\sin\varphi - \lambda_{n_3-\frac12}\dfrac{z_3^{j+1}-Z_{n_3-1}^{j+1}}{h_{n_3}^2} \\ -гр.условие\ на\ \Gamma_1 \\ \lambda_{n_3-\frac12} \approx \dfrac{\lambda_{n_3}+\lambda_{n_3-1}}{2} \\ c\rho_0\dfrac{z_0^{j+1}-Z_0^j}{\tau} = \dfrac{1}{r_i^2 h_0^2}\left(\lambda_{\frac12}\dfrac{z_1^{j+1}-Z_0^{j+1}}{h_1^2}\right), \quad h_0^2 = \dfrac{h_1^2}{2} \ \text{на границе}\ \Gamma_3 \\ c\rho_{n_2}\dfrac{z_{n_2}^{j+1}-Z_{n_2}^j}{\tau} = \dfrac{1}{r_i^2 h_{n_2}^2}\left(\lambda_{n_3-\frac12}\dfrac{z_{n_3}^{j+1}-Z_{n_3-1}^{j+1}}{h_{n_2}^2}\right), \quad \text{на границе}\ \Gamma_5 \\ \lambda_{\frac12} \approx \dfrac{\lambda_0+\lambda_1}{2}, \quad \lambda_{n_3-\frac12} \approx \dfrac{\lambda_{n_2}+\lambda_{n_3-1}}{2}, \quad h_{n_2}^2 = \dfrac{h_{n_3}^2}{2} \end{cases} \tag{15}$$

Здесь $n_3 = n_2 - (i_r\text{-}nr)$, где n_2 - общее число узлов сетки по углам, i_r - номер радиуса, n_r - число узлов

равномерной сетки по радиусам до пересечения с дневной поверхности.

Результаты исследований

Используя предлагаемый алгоритм определения динамики температурного поля прогнозировалась глубина протаивания грунта под воздействием теплопровода, действующего в пригороде г. Якутска при следующих исходных данных:

	Труба из сшитого полиэтилена	Изоляция из пенополиуретана	Оболочка из полиэтилена
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К)	0,4	0,036	0,46
Плотность, кг/м^3	950	25	950
Удельная теплоемкость, Дж/(кг*К)	2300	1470	2000

Геометрические размеры: глубина центра трубы 1 м, радиус трубы 0.05 м, толщина теплоизоляции 0.03 м.

Температуры окружающего воздуха были получены аппроксимацией многолетних метеоданных.

На рис. 2 представлено изменение температуры по времени на различных глубинах грунта под теплопроводом, начиная от отопительного сезона (октябрь), включая его окончание (май) и начало следующего сезона (сентябрь) до начала мая. На графике видно влияние теплопровода на температурный режим грунта на глубине 3,6 м, в то время как глубина сезонного протаивания вечномерзлого грунта без теплопровода составляет около 2,5м.

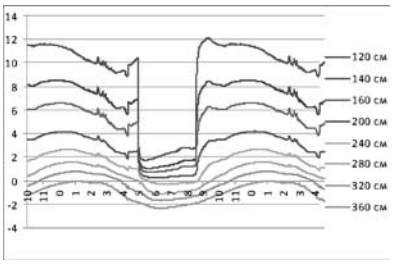


Рисунок 2 - Изменение температуры по времени на различных глубинах грунта.

На рис. 3 представлены расчетные глубины протаивания грунта в течение 20 лет в конце отопительного сезона (на начало мая месяца). Расчеты показывают, что после 11 лет эксплуатации теплопровода глубина протаивания стабилизируется.

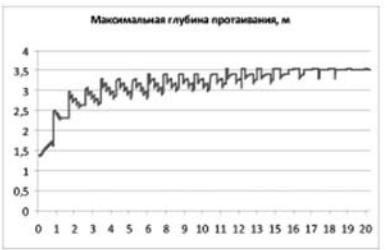


Рисунок 3 - Изменение максимальной глубины протаивания по времени.

Заключение

Известно, что в г. Якутске максимальная глубина протаивания вечномерзлого грунта достигается осенью и составляет около 2,5 м. Расчеты показывают, что под воздействием теплопровода глубина максимального сезонного протаивания во второй год эксплуатации достигается в январе месяце и составляет примерно 3, 5 м. После 11 лет эксплуатации теплопровода максимальная глубина протаивания устанавливается.

Список литературы

1. СН и П 41-02-2003. Тепловые сети (приняты Постановлением Госстроя РФ от 24.06.2003 №110).

2. Размазин Г.А., Моисеев Б.В. Тепловое взаимодействие бесканальной прокладки теплопроводов с вечномерзлыми грунтами// Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов / Сб. материалов I Международной научно-практической конференции. Пенза, ПДЗ, 2000. С.106-110.

3. Гордезиани Д.Г., Меладзе Г.В. О моделировании третьей краевой задачи для многомерных параболических уравнений в произвольной области одномерными уравнениями. – ЖФМ и МФ, 1974, Т.14, №1. С. 246-250.

4. Охлопков Н.М. О некоторых разностных методах решения задач для дифференциальных уравнений.- Иркутск: Изд-во Иркут. Ун-та. 1986. – 209 с.

5. В.И. Слепцов, С.Д. Мордовской, В.Ю. Изаксон. Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетне-мерзлых горных породах. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996.-104с.

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОРОД «ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА» И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА Ж/Д АЯМ «БЕРКАКИТ-ТОММОТ-ЯКУТСК»

Литовко А.В.

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск, e-mail: Lav_84@mail.ru

В докладе дана характеристика геокриологических условий «ледового комплекса», наиболее сложного участка (688 км – 734 км) строительства железной дороги АЯМ. Приведена методика исследований температур пород в годовом цикле их изменений до глубины 10 м. Показаны изменения геокриологических условий на территории ледового комплекса в ходе естественного изменения климата и под воздействием различного типа технической нагрузки. Дана характеристика используемых конструкций земляного полотна для строительства железной дороги по Принципу – I (сохранение многолетнемерзлых пород основания линейного сооружения при строительстве и на период его эксплуатации). Предложена система мероприятий по контролю качества выбранных конструкций для обеспечения эффективной эксплуатации железной дороги на участке ледового комплекса.

Геокриологические процессы, многолетнемерзлые породы, повторно-жильные льды, инженерно-геокриологический мониторинг, геокриологические условия.

Введение

Под ледовым комплексом обычно понимают плащеобразно залегающий горизонт сильно льдистых отложений различного генезиса, состава, строения и свойств.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, в последние десятилетия выполняет комплексные фундаментальные и прикладные исследования геокриологических условий территории строительства железнодорожной магистрали АЯМ. В них принимали участие Н.П. Босиков, И.С. Васильев, С.П. Варламов, М.Н. Железняк, И.П. Константинов, П.Н. Скрябин, А.Н. Федоров, Н.И. Шендер и мн. др. В результате получены дополнительные сведения о закономерностях формирования геокриологических условий «ледового комплекса». Обращено внимание на особенности их изменений от технической нагрузки на ландшафты. Показано, что естественное изменение климата, не окажет на «ледовый комплекс» большого влияния.

Доклад написан по результатам исследований ИМЗ СО РАН, выполненным в соответствии с программой Государственного контракта РС (Я). Цель работы заключалась в создании геокриологического мониторинга и оценке динамики геокриологических условий в полосе строительства железнодорожной магистрали АЯМ на участке Беркакит-Томмот-Кердем, включая территорию распространения «ледового комплекса».

1. Методика исследований

Исследования геокриологических условий ледового комплекса в мониторинговом режиме выполняются с 1987 г, в связи с трансформацией криогенной среды при воздействии техногенного прессинга (Д.М. Шестернев, 2011 г.).

Выполненное на начальном этапе ландшафтное районирование территории исследований позволило обосновать границы стационаров и выполнить их оборудование (рис. 1).

Первая стационарная площадка расположена между населенными пунктами Качикатцы и ст. Нижний Бестях, вторая - в районе ст. Олень. Обе площадки оборудованы полигонами и стационарными пунктами исследований температур пород до глубины 10 м.



Рисунок 1 - Схема района исследований:
1 – стационары, 2 – полигоны, 3 – площади ландшафтного картографирования.

Изменение основных климатических характеристик отслеживается по данным метеостанции г. Якутска. Для установления закономерностей формирования параметров снежного покрова, ежегодно, в конце зимы, производится снегомерная съемка.

На территории площадок проводится зондировочное бурение, для изучения состава, строения и свойств грунтов в изменяющихся природных условиях трассы АЯМ.

В 2009-2010 года выполнено дооборудование ключевых участков мониторинговой геодезической и геотермической сети, с учетом используемых строителями конструкций земляного полотна. В состав комплекса инженерно-геокриологических исследований входили следующие виды работ:

- проходка горных выработок на участках распространения высокотемпературных многолетнемерзлых пород (ММП), на марях, водонасыщенных, мерзлых и льдистых грунтах;
- оборудования геотермических скважин и реперов, глубиною не менее 10 м, установке геодезических марок;

Оборудование термометрической и геодезической сети наблюдений выполнялось по профилям, ориентированным по нормали к земляному полотну. Измерение температур осуществлялось с применением логгеров и термогирлянд.

На каждом профиле было оборудовано 3…5 и более пунктов наблюдений, каждый из которых располагался с учетом характера изменений природной среды.

Объектами исследований «ледового комплекса» являлись: криогенная среда - слой сезонного оттаивания и промерзания пород, ММП до глубины годовых колебаний температур;

- снежный покров, как самый мощный теплоизолирующий фактор, оказывающий влияние на формирование верхних граничных условий существования криогенной среды;
- криогенные процессы и явления (КПиЯ), развивающиеся в естественных природных условиях и под воздействием различных техногенных факторов в полосе трассы железнодорожной магистрали АЯМ.
- температурное поле грунтов оснований и земляного полотна на участках строительства магистрали по Принципу-I, предусматривающего, сохранение ММП при строительстве и на период ее эксплуатации.

Перечисленные виды исследований были выполнены в соответствие с требованиями нормативных документами (ГОСТ, СНИП, ведомственными нормативами).

Результаты исследований.

В Центральной Якутии в последние 30 лет наблюдается один из наиболее высоких в России трендов повышения среднегодовой температуры воздуха (до 0,08 оС/год). Если в 60-70 годы прошлого века потепление климата еще не было таким заметным, то в 80-е годы оно проявилось уже достаточно отчетливо. Последние два десятилетия XX века и первое десятилетие XXI века, были самыми теплыми за всю историю метеорологических наблюдений в Центральной Якутии[5] В этот период среднегодовая температура воздуха лишь дважды оказывалось ниже нормы, равной -10оС. Из работ Ю.Б. Скачкова следует, что повышение среднегодовой температуры воздуха в Якутии связано, в первую очередь, с увеличением числа аномально теплых зим, формирующихся в результате трансформации циркуляции воздуха в атмосфере.

За период с 1981 по 2007 гг. отмечалось 19 зим с суммой отрицательных температур воздуха выше среднемноголетнего значения. Особенно примечателен период с 1988 по 2007 гг., когда зимние сезоны ежегодно «не добирали» до нормы в среднем по 10 % «положенного холода». Увеличение температуры воздуха в летние сезоны было менее значимым. Мощность снежного покрова в это период изменялась в пределах 0,4…0,6 м.

Распространение, строение и температура пород «ледового комплекса». В естественных условиях верхняя граница «ледового комплекса», залегает преимущественно на глубине 1,5-2,5 м. В его строении кроме текстурообразующего льда, часто встречаются жильные и пластовые льды, мощностью 3-4 и более метров.

Исследования Института мерзлотоведения в рамках Госконтракта РС (Я) в 2005- 2007 гг, обобщение результатов инженерно-геологических изысканий Южно-Якутского и Якутского ТИСИЗов позволили составить карту льдистости пород «ледового комплекса» на участке ст. Олень-ст. Кердем. Согласно составленной карте границы «ледового комплекса» в пределах Абалахской надпойменной террасы р. Лена (км 703 – км 743), можно расширить и считать, что железная дорога пересекает грунты аналогичного типа, что и «ледовый комплекс», на отрезке трассы 670 км – 750 км.

Таким образом, первый участок «ледового комплекса» приурочен к Лено-Амгинскому песчаниковому району на его северной периферии (км 669 – км 703). Здесь рыхлые льдистые четвертичные отложения залегают на юрских песчаниках. В пределах р. Лютенки (км 689 – км 694) рыхлые четвертичные отложения залегают на кембрийских известняках и доломитах. В их пределах выделяются подрайоны - собственно песчаниковый (км 670 – км 688) и переходный - полигенетической равнины (км 688 – км 703). В первом подрайоне мощность четвертичных отложений составляет 5-8 м с льдистостью более 0,3 д.ед. В переходной зоне колебаний, нижней границы подошвы слоя сезонного оттаивания, установлен выдержанный по простиранию слой льда мощностью до 0,5 м. Температура массива пород на глубине годовых колебаний температуры -1,0…-2,0°С.

В пределах переходной полигональной равнины, распространены четвертичные отложения с полигонально-жильными льдами. Мощность отложений 15…20 м. Мощность пластовых льдов, встреченных здесь достигает 10 м.

Температура грунтов в подрайонах отличается незначительно и изменяется на глубине годовых колебаний в пределах -1,2…-2.5°С. Глубина сезонного оттаивании и промерзания грунтов составляет 0,8-1,8 м. В долине р. Лютенки диапазон изменения температур грунтов значительно шире и составляет -0,8… -4,4°С.

Второй участок, собственно «ледовый комплекс», расположен в пределах Вилюйской синеклизы. Трасса железной дороги пересекает его в зоне смыкания синеклизы с Алданской антеклизой.

В геоморфологическом отношении «ледовый комплекс» расположен на V надпойменной (Абалахской) среднеплейстоценовой террасе р. Лена. В пределах распространения «Ледового комплекса» существует большое количество разнообразных типов местности: региональный склон Лено-Алданского плато; межаласный водораздел; склон межаласного водораздела; озерно-аласная котловина; межкотловинное понижение; склоны речных долин; днища речных долин[1, 2].

Поверхность Абалахской террасы практически состоит из аласных понижений и межаласий. Современные аласы заняты озерами, под которыми существуют несквозные талики. В пределах древних аласов отмечается новообразование криолитозоны. В межаласовых поднятиях, развиты повторно-жильные льды и высокольдистые грунты. Наряду с этим в межаласиях встречаются, маловлажные грунты в слое сезонного оттаивания и промерзания мощностью 2,0-2,5 м. Мощность отложений «ледового комплекса» достигает 20-25 м, ниже, до глубины 50 м, залегают аллювиальные маловлажные, влажные реже – обводненные грунты. Температура грунтов на глубине годовых их колебаний на межаласье изменяется в пределах -2,5…-4,0, в днищах аласов – -0,5…-2,5°С, глубина сезонного оттаивания составляет 0,5…2,5 м

Исследования П.П. Гаврильева и И.С. Угарова [3], выполненные на лево- и правобережье (ледовый комплекс) р. Лена показали, что при отсутствии нарушений в пределах луговых ландшафтов за 18 лет тренд увеличения глубины сезонного оттаивания составил 0,024, лесных – 0,014 м/год. В это же время с 1989 по 2007 годы в пределах полигона Майя, на раскорчеванных участках лесных ландшафтов с дальнейшим их использованием в сельском хозяйстве произошло повышение температур пород от -3,0…-5,0 до -0,5…-2,0°С, в пределах распаханных межаласовых луговых ландшафтов до -1,0…-2,0, а на склонах температура пород была в 2001 г. была уже не ниже -1,0°С. Глубина сезонного оттаивания в отдельных случаях увеличилась от 1,5 до 4,5 м. На рассмотренных выше территориях локальные просадки диаметром до 0,6 м достигали глубины 1,5 и более метров, а их количество увеличилось в 25-30 раз.

Аналогичные исследования, выполненные в пределах «ледового комплекса» на трассе железной дороги АЯМ показали, что изменения температур, увеличения глубин слоя сезонного оттаивания и деформаций оттаивающих грунтов существенно зависят от типов нарушения почвенно-растительных покровов (рис. 2).

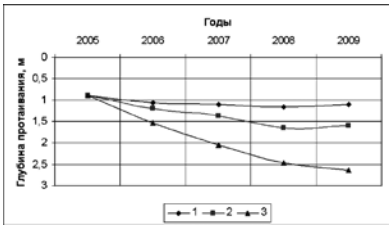


Рисунок 2 - Изменение глубины сезонного протаивания грунтов «ледового комплекса» 1 - поверхность с естественной растительностью; 2 – поверхность с удалением лесорастительного покрова (вырубка); 3 – поверхность с удаленным напочвенным (мощность 10-20 см) и лесорастительным покровами.

В ненарушенных условиях глубина сезонного оттаивания грунтов в период с 2005 по 2009 год практически не изменилась, при вырубке леса - увеличилась от 0,8 до 1,7 , при удалении напочвенного покрова – от 0,8 до 2,7 м (рис.3). Этого увеличения глубин сезонного оттаивания достаточно, чтобы вызвать развитие термокарста, поскольку верхняя граница залегания жильных льдов часто находится в интервале 1,5…2,3 м.

В пределах распространения льдистых и высокольдистых грунтов, даже при высоких их отрицательных температурах, при проектировании строительства АЯМ на участке «ледового комплекса», предпочтение было отдано использованию Принципу I. Но его применение требует достаточно надежных, и часто индивидуальных мероприятий, обеспечивающих сохранение существующих параметров криолитозоны или их улучшение.

Разработка индивидуальных конструкций земляного полотна осуществлялась ООО «Проекттрансстрой» с использование разработок МИИТа, при участии ИМЗ СО РАН, ЦНИИСа, ТрансИГЭМ. Несомненно был учтен и опыт строительства и эксплуатации железных дорог в России и за ее пределами [4]. К сожалению, воздействие криогенных процессов на земляное полотно и их влияние не изменение структуры температурного поля в полосе трассы в целом, неучитывалось.

В комплекс мероприятий, определяющих возможность использование Принципа I входят: 1) вертикальные парожидкостные СОУ в сочетании с теплоизолятором – пенополистиролом на 39 участках (км 693 – км 710, км 730), общей протяженностью 4,9 км (грунты IV категории просадочности); 2) тепловая изоляции из экструдированного пенополистирола толщиной 5 см на откосах и бермах (на км 709 протяженностью 129 м); 3) устройство консольных солнцезащитных навесов на откосах(на км 709 протяженностью 100 м); 4) устройством СОУ (на км 709 протяженность 100 м). Мероприятия 2, 3 и 4 были использованы на опытном участке, в пределах которого геокриологические условия примерно одинаковы. Для установления эффективности перечисленных мероприя-



Рисунок 3 - Карта-схема обустройства термометрических створов на «ледовом комплексе».

тий, Институтом мерзлотоведения в 2007-2010 гг. на 4-х участках было оборудовано 9 термометрических створов (ПК 6926, 6932, 6934, 7087, 7088, 7089, 7175+15, 7179, 7270+23). (рис.3)

Первые результаты наблюдений за изменением температуры пород в основаниях земляного полотна, построенного по индивидуальным проектам, с применением управляющих технологий по защите грунтов оснований от протаивания, дали в целом положительные результаты. При существующей тенденции к повышению температур на глубинах 1,5…2,0 м в течение 2-х последних лет, температура грунтов на этих глубинах колебалась в пределах -1,0…-2,0°С. В то же время в бортах откосов и в пределах водоотводных кюветов температура пород начала повышаться, увеличивается здесь и глубина сезонного протаивания. В результате в полосе трассы, наблюдается развитие нежелательных физико-геологических, криогенных процессов и явлений.

В пределах трассы железной дороги, на участке развития «ледового комплекса» в периферийных зонах земляного полотна широкое развитие получили следующие КПиЯ: сезонное наледеобразование, пучение, термокарст и термоэрозия; в бортах выемок – оползни, сплывы, термоэрозия; на контакте земляного полотна и периферийных участков трассы и кюветах – осадки, просадки, заболачивание, термоэрозия; в пределах искусственных сооружений: мостов – размыв грунтов земляного полотна, осыпи, сплывы; водопропускных труб – термокарст, просадки и осадки на периферии сооружений и в основании земляного полотна.

Уже в настоящее время суммарный эффект воздействия на состояние земляного полотна проявляется в фрагментарном изменении его контуров, а в пределах искусственных сооружений – в виде незначительных деформаций.

Выводы

Необходимо отметить, что в отличие от строительства участка Беркакит-Томмот, строители сумели в экстренном порядке разработать и применить современные технологии управления температурным режимом грунтов в основании земляного полотна. Результаты наблюдений изменения геокриологических условий при строительстве железной дороги на участке распространения «ледового комплекса», выполненные в последние три года показали:

1. Глобальное изменение климата, в сравнение с техногенным прессингом оказывает на изменение геокриологических условий медленное и незначительное влияние.

2. Первые результаты наблюдений за изменением температуры пород в основаниях земляного полотна, построенного по индивидуальным проектам, с применением управляющих технологий по защите оснований от протаивания, дали в целом положительные результаты.

3. Техногенный прессинг, заключающийся в рубке леса и снятии напочвенного покрова повышает температуру пород от -3,0…-5,0 до -1,0…-2,0°С, а глубину сезонного оттаивания в 2-3 раза (от 0,75 до 2,5-3,0 м).

4. В периферийных зонах земляного полотна, на участках строительства искусственных сооружений развит комплекс криогенных процессов и явлений, суммарный эффект воздействия от которого на состояние грунтов основания земляного полотна может быть выше примененных управляющих технологий.

5. Используемые индивидуальные конструкции земляного полотна, при всей их обоснованности, все-таки, могут быть эффективными только в том случае, если будет решена задача по отводу поверхностных вод из коридора трассы.

6. На наш взгляд, было бы ошибкой считать, что уже сейчас можно быть полностью уверенным, в положительном результате применения выше перечисленных технологий обеспечения функционирования оснований земляного полотна по Принципу I. Поэтому, мониторинговые исследования в пределах трассы АЯМ должны быть длительными и регулярными, и обеспечивать объективную оценку качества используемых разработанных и известных конструкций земляного полотна в условиях криолитозоны.

Список литературы

1. Варламов С.П. Инженерно-геокриологические условия территории распространения пород ледового комплекса на строящейся железнодорожной магистрали Томмот-Якутск. – Пробл. инж. мерзлотоведения. Мат-лы VII Межд. Симп.-ма 21-23.11.2007. Чита, с.77-81

2. Васильев И.С., Варламов С.П., Федоров А.Н., Железняк М.Н. Мерзлотно-ландшафтное районирование трассы строящейся железной дороги Томмот-Кердем //Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 3, с. 29-34.

3. Гаврильев П.П., Угаров И.С. Реакция пород ледового комплекса Центральной Якутии на потепление климата//Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 1.-с. 24-30

4. Позин В.А., Лукин И.П., Дедова Н.П. 2007. Проект решения по земляному полотну на участках «ледового комплекса»/Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот – Кредем на участке «ледового комплекса». Мат-лы Семинара-совещания 11-12 сентября 2007 г. в г. Якутске.- ООО «Центр Трансстройиздат», 2007. - с. 39-60.

5. Шац М.М., Скачков Ю.Б. Изменение климата Якутска и его влияние на городскую инфраструктуру// Чистый город, 2010, № 2(50) – с. 16-22

ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОГЕНЕЗА И МЕРЫ НАПРАВЛЕННЫЕ НА ОСЛАБЛЕНИЕ ЕГО РАЗВИТИЯ (НА ПРИМЕРЕ ПЛОЩАДКИ АВТОЗАПРАВОЧНОГО КОМПЛЕКСА В ПОСЁЛКЕ МАГИСТРАЛЬНОМ – БАМ).

В.К. Лапердин, В.И. Юшкин

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: Laperdin@crust.irk.ru

Технически эффективная и экономически целесообразная защита объекта от опасных процессов возможна при наборе необходимых данных, полученных на основе мониторинга. Спрогнозировать изменения природных условий в криолитозоне под воздействием техногенеза можно только на основе знания закономерностей развития сезонных и многолетнемерзлых пород, определяющих формирования криогенных процессов, что является исходными данными для управления инженерногеокриологической обстановкой и создания оптимальных условий эксплуатации автозаправочного комплекса и охраны природной среды.

Введение

Строительство и эксплуатация автозаправочного комплекса (АЗК) в посёлке Магистральном находятся в зависимости от взаимосвязанных специфических геолого-геоморфологических, климатических и техногенных факторов.

Степень изменения природных условий и, соответственно, развития опасных процессов криогенной группы на площадке определяется характером нарушения естественных геолого-геоморфологических условий, скоростью и степенью их восстановления, конструктивными и технологическими особенностями строительства и эксплуатации комплекса, а также температурными и литологическими параметрами сезонно - и многолетнемерзлых пород. Необходимость организации на площадке специальной теплоизоляционной защиты от воздействия инженерно-геокриологических процессов обусловлена возможным развитием таких опасных явлений, как просадки, перекосы, трещины оседания и пучение грунтов в основании откосов площадки, а также наледи в оголовках водопропусков. Места потенциального формирования неблагоприятных процессов и явлений требуют постоянного контроля для своевременного принятия превентивных мер защиты и обеспечения бесперебойности и надежности работы АЗК.

Для инженерно-геологической оценки грунтов площадки и прилегающей к ней территории необходимо было знать мерзлотные условия на момент изысканий и спрогнозировать их изменение в период строительства и эксплуатации АЗК. Это позволило выбрать оптимальные условия в технико-экономическом и конструктивном отношениях и предложить варианты отсыпки грунтов с применением теплоизолирующих материалов на территории площадки, направленных на защиту от воздействия криогенных процессов.

Основные факторы формирования криогенеза

Из морфологических особенностей следует отметить о том, что площадка АЗК расположена на 1-ой надпойменной пологосклонной (1,0–1,5о) террасе р. Окунихты, где отсутствие интенсивного поверхностного стока, на фоне глубокого сезонного промерзания и распространения высокотемпературных многолетнемёрзлых пород (ММП), способствует заболачиванию и активному развитию опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП) криогенной группы. И всё же, несмотря на значительную сложность природных условий, наличие приподнятой на 0,5–1,5 м поверхности площадки над сопредельной территорией и близость автодороги являются относительно благоприятными факторами для строительства АЗК.

В геологическом строении верхнюю часть 11,0 м разреза площадки представляют многолетнемерзлые биогенные отложения (почвенно-растительный слой, мощностью 0,3 м и льдистый торф – до3,0 м, плотностью 1,12 т/м3, с влажностью 75,4 %), перекрывающие аллювиальные отложения (супеси, суглинки, галечники, пески с примесью органики и линзы льда и ледогрунта). Перечисленные грунты имеют преимущественно монолитную криогенную текстуру, плотностью в пределах 1,76–2,08 т/м3, с влажностью от15,2 до 90 % и более (в ледогрунтах) и четвертую категорию просадочности.

Нормативная глубина сезонного оттаивания в п. Магистральный составляет 1,5–3,0 м, а истинная на площадке АЗК, на период 16 октября 2007 г - 0,5 м (рис. 1).

ММП на площадке и за её пределами сохранились повсеместно, но имеют разный уровень верхней границы мерзлоты, что связано с частичной её деградацией, зависящей от характера нарушений растительного, почвенного и грунтового покрова, определяющих локальные участки опасностей. Нарушение особенно не допустимо при отсыпке первого теплоизоляционного слоя грунтов АЗК, так как развитие термокарста может произойти в результате повреждения верхнего горизонта торфа и локального возмущения температурного режима ММП. Скорость деградации мерзлоты



Рисунок 1 - Блёски на дне шурфа свидетельствуют о значительном содержании ледяных включений в торфе.

зависит от процентного содержания льда, температуры, фильтрационных и теплоизолирующих свойств грунта. Температура ММП на данной территории находится в пределах от –0,1 до –1,0 оС, а в слое сезонного промерзания на контакте с многолетней мерзлотой, может опускаться ниже –3,0 оС [1].

Криогенез многолетнемёрзлых грунтов

Термоэрозионные формы развиваются на склонах с минимальными уклонами 1–5о, что вполне возможно за пределами границ площадки, так как возведённый комплекс станет препятствием на пути паводковых и талых вод. В подобных условиях рекомендуется не собирать воду в потоки, а при необходимости отводить по желобам и трубам, дальше от комплекса. Так как развитие термоэрозионных форм происходит непредсказуемо не только во времени, но и в пространстве, даже без выпадения осадков, а за счет оттаивания и потери теплоемкости высоко льдистых ММП. Такими, за пределами площадки, являются торфяники и залегающие ниже слои ледогрунтов.

Термокарст на площадке формируется на базе высокотемпературной многолетней мерзлоты деградационного типа при довольно высокой льдистости торфа и совпадает с областью локальной деградации.

На площадке имеются блюдцеобразные просадки, сформированные в результате неравномерного вытаивания текстурообразующих повторно-жильных льдов в торфе, определяющих характер условий тепловлагообмена верхних горизонтов ММП.

Наиболее интенсивно развитие термокарста на локальных участках происходит в годы повышенным увлажнением и несколько затухает в засушливые годы, когда в сезонно-талом слое торфа преобладает кондуктивная теплопередача, тогда как в относительно дождливые периоды возрастает доля конвективной теплопередачи, при которой активизируется термокарстовый процесс. О чём свидетельствуют понижения - озерки, мочажины, размером 2*2 м, глубиной до 0,5 м, которые образовались в результате оттаивания, с последующей просадкой и уплотнением неравномерно льдистых грунтов. Эти понижения создают условия для формирования болот.

Развитие процессов в сезонно-талом слое грунтов

Заболачивание.

На относительно плоской поверхности первой надпойменной террасы реки Окунихты интенсивность развития различных типов болот зависит от: а) наличия многолетнемёрзлых пород; б) избыточного количества осадков; в) слабого поверхностного стока; г) техногенного фактора.

В настоящий период, в целом 40–50 % заболоченной территории долины, представляют болота, связанные с деградацией мерзлоты и зарастанием кочкарником реликтовых стариц и древних термокарстовых понижений.

Болота 35-40 лет назад, в результате активного техногенного вмешательства в природную среду, начали зарастать угнетённым криволесьем (лиственница, ель, берёза), мхом и кустарником. До этого периода леса здесь не было, о чём свидетельствует отсутствие пней старше чем, произрастающих сейчас деревьев. Подчеркивающей особенностью болот является их заторфованность, составляющая в пределах площадки 100 %. Вдоль насыпей шоссейной и железной дорог, в результате деградации верхнего горизонта ММП, формируются природно-техногенные термокарстовые просадки, представленные небольшими озёрами. Причем при высоком уровне воды они могут быть проточными. Не исключено поступление в болото техногенных вод со стороны посёлка и замкнутый дорогами участок является своего рода коллектором сточных вод (рис. 2).

Пучение грунтов.

Динамика пучения грунтов ежегодно меняется в зависимости от влажности на период замерзания, мощности снежного покрова и от температурного режима. Причем зависимость условий развития бугров пучения в большей степени распространяется на сегрегационный механизм образования, так как в инъекционном процессе принимают участие подземные воды, которые по данным бурения на участке до глубины 11,0 м. не были встречены.



Рисунок 2 - Термокарстовые просадки тянутся по обе стороны автодорожной насыпи, а сезонное пучение на болотах сопровождается развитием кочкарника.

Активное пучение грунтов в этом регионе в среднем начинается в первой декаде ноября, а весной величина пучения составляет 30–35 % от суммарного значения. Бывают и существенные отклонения во времени, когда из-за необычно тёплой погоды или раннего выпадения снежного покрова процесс промерзания грунтов, а соответственно и пучения запаздывает на полторы декады.

О существовании бугров пучения в пределах площадки свидетельствуют искривлённые стволы деревьев (рис. 3). Причём



Рисунок 3 - Множество искривлений на стволах деревьев подчеркивает о многократном отклонении их от вертикального положения (результат пучения грунтов).

процесс наклона в разные стороны повторяется практически ежегодно. Высота бугров пучения в пределах площадки не превышает 1,0 м, при максимальном диаметре бугров 2,0–3,0 м.

Морозное растрескивание грунтов.

Растрескивание грунтов начинается с некоторым запозданием от начала промерзания. Заметные трещины появляются при промерзании грунта на 30 см. Первые раскрытие трещин ускоряют ход промерзания. Особенно активно процесс трещинообразования на данной территории происходит в конце ноября и апреля – в периоды резких переходов через 0 оС и перепадов в течение суток в поверхностных горизонтах температуры грунта до 25 оС. Весной морозобойные трещины образуются на глубину сезонного оттаивания, т.е. в данном случае - до 0,6 м. Трещинно-полигональный микрорельеф выражен на заболоченных участках, где блоки представляют собой многоугольные островки мха и торфа, площадью от 0,3 м2, до 1,0 м2, разделённые залитыми водой межблочными ложбинками, шириной до 0,1 м. В целом густота, величина раскрытия и глубина морозобойных трещин зависят от влажности грунта, мощности снежного покрова на период промерзания и частоте периодичности теплосмен.

Морозобойные трещины в естественных условиях способствуют потере прочности массивов промороженных грунтов, образованию повторно-жильных льдов и полигональных форм рельефа.

Инженерно-геофизические изменения сейсмических характеристик ММП под влиянием техногенеза

Многолетнемерзлые породы в Восточной Сибири, в большинстве случаев используются в качестве оснований строящихся зданий и сооружений, поэтому исследованию упругих свойств мерзлых и талых грунтов в процессе промерзания и оттаивания уделяется особое внимание.

Инженерно-геофизические методы позволяют изучать состояние криолитозоны через совокупность инструментально измеряемых упругих, электрических, температурных, плотностных и др. параметров. Их изменение во времени в зависимости от режима (оттаивание или промерзание) геологического разреза дает возможность контролировать и осуществлять прогноз прочностных характеристик ММП [2]. Скорости сейсмических волн и УЭС используются как своеобразные индикаторы, чутко реагирующие на любое изменение физического состояния ММП [3].

Такие данные позволяют не только оценить точность, устойчивость и изменения сейсмических характеристик ММП, полученных косвенными методами, но и прогнозировать их. Общие закономерности пространственно- временных изменений сейсмических параметров слоя годовых колебаний температур пород, можно выявить в ходе режимных инженерно-геофизических, инженерно-геологических, гидрогеологических и теплофизических наблюдений.

Для проведения режимных измерений использовался комплекс методов малоглубинной геофизики: сейсморазведочные - для изучения скоростей распространения продольных (Vp) и поперечных (Vs) волн в породах; электроразведочные - для изучения удельного электрического сопротивления (УЭС) пород; радиоизотопные и термометрические - для измерения плотности и температуры пород в скважинах [4].

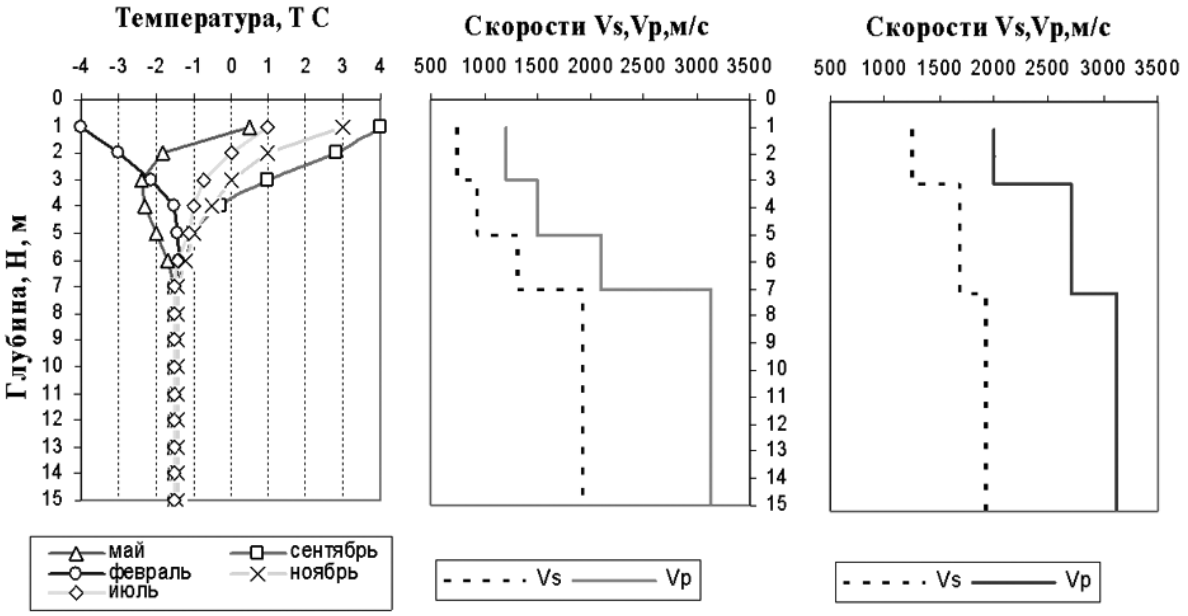


Рисунок 4 - Результаты режимных инженерно-геофизических исследований на площадке отсыпанной крупнообломочными гравийно-галечными грунтами, мощностью 3,0 м.

Учитывая мерзлотные и сейсмические условия Восточной Сибири, приведем некоторые результаты режимных наблюдений выполненных в этом районе на площадке под строительство, отсыпанной в сентябре крупнообломочными гравийно-галечными грунтами, мощностью 3м. Результаты измерений приведены на рис.4, где представлена динамика изменения температуры грунтов (февраль-ноябрь) и скорости распространения продольной волны с глубиной в зависимости от времени года (сентябрь-май). В результате исследований были получены изменения сейсмических параметров годовых колебаниях температур, в интервале глубин от 1,0 м до 3,0 м, скорость Vp изменяется в пределах 1200–2500 м/с, от 3,0 м до 7,0 м Vp=1500–2700 м/с и, наконец, стабилизируется изменение скорости с 7,0 м Vp=3125 м/с.

По данным режимных наблюдений получены изменения скоростей сейсмических волн, которые могут быть вызваны годовыми колебаниями температуры в слое сезонного промерзания - оттаивания при фазовых переходах воды в лед. Ниже слоя сезонного промерзания в пределах годовых колебаний температур, физические свойства мерзлых пород меняются менее динамично. Изменение этих свойств обусловлено различными градиентами в верхней зоне разреза: температурой, давлением, влажностью, перекристаллизацией, перераспределением льда и т.д., что ведет к сезонному изменению физических свойств горных пород.

Резкое уменьшение скорости продольных волн при температурах, близких к 0 оС, указывает на очень интенсивный процесс разрушения первых структурных связей и переход их во вторые. Стабилизация скорости свидетельствует о полном завершении этих переходов. Также, здесь можно отметить, что скорость продольных волн при отрицательных температурах в породах уменьшается, что связанно с уменьшением влажности и льдистости и увеличением воздушной пористости грунта.

Анализ этих результатов показывает, что - зная скорости распространения продольных волн с глубиной мы контролируем изменение влажностного и температурного режимов ММП, а следовательно и сейсмическую опасность данной площадки.

Таким образом, при расчетах сейсмической опасности грунтов основным показателем является скорость распространения сейсмических волн. Для мерзлых, талых и водонасыщенных пород, чем больше скорость тем выше прочность пород и они более устойчивы к деформированию при внешних воздействиях. Но для каждого физического состояния грунтов эта зависимость имеет свои особенности [6].

Для расчетов сейсмической опасности грунтов площадки выбран метод сейсмических жесткостей [5]. По формуле С.В. Медведева определена зависимость приращений сейсмической балльности от скоростей сейсмических волн в верхней зоне разреза:

$$\Delta I=1{,}67 \lg (\rho_э V_э / \rho_i V_i); \quad (1)$$

где ρэ Vэ и ρi Vi сейсмические жесткости эталонного и исследуемого грунтов, I-расчетные значения приращений балльности.

В случае водонасыщенных грунтов к формуле (1) вводиться поправка согласно выражения:

$$\Delta I=R\cdot e^{-0{,}04h*h}; \quad (2)$$

Коэффициент R для территорий, где преобладают песчаные и глинистые грунты принимается равным 1, а где гравийно-галечные - 0,5.

Для мерзлых грунтов вводится поправка в виде:

$$\Delta I=R\cdot e\text{-}0{,}5\ T; \quad (3)$$

где Т температура мерзлых грунтов, взятая по модулю, коэффициент R- для льдонасыщенных гравийно-галечных грунтов с песчаным заполнителем принимается равным 0,9. [7].

Сейсмичность площадки в естественных условиях, по СНиП II-7-81 для степеней сейсмической опасности - А (10%) и - В (5%), составляет 7 баллов.

При отсыпке разнородного по механическим свойствам грунта степень сейсмической опасности существенно поменяется. О чём свидетельствуют данные наших исследований, проведённых в приближённых к площадке условиях (рис. 4). Сейсмическим событиям сопутствуют пластические деформации грунтов, связанные с активной деградацией мерзлоты. В зависимости от грунтовых, гидрологических и мерзлотных условий сейсмическая опасность площадки может, меняется от 6 до 8 баллов.

Данные наблюдений за динамикой криогенеза в зонах сезонной и многолетней мерзлоты дают основания проверить и уточнить геокриологический прогноз и соответственно скорректировать мероприятия направленные на минимизацию развития опасных процессов, а при необходимости управлять ими. При этом ведущими критериями оценки опасности являются льдистость, температурный режим, глубина и темп оттаивания и промерзания в годовом цикле, а также физико-механические и теплофизические свойства грунтов.

Инженерно-геофизический мониторинг площадки позволяет предсказывать изменения параметров техногенных и сейсмических нагрузок на строящиеся ответственные здания и сооружения и своевременно принимать решения по предотвращению их последствий, а, следовательно, и снижению **техногенного и сейсмического риска** в процессе их эксплуатации в пределах **криолитозоны**.

Особенности проектирования и строительства АЗК

Особенность строительства выражается в том, что АЗК возводится в условиях, определивших

применение технических средств, в решении проблемы консервации, сохранения или даже аггрдации мощности ММП. Для этого, в качестве основания использованы многолетнемерзлые грунты, с сохранением почвенно-растительного покрова и с устройством (в зимний период, что очень важно) промежуточной изоляционной подушки из шлака и пеноплэкса, перекрывающиеся последовательно; слоем песка, - глыбового грунта, - гравия и монолитной бетонной плитой.

В свете охарактеризованных криогенной группы процессов в целом площадка по инженерно-геологическим условиям строительства отнесена к Ш категории сложности и следует считать как потенциально-опасной.

Поражённость заболоченной площадки морозобойными трещинами и морозным пучением дисперсных грунтов оценивается, как значительная, термокарстом – незначительная и потенциально возможная – термоэрозией.

После выполнения технологии отсыпки грунтов в период строительства и соблюдении принципиальной схемы, предложенных защитных мероприятий, направленных на решение ключевой проблемы, заключающейся в стабилизации процесса пучения сезонно-талого слоя и консервации деградации ММП в пределах АЗК, категория сложности инженерно-геологических условий снизится до минимального значения.

Программа организации и основное содержание системы инженерно-геокриологического мониторинга

Нарушение природных условий при освоении территории неизбежно приведёт к видоизменению развития ЭГП и формированию инженерно-геокриологических факторов природно-техногенного характера, по сравнению с компонентами естественно развивающихся ландшафтов. На этой основе, в целях получения объективной и сопоставимой информации о состоянии сезонно-мёрзлых и ММП на территории площадки на момент строительства и динамики их изменений, в период эксплуатации, необходима организация системы мониторинга.

Предлагаемая система наблюдений, контроля, прогноза и управления призвана отвечать принципу взаимной связи и дополнительности влияния, как отдельных объектов, так и всего автозаправочного комплекса на геологическую среду, а также выявлять непрогнозируемые изменения развития ЭГП. Эти наблюдения проводятся с целью применения технических решений по стабилизации возможных просадок или пучений грунтов под комплексом. А если потребуется вплоть до искусственного промораживания, с принудительным внедрением в деградирующие грунты вертикальных или горизонтальных труб-сифонов [7]. Основанием для проведения геоэкологического мониторинга на площадке, также являются требования СНиП 3.01.06-85, «Положение о мониторинге земель в РФ от 15.07.92 г. за № 491» и различные ведомственные указания директивные и нормативно-методические документы ЗАО «Иркутскнефтепродукт», где в задачу входит контроль соблюдения нормативов качества природной среды, выполнения требований СНиПов и предписаний.

В состав работ службы, исходя из негласных правил и требований к эффективности мониторинга (под которыми понимается получение наибольшей информации при наименьших затратах), на данном объекте предлагается организовать следующие наблюдения:

1) устройство постов за измерением содержания вредных и токсичных веществ от источников загрязнения и сравнение их с допустимыми нормативными значениями;

2) измерение показателей осадок или подъёма (вертикальных смещений) как площадки в целом, так и отдельных её частей наземными дистанционными наблюдениями (топосъёмка четырёх углов и центра площадки два раза в первый год эксплуатации объекта - в апреле и сентябре);

3) периодическое выполнение снегосъёмок, с отбором проб;

4) регистрация просадок, пучения грунтов на границе площадки и на её откосах различных экспозиций (визуально).

5) в целях повышения эффективности мониторинга, в пределах площадки, в скважину, глубиной 11,0 м (от поверхности площадки), установить датчики для автоматического получения в любое время информации за динамикой промерзания и оттаивания грунтов и за состоянием ММП, а также для оценки прогнозируемых и фактических воздействий АЗК на геологическую среду.

Основные задачи оценки рисков на площадке сводятся к установлению условий развитии потенциально опасных различных генетических типов геологических процессов. Их оценка необходима для определения принципиальной схемы мероприятий защиты от возникновения, в том числе экологических опасностей.

Реализация программы инженерно-геокриологического мониторинга позволит накопить уникальный материал по проблеме возведения АЗК в условиях болот, глубокого сезонного промерзания и наличия ММП.

Выводы

Опыт строительства и эксплуатации АЗК в посёлке Магистральном несомненно будет востребован при возведении, как автозаправочных станций, так и подобных им объектов.

Застройка площадки, при отводе талых, ливневых и техногенных вод приведёт к частичному осушению грунтов и к повышенному прогреванию их летом. В итоге на не затенённых её участках общая среднегодовая температура грунтов сезонно-мерзлого слоя повысится, а на затенённых

(под навесом и зданием АЗС) – понизится. Наличие торфяников, мощностью до 2,7 м и отсыпанного на торфяник слоя шлака, покрытого пеноплэксом, позволяет сохранению и гарантирует стабильное состояние температуры ММП под площадкой. Кроме того, верхняя граница ММП поднимется до теплоизолирующего слоя – пеноплэкса, который также станет нижней границей сезонного промерзания и оттаивания грунтов. В сезонно талом слое, особенно впервые, 2-3 года, возможны просадочные и пучинистые явления отдельных частей площадки под действием уплотнения грунта и морозного крипа.

Многолетняя практика эксплуатации сооружений в области распространения ММП часто свидетельствует о несоответствии проектных решений реально намеченному штатному режиму работы объектов и о возникновении аварийных ситуаций. Анализ причин, приведших к аварийному состоянию зданий и сооружений, возведённых на многолетнемёрзлых грунтах, показывает, что до 40 % от общего их числа повреждено за счёт нарушения режима эксплуатации, а остальные 50–60 % приходится на долю проектировщиков, изыскателей и строителей [5]. Об этом свидетельствуют разрушенные многоэтажные дома в посёлке Магистральном.

Анализ полученных данных мониторинга позволит дать оценку и прогноз изменений инженерно-геокриологических характеристик, с целью своевременного обнаружения для принятия превентивных мер ослабления развития нежелательных криогенных процессов и обеспечения эксплуатационной надежности работы автозаправочного комплекса.

Список литературы

1. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Инженерная геология и инженерная сейсмология. – Новосибирск: Наука, 1985. – 201 с.

2. Воронков О.К., Фролов А.Д. Физические свойства пород при отрицательных температурах //Петрофизика. Т. 3. М.: Недра, 1992. С. 43–65.

3. Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений.- М.: Недра, 1990. – 287 с.

4. Нефедкин Ю. А., Михеев А.В., Джурик В.И., Юшкин В.И. Применение скважинной геоакустики в режимных инженерно-геофизических исследований мерзлых грунтов в Восточной Сибири// Исследования по многоволновому акустическому каротажу и сейсмомоделированию.

5. Лапердин В.К., Качура Р.А. .Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири.– Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010.–312 с.

6. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию //Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. М.: Наука, 1988. – 300 с.

7. Кондратьев В.Г., Позин В.А. Концепция системы инженерно-геокриоло-гического мониторинга строящегося железнодорожного пути Беркакит-Томмот-Якутск.-Чита: Забтранс, 2000. – 84 с.

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И СТРОИТЕЛЬСТВУ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

С. Н. Стрижков, О. Ю. Рубель

НПО «Фундаментстройаркос»; Тюмень, e-mail: nauka-fsa@mail.ru

Одним из решений экологических проблем в районах Крайнего Севера является исключение попадания вредных веществ, хранящихся на полигонах твердых бытовых отходов в окружающую среду. Мерзлый грунт является самым эффективным противофильтрационным экраном препятствующим попаданию вредных веществ с водой. Создание мерзлотной завесы на полигонах твердых бытовых отходов целесообразно выполнять при помощи систем «ГЕТ» с применением систем «ВЕТ» или индивидуальных термостабилизаторов. Такие системы разработаны и применены ООО НПО «Фундаментстройаркос» на Юбилейном и Бованенковском месторождениях.

Интенсивный рост промышленного производства и систематическое увеличение выброса токсичных отходов (твердых, пастообразных, жидких) во всем мире вызывают все большее загрязнение окружающей среды. Согласно федеральному законодательству [1-3] отходы производства и потребления подлежат сбору, использованию, обезвреживанию, транспортировке, хранению и захоронению, условия и способы которых должны быть безопасными для здоровья населения и среды обитания.

К твердым бытовым отходам (ТБО) относятся отходы хозяйственной деятельности населения (приготовление пищи, уборки и текущего ремонта квартир и др.), включая отходы отопительных устройств местного отопления, крупногабаритные предметы домашнего обихода, упаковка, смет с дворовых территорий, отходы ухода за зелеными насаждениями и другие [4]. Такое определение соответствует зарубежному термину «твердые муниципальные отходы» (Municipal Solid Waste).

ТБО классифицируют по источникам образования, по морфологическому составу, по степени опасности, по направлениям переработки и т.д. Юридической основой для классификации ТБО служит Федеральный классификационный каталог отходов (ФККО), который классифицирует отходы по происхождению, агрегатному состоянию и опасности. В ФККО используется термин «Твердые коммунальные отходы» код раздела 91000000 00 00 0.

Во всех странах мира неуклонно возрастает количество твердых бытовых отходов и в настоящее время в промышленно развитых странах достигает до 600-800 кг/год на душу населения [5]. В России этот показатель не превышает 220 кг/год на душу населения, то есть проблема ТБО для России стоит не так остро, как в США или странах Европы. Это объясняет создавшуюся ситуацию, когда предлагаемые зарубежные методы управления ТБО оказываются неприемлемы для России с экономической точки зрения.

В России ежегодно образуется около 130 млн. куб. м ТБО. Из этого количества промышленной переработке подвергается не более 3%, остальное вывозится на свалки и полигоны для захоронения ТБО с отчуждением земель в пригородных зонах.

Наиболее распространенными в настоящее время сооружениями по утилизации ТБО являются полигоны [6]. Современные полигоны это комплексы природоохранительных сооружений, предназначенные для складирования, изоляции и обезвреживания ТБО, обеспечивающие защиту от загрязнения атмосферы, почвы, поверхностных и грунтовых вод, препятствующие распространению грызунов, насекомых и болезнетворных микроорганизмов. Все работы по складированию, уплотнению и изоляции ТБО на полигонах выполняются механизировано.

Хотя Правительство Ямало-Ненецкого автономного округа планирует в будущем построить в Салехарде завод по переработке и утилизации ТБО мощностью до 20 тыс. тонн в год, сейчас на повестке дня строительство в этом городе второй очереди полигона ТБО. На действующем полигоне с целью его дальнейшей экологически безопасной эксплуатации проводится ряд мероприятий, в том числе по укреплению его обваловки, разрушаемой действием экзогенных процессов.

Таблица 1 - Состав ТБО (в %) в некоторых странах

Виды материалов	США	Европа	Корея	Россия
Бумага	38,1	33, 5	27	35
Крупногабаритные материалы	12,1	12,2	-	-
Пищевые/органические отходы	10,9	34,7	23	40
Пластик	10,5	11,6	7	6
Металлы	7,8	5,3	9	4
Резина, кожа, текстиль	6,6	-	3	1
Стекло	5,5	2,8	5	3
Дерево	5,3	21	4	2
Прочие	3,2	-	20	12

Основным конструктивным элементом современного полигона ТБО является противофильтрационный экран [7]. В практике сооружения полигонов естественные геологические барьеры встречаются достаточно редко, обычно приходится сооружать в основании и по поверхности полигонов искусственные защитные экраны, которые должны ис-

ключать или сводить к минимуму загрязнение компонентов окружающей среды в зоне влияния полигонов.

Существует несколько способов создания экранов:
- экран глиняный однослойный;
- экран глиняный двухслойный;
- экран грунтобитумный;
- экран из железобетонных плит;
- экран из полимербетона;
- экран бетонопленочный;
- экран асфальтобетонный однослойный с битумным покрытием;
- экран асфальтобетонный двухслойный с дренажной прослойкой;
- экран асфальтобетонный с покрытием битумно-латексной эмульсией;
- экран асфальтополимербетонный;
- экран из полиэтиленовой пленки, стабилизированной сажей, однослойный;
- экран из полиэтиленовой пленки двухслойный, с дренажной прослойкой [8].

Традиционные конструктивные решения и методы строительства не способны решить весь спектр проблем, связанных с особенностями устройства полигонов ТБО в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов. Как правило, все противофильтрационные экраны из вышеперечисленных материалов в условиях низких температур воздуха до минус 50…60ОС не сохраняют свою герметичность, что приводит к попаданию вредных веществ в окружающую среду.

В природно-климатических условиях ЯНАО с характерным для них большим ресурсом холода для решения этой проблемы предлагается вокруг полигона ТБО создать противофильтрационные экраны из мерзлого грунта и льда с помощью систем термостабилизации, производимых в ООО НПО «Фундаментстройаркос». В зависимости от поставленных задач эти экраны могут иметь горизонтальное или вертикальное простирание. Они могут также создать достаточно герметическое пространство наподобие ящика, не выпускающее из себя помещенные в него бытовые и промышленные отходы, хотя температура их гниения может достигать до 50-60ОС.

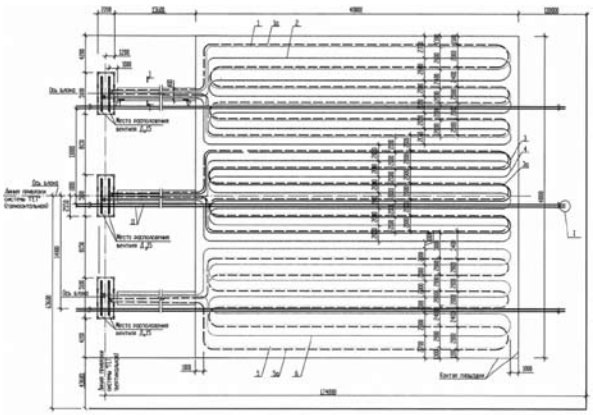


Рисунок 1 - Схема расположения системы охлаждения ГЕТ 1-6 – элементы системы охлаждения; 1а, 3а, 5а - элементы системы охлаждения резервный ОХЛ1а, ОХЛ3а, ОХЛ5а; 11 – труба термометрическая ТТ 63П-77,3.

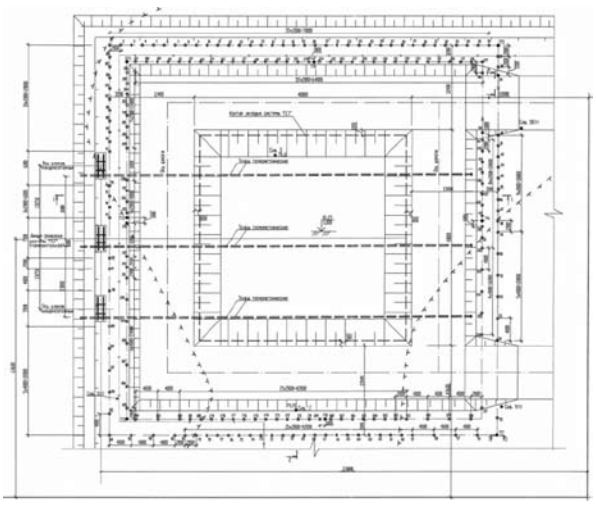


Рисунок 2 - Схема расположения систем охлаждения - термостабилизатор ТК32/10,0.М5; - термостабилизатор наклонный ТК32/10,0.М5; - труба термометрическая ТТ57-11

Впервые в таких целях ООО НПО «Фундаментстройаркос» применило системы температурной стабилизации грунтов оснований в 1994г. для создания мерзлотной завесы вокруг амбара для бытовых и промышленных отходов, построенного при обустройстве Ем-Еговского месторождения, расположенного в районе г.Нягань.

Для замораживания находящихся в амбаре бытовых и промышленных отходов и сохранения их в мерзлом состоянии в процессе эксплуатации на его дно была помещена горизонтальная трубчатая охлаждающая система, а вся масса этих отходов была пронизана регулярной сетью вертикально направленных индивидуальных термостабилизаторов ТК-25.00.000.

Следующим объектом для использования системы температурной стабилизации грунтов в 2003г. стал полигон утилизации ТБО Юбилейного газового месторождения, грунты основания которого используются по II-му принципу (в талом состоянии) со стабилизацией начального положения кровли многолетнемерзлых грунтов основания (ММГ).

В качестве способа стабилизации начального положения ММГ в основании сооружения использовалось устройство под теплоизоляционным экраном горизонтальной трубчатой системы (ГЕТ и ВЕТ) с параметрами, позволяющими сформировать в контуре сооружения слой мерзлого грунта толщиной до 5 м (рисунки 1, 2 и 3). Вторая фазовая граница находится на кровле ММГ. Между фазовыми границами располагается слой талых грунтов, в котором температурные градиенты, а следовательно, и теплопотоки через него равны нулю. «Буферный

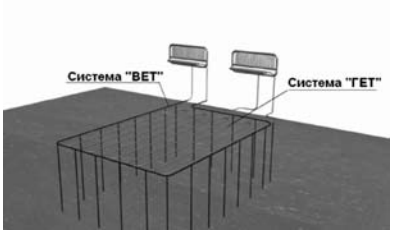


Рисунок 3 – Схемы охлаждающих систем

слой» является той теплонепроницаемой завесой, которая обеспечивает стабилизацию начального положения верхней границы ММГ. Помимо сохранения последних, слой мерзлоты под теплоизоляционным экраном служит защитой талых грунтов от загрязнения продуктами разложения бытовых отходов.

Конструктивно система ГЕТ состоит из девяти автономных подсистем, включая три нитки сухой полиэтиленовой трубы. Испарительная часть подсистем изготавливается из полиэтиленовых труб по ГОСТ Р50838-95. Сопротивление теплопередаче основания определено по СНиП П-3-79* (таблица 16) [9] и составляет 3,0 м^2°С/Вт. Расчетная температура в складе бытовых отходов при их разложении составляет плюс 30°С.

Расчет и конструирование системы ГЕТ выполнены из условия вы¬хода грунтами основания на расчетный тепловой режим в конце летнего периода второго года эксплуатации охлаждающей системы. Для исключения избыточного притока воды в зону замораживания талых грунтов было предусмотрено устройство льдогрунтовой завесы посредством установ¬ки термостабилизаторов марки ТК 32/10,0.М5 изготовления ООО НПО «Фундаментстройаркос».

Результаты прогноза температурного режима грунтов основания, приведенные на рисунке 4, показывают, что под площадкой и по периметру полигона создается мерзлотная завеса с температурой грунтов не выше минус 1°С, что гарантирует отсутствие попадания загрязнений в окружающие грунты.

На фотографиях (рисунок 5) показаны этапы строительства полигона ТБО на Юбилейном месторождении с использованием инновационных технических решений.

Схемы охлаждающих систем, используемых для создания мерзлотных противофильтрационных экранов:

- горизонтальных: с применением систем ГЕТ (горизонтальных естественно-действующих трубчатых)

- вертикальных: с применением систем ВЕТ (вертикальных естественно-действующих трубчатых)

Еще одним объектом для установки в 2009 г. систем температурной стабилизации грунтов явился полигон бытовых и промышленных отходов на Бованенковском нефтегазоконденсатном месторождении.

Грунты основания сооружений здесь используются в мерзлом состоянии по I принципу. Для стабилизации кровли ММГ и устойчивости температурного режима многолетнемерзлых грунтов основания было проведено устройство горизонтальных естественно-действующих трубчатых систем ГЕТ и термостабилизаторов марки ТК 32/10,0.М5.А (патент № 142615), изготавливаемых ООО НПО «Фундаментстройаркос» в соответствии с ТУ 3642-004-54098700-2006 «Системы и установки криогенные» (хладагент - аммиак) и разрешением № РРС 00-27521 Федеральной службы по экологическому технологическому и атомному надзору. Конструктивно системы охлаждения для сооружений состоят из четырнадцати автономных систем ГЕТ, которые имеют испарительную (трубопроводную) часть и конденсаторный блок и четырнадцати резервных «сухих» систем ГЕТ.

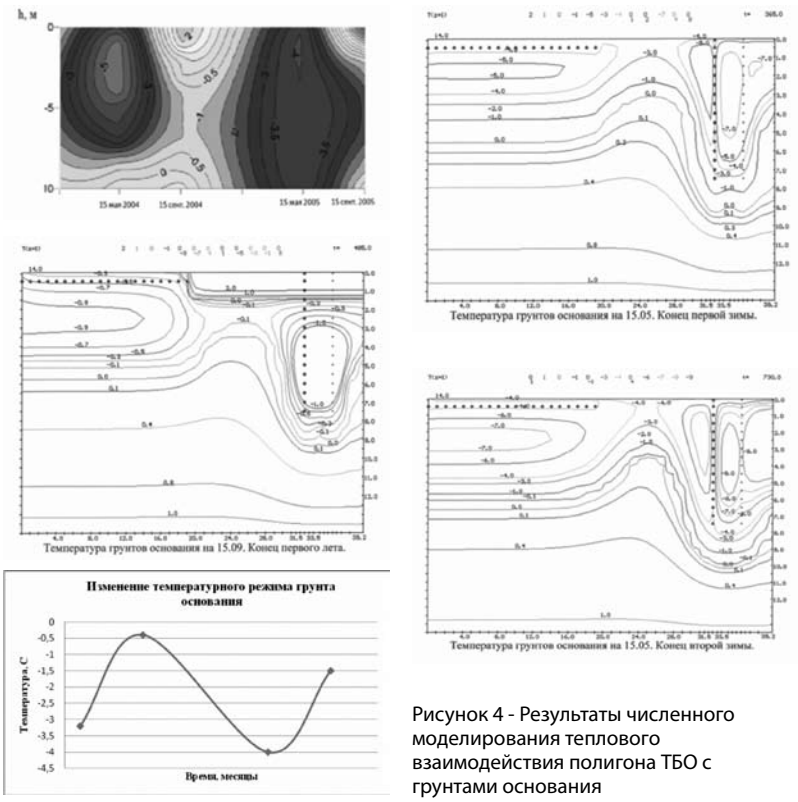


Рисунок 4 - Результаты численного моделирования теплового взаимодействия полигона ТБО с грунтами основания

Температурная стабилизация грунтов основания сооружения выполняется в соответствии с требованиями соответствующей нормативно-правовой документации [10,11] и включает сохранение твердомерзлого состояния грунтов основания в эксплуатационный период.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

Разработано новое инженерно-технологическое решение экологически безопасной эксплуатации полигонов ТБО в районах Крайнего Севера, позволяющее избегать

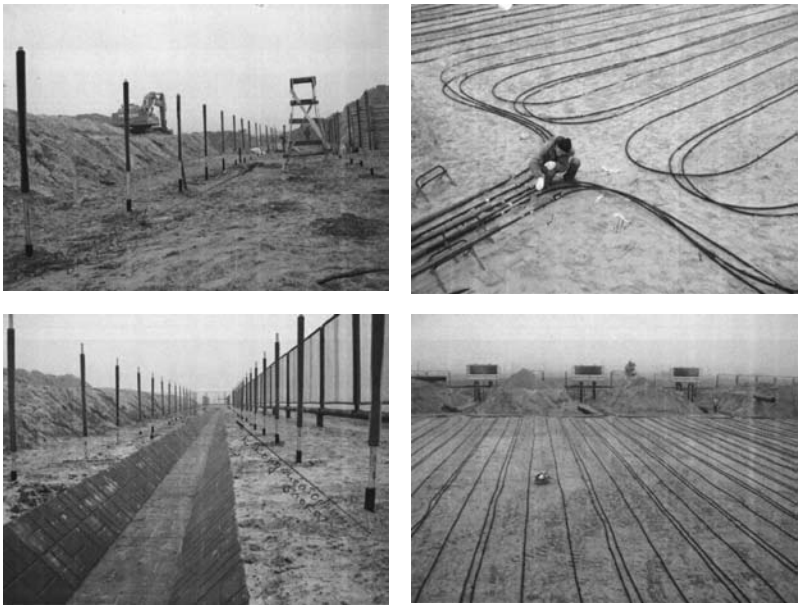


Рисунок 5 - Этапы строительства полигона ТБО на Юбилейном месторождении

катастрофических загрязнений окружающей среды из-за непрогнозируемой дестабилизации состояния грунтовых оснований.

Представлена и внедрена на ряде объектов новая технология строительного производства с использованием грунтово-ледяных противофильтрационных экранов, замороженных с помощью систем температурной стабилизации талых и пластично-мерзлых грунтов оснований, разработанных и производимых ООО НПО «Фундаментстройаркос».

Результаты прогноза температурного режима грунтов основания, проведенные в ООО НПО «Фундаментстройаркос», показывают, что под площадкой и по периметру исследованных полигонов ТБО создается мерзлотная завеса с температурой грунтов не выше минус 1°С, что гарантирует отсутствие попадания загрязнений в окружающую среду.

При выполнении рассмотренных работ на каждом полигоне ТБО проектируется и создается сеть геотехнического мониторинга, контролирующего температуры грунтов, состояние и эффективность работы систем температурной стабилизации, опасность развития экзогенных геологических процессов.

Список литературы

1. Федеральный закон №7-ФЗ от 10.01.2002г. «Об охране окружающей среды».

2. Федеральный закон №89-ФЗ от 24.06.1998г. «Об отходах производства и потребления».

3. Правила разработки и утверждения нормативов образования отходов и лимитов на их размещение. Утверждены Постановлением Правительства РФ от 16.06.2000 г. №461;

4. Концепция обращения с твердыми бытовыми отходами в Российской Федерации. Утверждена Постановлением коллегии Госстроя РФ от 22.12.1999 г. № 17.

5. Масленников – Характеристика твердых бытовых отходов. – 2005.

6. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов. – М.: Мин-во строительства РФ, 1996.

7. Егоров В.В., Трушин Б.В. Современные противофильтрационные экраны полигонов захоронения ТБО. - М.: Недра, 2009.

8. Пособие по проектированию полигонов по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов (к СНиП 2.01.28-85). Москва. Центральный институт типового проектирования, 1990.

9. СНиП П-3-79* Строительная теплотехника.

10. СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.

11. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах. - НИИ0СП им. К.М.Герсеванова, М., 1980.

Part 4
Thermal physics, physical chemistry and mechanics of frozen ground

Часть 4
Теплофизика, физико-химия и механика мерзлых грунтов

ВЛИЯНИЕ ТЕМПА ОХЛАЖДЕНИЯ НА ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ

Е.Г. Старостин

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск
e-mail: e.g.starostin@iptpn.ysn.ru

Представлены результаты исследования переохлаждения поровой воды в грунтах. Эксперименты проведены на дифференциальном сканирующем калориметре. Выявлено влияние темпа охлаждения на переохлаждение поровой воды в глинистых грунтах. Повышение темпа охлаждения вызывает увеличение переохлаждения поровой воды.

Льдообразование в грунтах является типичным случаем гетерогенной кристаллизации. Всеобъемлющей теории кристаллизации, учитывающей влияние различных факторов, еще не создано [6, 8, 12]. Тем более понятно, что закономерности кинетики льдообразования в грунтах еще требуют доскональных исследований. Начальный этап льдообразования в грунтах, как и любого фазового перехода первого рода, сложный многостадийный процесс, сопровождаемый различными нелинейными явлениями [1, 5]. Кинетика льдообразования в грунтах зависит от большого числа внешних факторов, таких как материал и структура поверхности минерального скелета, влажность, температура, состав и вязкость порового раствора, вибрация и т. д. [2, 3, 10]. Как следствие, требуется большое количество экспериментов с целью выявления роли того или иного фактора на процесс льдообразования при промерзании грунтов.

Разработка математической модели промерзания грунта, включающей как составную часть моделирование переохлаждения поровой воды и учитывающей кинетику кристаллизации, также затруднена отсутствием точных сведений о деталях изучаемых явлений, их количественных оценок [4, 7, 9].

Одним из факторов, влияющих на переохлаждение воды в грунтах, является темп охлаждения. Вероятность образования новой фазы в значительной степени зависит от скорости переохлаждения. При быстром охлаждении зародыши новой фазы не успевают образоваться, и наблюдаются даже случаи, когда система переходит в стеклообразное состояние [11].

Количественное описание процесса переохлаждения и последующей кристаллизации воды в грунтах, исходя из теоретических представлений, не представляется возможным. Поэтому на данном этапе необходимы эксперименты для получения детальной информации о физических процессах, сопровождающих начальный этап льдообразования в грунтах. С этой целью экспериментально исследована зависимость переохлаждения поровой воды в глинистых грунтах от скорости замораживания.

Аппаратура и методика эксперимента

Измерения проведены на дифференциальном сканирующем калориметре Linseis DSK L63/45. Метод дифференциальной сканирующей калориметрии широко используется для исследования и описания веществ, смесей и материалов, в частности, при изучении замерзания-оттаивания связанной воды в различных материалах [13, 15, 16]. Охлаждение жидким азотом применяемое в калориметре позволяет проводить измерения в диапазоне от -150..+700°C, что перекрывает необходимый для исследований замерзания-оттаивания воды в горных породах и строительных материалах интервал температуры.

Результаты измерения представляются в виде кривых дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), на которой фиксируются тепловые эффекты фазовых переходов.

Исследованы фазовые переходы поровой воды в суглинке и глине. В той части кривой ДСК, которая относится к охлаждению образца, четко фиксируется температура начала кристаллизации воды, т.е. температура переохлаждения. Эксперименты проводились при разных темпах охлаждения.

Образцы увлажнялись дистиллированной водой. Влажность образцов задавалась искусственно и составляла: для суглинка 15,8 – 24,6 %; для глины 23,4 – 29,4 %. Влияние влажности на переохлаждение в указанных пределах является не значительным. Масса образцов составляла 40,0-50,0 мг, т.е. была достаточно малой, чтобы исключить большие перепады температуры в образце. В каждом эксперименте темп охлаждения поддерживался постоянным и задавался в пределах от 0,5°C/мин до 40°C/мин.

Результаты и обсуждение

Кривые замораживания образцов суглинка и глины, полученные на дифференциальном сканирующем калориметре при разных темпах охлаждения, приведены на рис. 1. Температура переохлаждения соответствует началу выделения теплоты кристаллизации воды, которое фиксируется точкой излома на кривых.

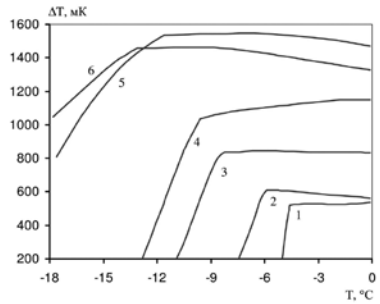


Рисунок 1 - Кривые ДСК охлаждения образцов глины. Темп охлаждения: 1 – 0,5°С/мин; 2 – 2,4°С/мин; 3 – 13,3 °С/мин; 4 – 22,5°С/мин; 5 – 30,1°С/мин; 6 – 38,2°С/мин

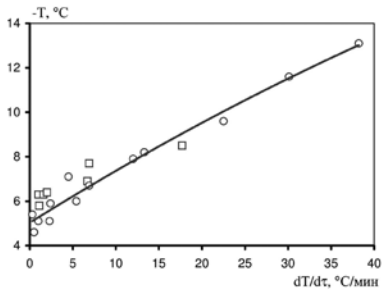


Рисунок 2 - Зависимость переохлаждения воды при замерзании грунта от темпа охлаждения. □ – суглинок; о – глина

По этим данным построена кривая зависимости переохлаждения от темпа охлаждения, которая представлена на рис. 2. По оси абсцисс представлены темпы охлаждения, по оси ординат – температуры, при которых начинается кристаллизация воды, т.е. температура переохлаждения.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные и кривая тренда, полученная обработкой этих данных полиномом второй степени. Данные показывают, что при принятых условиях эксперимента, переохлаждение монотонно возрастает с увеличением темпа охлаждения. К сожалению, исходя из современных теорий, невозможно объяснить, тем более, количественно описать полученную зависимость.

Из методов описания процессов зародышеобразования на поверхности наиболее широкое внимание исследователей получила так называемая капиллярная модель, впервые сформулированная Фольмером и Вебером, Беккером и Дерингом, Зельдовичем. Эта модель основана на предположении, что в метастабильном состоянии для появления новой фазы необходимы флуктуации свободной энергии, приводящие к преодолению активационного барьера [5]. Наличие такого барьера связано с тем, что скорость зарождения кристаллов определяется, с одной стороны, вероятностью процесса зарождения, с другой стороны – подвижностью молекул. В результате конкуренции этих эффектов свободная энергия образования зародыша новой фазы из метастабильного состояния имеет максимум в некоторой критической точке.

Существуют модели зародышеобразования на подложке, в которых рассматриваются неизотермические эффекты, связанные с выделением скрытой теплоты фазового перехода и условиями отвода тепла в подложку и переохлажденную среду [14]. Влияние на высоту активационного барьера таких эффектов в случае замерзания поровой воды может стать причиной зависимости переохлаждения от градиента температуры в грунте. Полученные данные позволят уточнить такие модели, определить параметры, входящие в них.

Возможность изменения скорости образования зародышей и их роста позволяет управлять степенью дисперсности частиц льда в системе. При низкой скорости образования зародышей и высокой скорости их роста, что реализуется при малых степенях пересыщения или переохлаждения, возникает небольшое число крупных частиц. При высокой скорости образования и низкой скорости их роста, что происходит при больших степенях пересыщения, получается много мелких частиц [11]. Это будет влиять как на механические, так и на теплофизические свойства мерзлых грунтов.

Для оценки параметров разрабатываемых кинетических моделей промерзания грунта [1] и их уточнения требуется большое количество экспериментальных данных по кинетике кристаллизации воды в грунтах. Результаты данной работы показывают, что такие модели должны включать также представления о влиянии темпа охлаждения на переохлаждение.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 09-05-98504)

Список литературы

1. Гречищев С. Е., Павлов Арк. В., Пономарев В.В. Кинетика замерзания воды в дисперсных грунтах (эксперимент, теория). Материалы Первой конференции геокриологов России. Кн. 2. М., Изд-во МГУ, 1996, с. 19-31.

2. Гречищев С. Е., Павлов Арк. В., Шешин Ю. Б., Гречищева О. В. Экспериментальные закономерности формирования переохлаждения поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов. Криосфера Земли, № 4, 2004, с. 41-44.

3. Гречищев С.Е., Павлов Арк. В., Гречищева О.В. Закономерности формирования переохлажденной поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов. Материалы Третьей конференции геокриологов России. Т. 1. М., Изд-во МГУ, 2005, с. 38-45.

4. Комаров И.А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М., Научный мир, 2003, 608 с.

5. Кукушкин С.А., Осипов А.В. Процессы конденсации тонких пленок. УФН, 1998. Том 168, вып. 10, с. 1083-1116.

6. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. М., Наука, 1979. 528 с.

7. Любов Б.Я. Теория кристаллизации в больших объемах. М., Наука, 1975. 256 с.

8. Матусевич Л.Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. М., Химия, 1968. 304 с.

9. Основы геокриологии. Ч. 1: Физико-химические основы геокриологии. Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во МГУ, 1995. 368 с.

10. Павлов Арк.В. Лабораторные исследования объемной кристаллизации поровой влаги в зоне припо-

верхностного охлаждения дисперсных пород. Материалы Третьей конференции геокриологов России. Т. 1. М., Изд-во МГУ, 2005. С. 83 – 86.

11. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления. М., Химия. 1989. 464 с.

12. Щёкин А.К., Куни Ф.М., Татьяненко Д.В. Термодинамика нуклеации на нерастворимых макроскопических ядрах. СПб., Изд-во СПбГУ, 2002. 52 с.

13. Barra G., Di Matteo P., Vittoria V., Sesti Osseo L., Cesaro A. A DSC study of thermal transitions of apple systems at several water contents. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 61, 2000. P. 351 – 362.

14. Kukushkin S.A., Osipov A.V. Kinetics of non-isothermal nucleation of thin films. Journal of Physics and Chemistry of Solids. Volume 56, Issue 2, 1995. P. 211-214.

15. Lee K.Y., Ha W.S. DSC studies on bound water in silk fibroin/S-carboxymethyl kerateine blend films. Polymer, 40, 1999. P. 4131 – 4134.

16. Liesebach J., Lim M., Rades T. Determination of unfrozen matrix concentrations at low temperatures using stepwise DSC. Thermochimica Acta, 411, 2004. P. 43 – 51.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ ПРИ ПРОДУВКЕ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ПОЛЫЕ СВАИ В ЗИМНЕЕ ВРЕМЯ

И.И. Рожин[1], А.В. Степанов[2], А.Н. Цеева[3]

[1]Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, e-mail: rozhin@ipng.ysn.ru
[2]Институт физико-технических проблем Севера СО РАН им. В.П. Ларионова, г. Якутск
[3]Якутский проектный НИИ строительства, г. Якутск

В работе рассматривается задача охлаждения грунтов основания жилого здания с помощью продувки воздуха через полые сваи в зимнее время. Численными методами исследуется процесс образования ледопородной завесы вследствие теплообмена грунта с полыми сваями и наружным атмосферным воздухом. Получено, что коэффициент теплоотдачи, увеличивающийся с ростом скорости продувки воздуха и отражающий темп охлаждения, оказывает большое влияние на величину аккумуляции холода в массиве грунтов, следовательно, и на размер его мерзлого ядра.

Введение.

Застройка территорий, связанная с возведением различных инженерных сооружений, осушением или обводнением местности и т.п., всегда вызывает нарушение природных условий, что приводит к изменению температурного и влажностного режимов грунтов. Особое значение это обстоятельство имеет для области распространения вечномерзлых грунтов, где их термовлажностный режим определяет принцип строительства, конструкцию зданий и сооружений, способы устройства оснований и фундаментов и др. Под тепловыделяющими сооружениями без охлаждающих устройств будут образовываться зоны оттаивания грунта. Эта проблема имеет важное значение, направленное на техническое и конструктивное усовершенствование сооружений.

Способ искусственного замораживания грунта нашел применение практически во всех областях строительства: шахтном, промышленном, гидротехническом, коммунальном, при строительстве метрополитена, при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом и т.д. Его в основном применяют для создания монолитного ледопородного основания в фундаментах инженерных сооружений, для образования противофильтрационных ледопородных завес в насыпных плотинах (хвостохранилищах), для создания плавучих ледяных платформ на шельфах северных морей, для аккумулирования холода в грунте и для других целей.

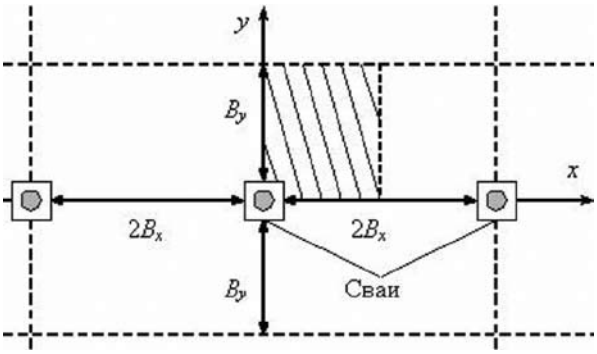


Рисунок 1 - Расчетная область замораживания

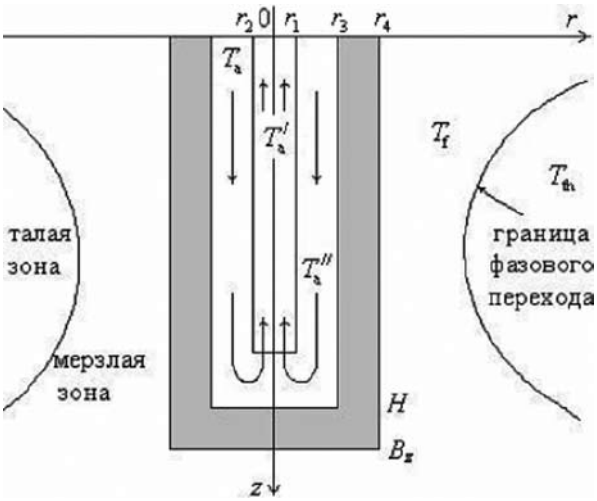


Рисунок 2 - Принципиальная схема теплообмена полой сваи с грунтом

В условиях резко континентального климата Крайнего Севера замораживание грунта можно проводить в зимнее время, используя низкую температуру атмосферного воздуха, т.е. используя естественный холод в хозяйственный оборот вместо дорогостоящего искусственного холода, вырабатываемого холодильными машинами.

Математическая модель замкнутой системы с жидким хладоносителем с его принудительной циркуляцией рассмотрена в работах [1, 2], где дана количественная оценка влияния различных упрощений полной модели на результаты расчетов. Здесь же предложена приближенная методика расчета теплообмена системы замораживающих колонок с грунтом. Путем сравнения с решениями, полученными методом конечных разностей, доказана её достаточная для практики точность. Исходя из общей схемы замораживающей системы, рассчитывая гидравлические сопротивления участков системы и подбирая вентилятор, соответствующий производительности по воздуху и давлению в рабочей зоне, можно разработать систему воздушного замораживания грунта с использованием естественного холодного воздуха зимой.

В данной работе рассматривается задача охлаждения грунтов основания жилого здания

с помощью продувки воздуха через полые сваи в зимнее время. В процессе продувки воздух всасывается со дна полой сваи через распределительные шланги с помощью насоса. Тем самым имеем теплообменник типа «труба в трубе» с противотоком. При этом энергия тратится только на работу насоса и перекачку холодного воздуха.

Рассматривается некоторая замораживаемая область (рис. 1), посередине которой вдоль одной линии пробурены полые сваи, расположенные на одинаковом расстоянии друг от друга. Считается, что образование ледопородной завесы происходит одинаково для каждой полой сваи, так что область, в которой ищется решение, оказывается параллелепипедом высотой , сторонами и (заштрихованная часть на рис. 1). Принятые обозначения означают: – половина расстояния между соседними сваями, – половина ширины области замораживания грунта, – высота заглубленной части сваи, – радиус центрального канала (шланга), и – радиусы кольцевого канала, – глубина полости сваи, – температура входящего холодного воздуха, и – температуры мерзлого и талого грунта, и – температуры воздуха в центральном и кольцевом каналах соответственно (см. рис. 2). Исследуется процесс образования ледопородной завесы вследствие теплообмена грунта с полыми сваями и наружным атмосферным воздухом.

Постановка задачи и ее метод решения. В работах [1, 2] выявлено, что в период замораживания температура хладоносителя в замораживающих колонках изменяется подобно температуре атмосферного воздуха с незначительным запаздыванием и меньшим абсолютным значением. Когда замораживающая система отключена в летнее время, температура хладоносителя изменяется только вблизи уровня устья колонки вследствие теплообмена с оттаявшим слоем грунта и наружным воздухом. А также сравнение полной и упрощенной математических моделей показало, что инерционные члены ($dT_a'/dt = 0$ $dT_a''/dt = 0$, где t – время) в уравнениях переноса тепла хладоносителем и вертикальная составляющая теплопроводности в грунте ( ) незначительно влияют на форму и положение границы фазового перехода. Справедливость этого положения в части учета инерционности полностью объясняется тем, что при обычных скоростях движения хладоносителя интенсивность конвективного переноса теплоты намного выше интенсивности переноса тепла теплопроводностью в грунте. Что касается возможности пренебречь вертикальной теплопроводностью на уровне устья замораживающей колонки, следует отметить, что при наличии интенсивного теплообмена через дневную поверхность влияние вертикальной теплопроводности на небольшой глубине будет существенным.

В нашем случае из-за большой скорости движения воздуха (0.5...2 м/с) и небольшой длины сваи (ок. 10 м) можно допустить, что температура воздуха в центральном и кольцевом каналах незначительно изменяются по глубине. Тогда при продувке температура воздуха внутри полой сваи будет равна температуре наружного воздуха. Тем самым в математической постановке задачи уравнение нестационарного распространения тепла за счет вынужденной конвекции воздуха в центральном и кольцевом каналах можно не включать.

Процесс теплообмена массива грунтов с полой сваей и наружным воздухом описывается дифференциальным уравнением теплопроводности при соответствующих краевых условиях. Если принять граничные условия по направлениям и идентичными, то без ущерба для точности вычислений данную трехмерную задачу можно упростить, рассмотрев ее как осесимметричную. Тогда задача теплопроводности с фазовым переходом «вода - лед» формулируется как обычная краевая задача для квазилинейного параболического уравнения с разрывными коэффициентами, которое с учетом многослойного массива грунтов имеет вид:

$$\widetilde{C}_k(T)\frac{dT}{dt} = \frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\lambda_k(T)\frac{dT}{dr}\right) + \frac{d}{dz}\left(\lambda_k(T)\frac{dT}{dz}\right) \quad r_4 < r < B_x, \quad 0 < z < B_z, \quad t > 0 \qquad (1)$$

где λ_k и $\widetilde{C}_k$ – коэффициент теплопроводности и эффективная объемная теплоемкость -го слоя грунта, которые аппроксимируются как кусочно-постоянные (сглаженные) функции по температуре в окрестности фазового перехода.

Температурное поле в начальный момент времени задается в виде функции, зависящей только от координаты z:

$T = T_0(z), t=0$ (2)

На дневной поверхности массива грунтов, граничащего с атмосферным воздухом, принимается граничное условие конвективного теплообмена:

$$-\lambda_k(T)\frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_z(T_a - T) \quad z=0 \qquad (3)$$

где λ_k соответствует верхнему слою массива (k=1), T_a – температура атмосферного воздуха. В приведенном коэффициенте теплообмена как термическое сопротивление можно учитывать слой теплоизоляции, заложенной в основание здания: $\alpha_z = 1\Big/\left(\frac{1}{\alpha_a} + \frac{h_{ins}}{\lambda_{ins}}\right)$, где h_{ins} и λ_{ins} – толщина и коэффициент теплопроводности изоляции. Коэффициент теплоотдачи со стороны атмосферного воздуха изменяется в зависимости от климатических условий по формуле [3]: $\alpha_a = 15.12\sqrt{\upsilon_a}$, где v_a – среднемесячная скорость ветра.

На поверхностях, разделяющих слои массива, выполняются условия идеального теплового контакта, т.е. граничные условия IV рода: равенство температур и тепловых потоков непосредственно на границах между слоями.

Также принимаются:
условие теплообмена грунта с полой сваей

$$-\lambda_k(T)\frac{\partial T}{\partial r}=\alpha_r(T_a-T) \quad r=r_4 \tag{4}$$

условие радиального распространения теплоты на уровне забоя сваи

$$\frac{\partial T}{\partial z}=0 \qquad z=B_z \tag{5}$$

условие симметрии

$$\frac{\partial T}{\partial r}=0 \qquad r=B_x \tag{6}$$

Учет неравномерности распределения скорости по сечению центрального и кольцевого канала осуществляется путем использования полуэмпирических зависимостей числа Нуссельта от чисел Рейнольдса Re и Прандтля $\mathrm{Pr}=\nu_a C_a/\lambda_a$, где ν_a, C_a, λ_a – кинематическая вязкость, объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности воздуха соответственно.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи при турбулентном режиме течения воздуха, которое постоянно по длине, вычисляется по формулам [4]: для центрального канала $\alpha_1=Nu_1\lambda_a/2r_1$, где $Nu_1=0.021Re_1^{0.8}Pr^{0.43}$, $Re_1=2G/\pi r_1\nu_a$; а для кольцевого канала $\alpha_2=Nu_2\lambda_a/2(r_3-r_2)$, где $Nu_2=0.017Re_2^{0.8}Pr^{0.4}(r_3/r_2)^{0.18}$, $Re_2=2G/\pi(r_3-r_2)\nu_a$. Здесь объемный расход воздуха $G=\pi r_1^2\nu_1=\pi(r_3^2-r_2^2)\nu_2$; , где ν_1 и ν_2 – скорости движения воздуха в центральном и кольцевом каналах соответственно. Тогда приведенный коэффициент теплообмена по радиальному направлению имеет вид:

$$\alpha_r=\frac{1}{\pi r_4}\left(\frac{1}{\alpha_1 r_1}+\frac{1}{\lambda_s}\ln\frac{r_2}{r_1}+\frac{1}{\alpha_2 r_3}+\frac{1}{\lambda_p}\ln\frac{r_4}{r_3}\right)^{-1}$$

где λ_s и λ_p – теплопроводность шланга и железобетонной сваи.

Поставленная задача (1)-(6) решается методом конечных разностей с использованием продольно-поперечной схемы (суммарной аппроксимации). При этом уравнение (1) расщепляется на две части по пространственным координатам, которые решаются методом сквозного счета со сглаживанием коэффициентов теплопроводности и теплоемкости. Скрытая теплота фазового перехода $W=(q_{ph}+T_{ph}c_p)\rho\omega$ вводится как сосредоточенная теплоемкость в коэффициент . Здесь – удельная теплота фазового перехода «вода - лед», q_{ph} – удельная теплоемкость воды, ρ – плотность, ω – весовая влажность грунта. Так как сглаженные коэффициенты в уравнении (1) зависят от температуры, получающаяся разностная задача будет нелинейной и ее решение находится методом простой итерации с использованием прогоночных алгоритмов.

Результаты и обсуждение. Вычислительный эксперимент проводится для условий г. Якутска. Среднемесячные значения температуры атмосферного воздуха и скорости ветра были взяты из СНиП 23-01-99. Значения этих величин между месяцами были аппроксимированы линейными зависимостями. В табл. 1 приведены физические свойства грунтов основания здания. Для железобетона сваи и опилок значения коэффициентов теплопроводности приняты по СНиП II-3-79*: λ_p =2.04 Вт/(м·°С), λ_{ins} = 0.16 Вт/(м·°С). Также входными параметрами являются: q_{ph} = 334.4 кДж/кг; c_p = 4184 Дж/(кг·°С); B_x = 1.57м; B_z = 11 м, r_1 = 0.05 м, r_2 = 0.053 м, r_3 = 0.07 м, r_4 = 0.22 м, λ_a = 0.0244 Вт/(м·°С), C_a = 1310 Дж/(м³·°С), $\nu_a=13.56\cdot10^{-6}$ м²/с.

Из условия работ по охлаждению грунтов (процесс продувки морозным сухим воздухом должен проводиться при дневной температуре атмосферного воздуха –20°С и ниже) и динамики изменения температуры атмосферного воздуха продувку следует проводить с 141 сут (3 ноября) по 278 сут (19 марта). Тогда общее время работы насоса составит 137 сут, но его можно откорректировать в зависимости от замеров в температурных трубках. В расчетах, когда вся система охлаждения останавливается, расход принимается . На рис. 3 представлены натурные данные температурного поля по глубине массива грунта на 15 июня. Данное распределение температур принимается за начальное условие.

Таблица 1 - Характеристики слоев многослойного массива грунтов

k	Вид слоя	h_k, м	ρ, кг/м³	ω, д.е.	T_{ph}, °С	λ, Вт/(м·°С)		$C\cdot10^{-6}$, Дж/(м³·°С)	
						λ_{th}	λ_f	C_{th}	C_f
1	Опилки	0.3	350	0.20	0	0.16	0.16	0.805	0.805
Слой сезонного оттаивания и надмерзлотный талик									
2	Насыпной грунт: супесь, песок; мерзлый, засоленный, текучий в талом состоянии	1.7	1860	0.32	-1.15	1.49	1.61	3.086	2.223
3	Супесь твердомерзлая, засоленная, текучая в талом состоянии	1.6	1820	0.32	-0.66	1.77	1.83	3.140	2.232
4	Песок мелкий, водонасыщенный, сильнозасоленный	5.6	1780	0.29	-2.08	1.22	1.35	1.972	1.725
Вечномерзлая толща									
5	Песок средней крупности, твердомерзлый	6.1	1890	0.25	-0.24	2.23	2.47	2.973	2.215

В результате получены температурные поля массива грунтов для различных мо-

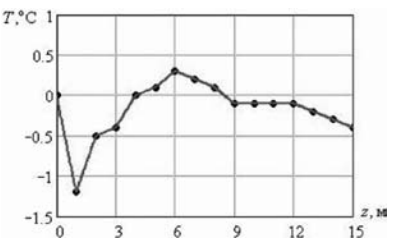


Рисунок 3 - Распределение температур по глубине при t=0: точки – данные термометрии, сплошная кривая – их аппроксимация линейными зависимостями

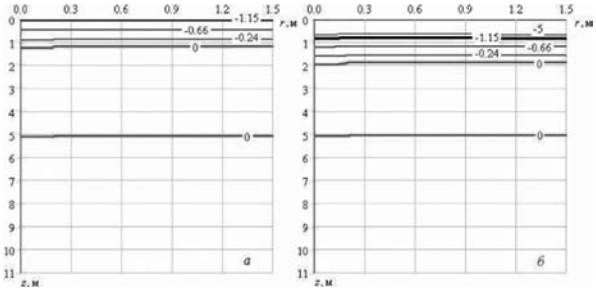


Рисунок 4 - Конфигурации изотерм в начале продувки сваи (3 ноября): а – с теплоизоляцией, б – если слой изоляции удалить 15 октября

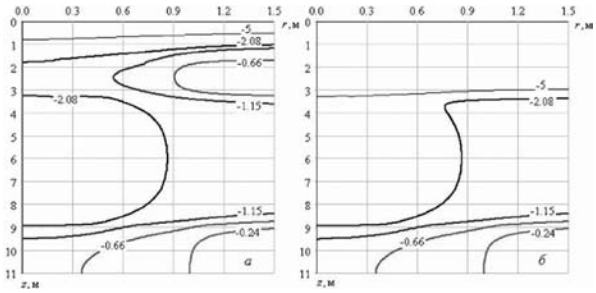


Рисунок 5 - Конфигурации изотерм в конце продувки сваи (19 марта): а – с теплоизоляцией, б – если слой изоляции удалить 15 октября

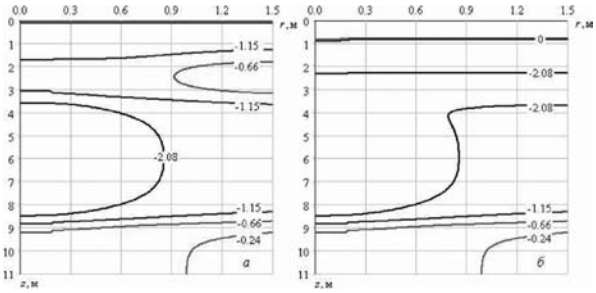


Рисунок 6 - Конфигурации изотерм в конце первого расчетного цикла (15 июня): а – с теплоизоляцией, б – если слой изоляции удалить 15 октября

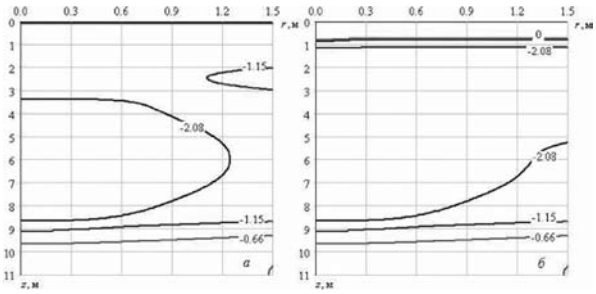


Рисунок 7 - Конфигурации изотерм в конце второго расчетного цикла (15 июня): а – с теплоизоляцией, б – если слой изоляции удалить 15 октября

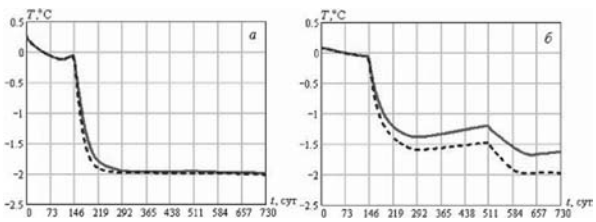


Рисунок 8 - Динамика изменения температуры грунта между сваями, если слой изоляции удалить 15 октября: а – при м, б – при м; сплошная кривая – при м/с, штриховая – при м/с

ментов времени. На рис. 5 - 7 показаны конфигурации изотерм, полученные при скорости продувки м/с. Цифры у кривых –1.15 °С и –0.24 оС соответствуют значениям температур фазового перехода верхних и нижних слоев массива, а –2.08°С – это температура фазового перехода песка, который находится в средней части по глубине массива. Видно, что если теплоизоляцию удалить после первого теплого периода (т.е. 15 октября), промерзание-оттаивание грунтов с дневной поверхности происходит более интенсивно (сравни а и б рис. 4 - 7). Тем самым слой теплоизоляции способствует затуханию нестационарных тепловых возмущений. Укладка теплоизоляции в основание здания в летнее время позволяет значительно уменьшить глубину оттаивания массива грунтов, тем самым увеличить теплоустойчивость массива. А удаление этого слоя в зимнее время способствует большей аккумуляции холода.

В ходе расчетов получено, что из-за существенного влияния конвективного теплообмена грунта с атмосферным воздухом промерзание грунта в верхней части массива идет более интенсивно, чем вблизи забоя полой сваи. Граница фазового перехода остается вогнутой относительно оси сваи. Вогнутостью этой линии объясняется наличие фильтрационных «окон» грунта между сваями до образования сплошной мерзлотной завесы, обнаруженных в натурных наблюдениях О.И. Алексеевой [5].

Сравнение температурных полей (рис. 8) позволяет утверждать, что коэффициент теплоотдачи, увеличивающийся с ростом скорости продувки воздуха и отражающий темп охлаждения, оказывает большое влияние на величину аккумуляции холода в массиве, следовательно, и на размер его мерзлого ядра.

Из-за циклического изменения температуры атмосферного воздуха во второй половине периода замораживания поступление холода от воздуха уменьшается. В конце этого периода тепловой поток от грунта начинает уменьшаться и может быть равен нулю, когда атмосферный воздух еще существенно охлажден. Физически это означает, что тепловая инерционность мерзлого грунта со временем делает его своеобразным тепловым сопротивлением, в результате чего движение фронта фазового перехода замедляется, скорость изменения температуры грунта уменьшается (рис. 8). С момента начала обратной «транспортировки» холода можно применить способ повышения эффективности замораживающей системы, предложенный в работе [2]. Он заключается в уменьшении расхода (т.е. скорости продувки) пропорционально скорости распространения границы фазового перехода, что предотвращает «запирание» (равенство нулю) теплового потока на поверхности теплообмена.

После остановки работ по охлаждению грунтов происходит протаивание замороженного грунта, в основном в деятельном верхнем слое, поскольку изменения температуры в нижележащих слоях многолетнемерзлой породы

незначительны (см. рис. 8). Однако к началу следующего сезона работы замораживающей системы температура грунта будет иметь значение ниже предыдущего, т.к. в северных регионах длительность летнего периода значительно меньше зимнего.

Список литературы

1. Анисимов В.А., Бондарев Э.А., Попов Ф.С. Методика расчета системы жидкостных замораживающих колонок с принудительной циркуляцией хладоносителя. – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1987. – 48 с.

2. Попов Ф.С. Вычислительные методы инженерной геокриологии. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН. 1995. – 136 с.

3. Порхаев Г.В., Щелоков В.К. Прогнозирование температурного режима вечномерзлых грунтов на застраиваемых территориях. – Л.: Стройиздат, 1980. – 112 с.

4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

5. Алексеева О.И. Создание и совершенствование противофильтрационных мерзлотных завес: Автореферат дисс. канд. техн. наук. – Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1988. – 22 с.

РАСТЕПЛЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ОТ НЕСКОЛЬКИХ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН

Н.А. Ваганова[1], М.Ю. Филимонов[1]

[1]Институт математики и механики УрО РАН, г.Екатеринбург, e-mail: fmy@imm.uran.ru

Для исследования процесса растепления многолетнемерзлых пород от добывающих скважин построена новая трехмерная модель теплового взаимодействия в системе «скважина-грунт» с учетом различных физических факторов, влияющих на распространения тепла. На основе разработанного комплекса программ проведена серия расчетов по растеплению мерзлых пород с учетом реальных теплофизических характеристик грунта. Эти расчеты были использованы специалистами по проектированию и обустройству скважин.

Постановка задачи

Обустройство и эксплуатация нефтяных скважин в районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) имеет ряд особенностей. ММП занимают 65 % территории России. Эти территории чрезвычайно важны для нашей экономики, так как здесь добывается около 93 % российского природного газа и 75 % нефти, что в стоимостном исчислении обеспечивает до 70 % экспорта страны. Средняя толщина мерзлых пород в этих зонах меняется в пределах от 10 до 800 м. Важной задачей является уменьшение влияния различных источников тепла на мерзлую породу, поскольку проблема уменьшения интенсивности теплового взаимодействия в системе «скважина – грунт» имеет особое значение для решения задач энергосбережения, охраны окружающей среды, безопасности, экономии затрат и повышению эксплуатационной надежности скважин. Для решения этих задач требуется разработать адекватную трехмерную математическую модель по распространению тепла в системе «скважина-ММП» с учетом того, что слагающие ММП породы имеют различные физико-химические свойства, которые могут изменяться по всем направлениям. В летнее время, в результате положительных температур и солнечного излучения, происходит сезонное оттаивание верхнего слоя ММП, в зимнее время наблюдается обратный процесс. Эти природные явления могут оказывать существенное влияние на процесс растепления ММП и должны быть учтены в математической модели и соответствующем программном обеспечении.

Математическая модель

Пусть T=T(t,x,y,z) – распределение температуры в момент времени t, (x,y,z) – точка расчетной области. Расчетная область представляет собой трехмерный параллелепипед, из которого удалена вертикальная цилиндрическая скважина (рис. 1). Оси x и y расположены параллельно поверхности грунта, а ось z – вниз. Область может включать в себя различные элементы, например, различные слои отсыпки поверхности грунта и слои инженерных конструкций, окружающие скважину. В качестве основной математической модели для учета излучения от каждой скважины используется уравнение контактной (диффузионной) теплопроводности с неоднородными коэффициентами, включающее локализованную теплоемкость фазового перехода – подход, позволяющий решать задачу типа Стефана, без явного выделения границы фазового перехода [1-2]. При этом теплота фазового превращения вводится с применением δ-функции Дирака как сосредоточенная теплоемкость фазового перехода в коэффициент теплоемкости. Получаемая таким образом разрывная функция затем «распределяется» по температуре, и не зависит от числа измерений и фаз. Таким образом, моделирование процессов растепления в грунте сводится к решению уравнения

$$\rho\left(c_v(T)+k\,\delta(T-T^*)\right)\frac{\partial T}{\partial t}=\operatorname{div}\left(\lambda(T)\ \operatorname{grad} T\right)$$

где ρ – плотность [кг/м^3], T* - температура фазового перехода, cv(T)= $\begin{cases} c_1 \text{ при } & T<T^* \\ c_2 \text{ при } & T>T^* \end{cases}$ – удельная теплоемкость [Дж/кг.К],

λ(T) = $\begin{cases} \lambda_1 \text{ при } & T<T^* \\ \lambda_2 \text{ при } & T>T^* \end{cases}$ – коэффициент теплопроводности [Вт/м К], k – теплоемкость фазового перехода, δ – дельта-функция Дирака. Основные тепловые потоки, учтенные в модели, изображены на рис. 1.

В качестве граничного условия на поверхности грунта – основной зоне формирования естественных тепловых полей – используется уравнение баланса потоков, приносящих и уносящих энергию, с учетом основных климатических факторов: среднемесячной температуры воздуха ($T_{возд}$) и мощности солнечного излучения q (в основном в летние месяцы). На поверхности скважины задается постоянная температура – температура нефти, или газа в скважине ($T_{скважины}$). На нижней и боковых гранях параллелепипеда (рис. 2) – условие, что поток тепла равен нулю, кроме того, может быть задано условие постоянства температуры.

Для поставленной задачи был разработан численный алгоритм и комплекс прикладных программ, позволяющий в сложной трехмерной области, определяемой инженерными параметрами скважин, проводить расчет растепления грунта в течение 25 лет эксплуатации добывающих сква-

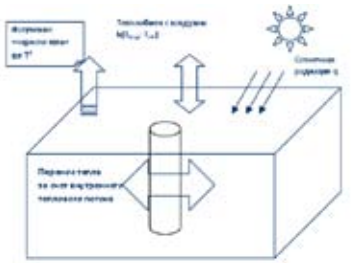


Рисунок 1 - Основные тепловые потоки.

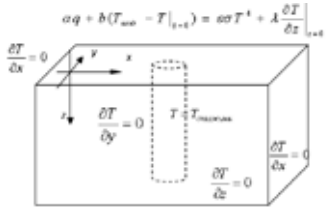


Рисунок 2 - Расчетная область и граничные условия.

жин. Численные методы решения задач теплопроводности в сложных областях являются в настоящее время наиболее эффективными и универсальными методами исследования. Разработке разностных методов решения краевых задач теплопроводности посвящено большое количество работ (см., например, [1-3]). Предложенная модель и численный алгоритм опираются на результаты работ [4-7], посвященных построению и исследованию тепловых полей от подземных трубопроводов, которые могут иметь повреждение. Трубопровод мог располагаться, в том числе и во влажных грунтах, в которых происходила фильтрация жидкости [7]. Однако возможный фазовый переход в этих работах не учитывался. В работе [5] была доказана разрешимость соответствующей разностной задачи, в которой учитывается нелинейное краевое условие, обусловленное солнечным излучением. Учет солнечного излучения оказывает существенное влияние на тепловые поля от различных подземных источников тепла, а также при исследовании промерзания (оттаивания) грунта, что подтверждают экспериментальные данные из работы [8]. Нелинейное краевое условие, обусловленное солнечным излучением, учитывается и в модели, предложенной в данной работе (рис. 2, z=0). Особое внимание уделено построению расчетной сетке. Размер расчетной области по горизонтали подбирается таким образом, чтобы влияние внешней границы не оказывало существенного влияния на распределение температуры. При расчетах используется регулярная ортогональная сетка, сгущающаяся в областях источников тепла по определенному закону (к внутренней границе – скважине, и к дневной поверхности). В зимнее время дневная поверхность служит источником холода. Расчетная сетка сгущается также в областях, определяемых инженерными сооружениями вокруг скважины (это теплоизоляционные слои с различными теплофизическими параметрами). Поскольку теплопроводящие свойства рассчитываемых материалов и грунтов достаточно «медленные», то есть коэффициенты температуропроводности порядка 10^{-6} – 10^{-7}, то для сходимости разностного метода необходимо использование априорно сгущающихся сеток в пограничных слоях. Например, удалось провести расчеты по растеплению ММП, при которых некоторые оболочки, покрывающие скважину (например, микросферы), имеют толщину всего несколько миллиметров по сравнению со всей расчетной областью (для одной скважины – это куб со стороной 50 м). Для расчетов используется экономичная неявная локально-одномерная аддитивная схема с целыми шагами. Сходимость и устойчивость этой схемы на основе суммарной аппроксимации показана в [2] и дает оценку точности $O(\tau+|h|2)$ на равномерной сетке и $O(\tau+|h|)$ на неравномерной сетке, где τ и h – шаги по времени и пространству соответственно.

Таким образом, созданный комплекс программ учитывает различные физические факторы, влияющие на процесс деградации ММП. Среди таких наиболее существенных факторов выделим следующие:

- возможный фазовый переход в грунте;
- различные теплофизические параметры грунта (не только в вертикальной плоскости);
- сезонное изменение температуры воздуха;
- конвективный и лучистый теплообмен на поверхности;
- различные теплоизолирующие материалы скважин;
- теплоизоляция поверхности рабочей площадки, на которой бурятся скважины (как правило, это бетонные плиты, песок и пеноплекс);
- реальная инженерная инфраструктура скважины, обеспечивающая ее теплоизоляцию от ММП.

В работе [9] приведен обзор работ по расчету растепления ММП от добывающих скважин и приведены интересные результаты по расчету по протаиванию ММП в области влияния двух скважин. Заметим, что в отличие от известных результатов по расчету растепления в системе скважина-грунт в зоне ММП, в математическую модель, представленную в данной работе, включены не только геометрические, теплоизоляционные характеристики инженерных сооружений вокруг скважин, различные варианты теплоизоляции внешней поверхности скважин, но и учтены различные климатические факторы, влияющие на протаивание ММП. В последнюю версию программного

Таблица 1 - Материалы отсыпки

бетон (плита 0.3 м.)		
Плотность	кг/м^3	2500
Теплопроводность	Вт/(м К)	1.69
Удельная теплоемкость	Дж/(кг К)	$0.84*10^3$
Коэффициент поглощения солнечной энергии		0.3
Коэффициент теплообмена с воздухом		1.4
песок (слой 1.7 м.)		
Плотность	кг/м^3	1600
Теплопроводность	Вт/(м К)	0.47
Удельная теплоемкость	Дж/(кг К)	$0.84*10^3$

Таблица 2 - Теплофизические параметры грунта

Теплопроводность, Вт/(м К)		Объемная теплоемкость, Дж/(м^3 К)		Объемная теплота фазового перехода, Дж/м^3
Мерзлый	Талый	Мерзлый	Талый	
2.43	**2.22**	**$2.17*10^6$**	**$2.42*10^6$**	**$1.04386*10^8$**

Таблица 3 - Инженерная конструкция скважины

от 0 до 25 м.	Радиус внутреннего слоя изоляции направления: **0.26 м.** (цемент, теплопропроводность 1.69 Вт/(м К), плотность 2500 кг/м^3, удельная теплоемкость 840 Дж/(кг К)). Радиус внешнего слоя изоляции направления: **0.41 м.** (пеноплекс, теплопроводность 0.031 Вт/(м К), плотность 80.0 кг/м^3, удельная теплоемкость 2530 Дж/(кг К)). Дополнительная изоляция цементом, радиусом **0.51 м.**
от 25м до 40 м.	Между эксплуатационной колонной и кондуктором – цемент. Радиус кондуктора: **0.1225 м.** Радиус изоляции кондуктора: **0.2225 м.** (тампонажный цемент, теплопроводность 0.21 Вт/(м К), плотность 960 кг/м^3, удельная теплоемкость 840 Дж/(кг К)).

комплекса включена возможность проводить расчеты растепления ММП от нескольких добывающих скважин при наличии сезонных охлаждающих устройств (СОУ).

Результаты расчетов

Ниже приведены результаты численных расчетов для трех добывающих скважин. Расчетная область выбиралась следующая: 70м (по оси x) x 50м (по оси y) x 40м (по оси z). Сетка состояла из 251x151x101=3828001 узлов. Начало эксплуатации скважин выбиралось в октябре. Оси трех скважин расположены соответственно на отметках 20м, 40м, 50м. Рабочая площадка, на которой располагались скважины, имеет сверху отсыпку толщиной 2 метра (бетонные плиты и песок) с теплофизическими параметрами, приведенными в таблице 1.

Под отсыпкой находится грунт с теплофизическими параметрами из таблицы 2.

Численные расчеты проводились для скважин с параметрами из таблицы 3 и начальным распределением температуры в грунте T0 (рис 3).

Интенсивность солнечной радиации и сезонные изменения температуры по месяцам представлены на рис. 4 и рис. 5.

Температура флюида в скважинах считается равной +250С. Результаты численных расчетов представлены на рис. 6 и рис. 7. Полученные тепловые поля иллюстрируют картину растепления ММП в процессе эксплуатации трех скважин в течение 5 и 15 лет соответственно. Время счета на суперЭВМ УрО РАН составило около двадцати часов.

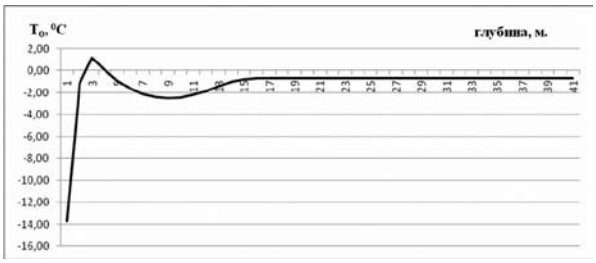


Рисунок 3 - Начальное распределение температуры в грунте.

Заключение

Основываясь на новой математической модели, был разработан комплекс программ для численного моделирования тепловых полей в системе скважины-ММП, позволяющий проводить вычислительные эксперименты и делать долговременные прогнозы по растеплению ММП в присутствии теплоизолированных скважин с учетом годичного цикла оттаивания/промерзания верхних слоев грунта под воздействием сезонных изменений температуры воздуха и интенсивности солнечного излучения. Результаты численного моделирования были использованы при проведении проектно-изыскательских работ на Сузунском и Тагульском нефтегазовых месторождениях, на основе которых был разработан Регламент, утвержденный Ростехнадзором.

Работа поддержана частично грантом РФФИ-УРАЛ № 10-08-96014.

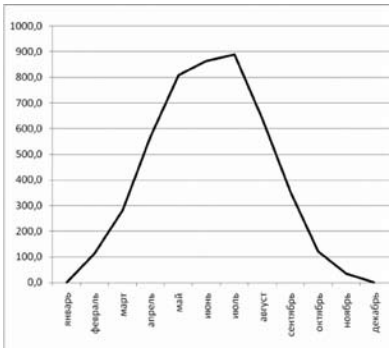


Рисунок 4 - Солнечная радиация.

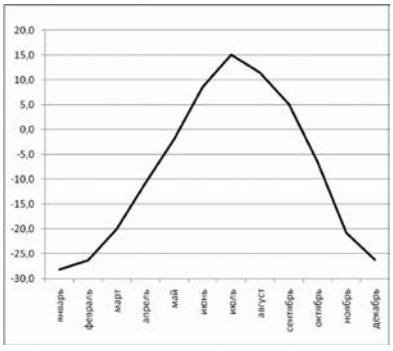


Рисунок 5 - Средняя температура

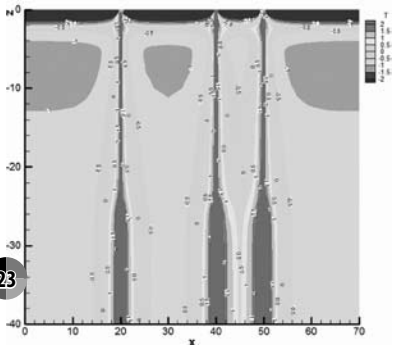


Рисунок 6 - Температурные поля от трех скважин через 5 лет после начала эксплуатации

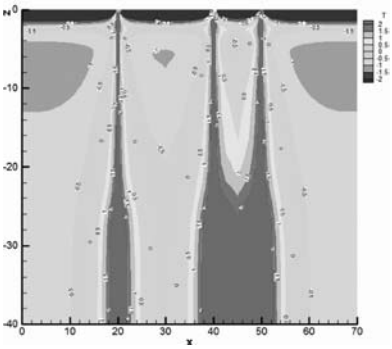


Рисунок 7 - Температурные поля от трех скважин через 15 лет после начала эксплуатации

Список литературы

1. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономическая схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // ЖВМиМФ, 1965. Т. 5. № 5. С. 816-827.

2. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

3. Ковеня В.М., Яненко Н.Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука, 1981. 304 с.

4. Ваганова Н.А. Моделирование неоднородных тепловых полей от заглубленного источника на дневной поверхности // Математическое и информационное моделирование: сборник научных трудов. Вып. 7. Тюмень: Издательство "Вектор Бук", 2005. С. 77-84.

5. Ваганова Н.А. Существование решения разностной начально-краевой задачи для линейного уравнения теплопроводности с нелинейным краевым условием // Труды института математики и механики УрО РАН, 2008. Т. 14. № 1. С. 11-21.

6. Vaganova N.A. Numerical simulation of heat propagation from deepen pipeline with accounting filtration properties of soils // Proceedings of XXXVII Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics». June 29-Julie 05, 2009, St. Petersburg (Repino). APM 2009. P.676-680.

7. Башуров Вл.В., Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Численное моделирование процессов теплообмена в грунте с учетом фильтрации жидкости // Вычислительные технологии, 2011. Т. 16. № 4. С. 3-19.

8. Киряков Е.И., Сипикин В.В. Влияние солнечной радиации на процесс оттаивания дорожных конструкций // Вестник ТГАСУ, 2007. № 4. С. 172-176.

9. Горелик Я.Б., Шабров А.Б., Сысоев Ю.С. Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин. Криосфера Земли, 2008. Т. XII. № 1. С. 59-65.

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ ПРОЕКТИРУЕМОГО ПОДЗЕМНОГО КОЛЛЕКТОРА НА ОКРУЖАЮЩИЙ МАССИВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

А.В. Степанов[1], А.М. Тимофеев[1], И.И. Рожин[2], Ф.Е. Попенко[3]

[1]Институт физико-технических проблем Севера СО РАН им. В.П. Ларионова, г. Якутск
[2]Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск
[3]Научно-внедренческий центр «Геотехнология», г. Якутск
e-mail: a.v.stepanov@iptpn.ysn.ru

В вычислительном эксперименте исследовано тепловое взаимодействие подземного коллектора с окружающими мерзлыми грунтами при различных заглублениях коллектора и толщинах теплоизоляции напорной трубы. Показано, что наибольшая глубина оттаивания достигается непосредственно под коллектором при больших его заглублениях и меньших толщинах изоляции.

Введение. Проектирование, строительство и эксплуатация различных инженерных сооружений, контактирующих с многолетнемерзлыми грунтами, связаны с техническими и конструктивными решениями сооружений. Успешное решение таких задач невозможно без правильного научного понимания тепловых процессов, происходящих в системе "мерзлый или талый грунт - инженерное сооружение - окружающая среда". Для этого необходимо знать температурное поле массива грунтов в любой момент времени, что дает возможность обоснованно прогнозировать устойчивость сооружений. Однако составление таких прогнозов на длительный срок затруднительно из-за того, что при знакопеременной температуре окружающей среды приходится решать многофронтовую задачу Стефана.

Регионы распространения многолетнемерзлых грунтов отличаются специфическими климатическими и мерзлотно-грунтовыми условиями. Особенностью инженерно-геокриологических условий г. Якутска Республики Саха (Якутия) является широкое распространение глинистых и пылеватых засоленных мерзлых грунтов с низкими прочностными характеристиками и структурной неустойчивостью при оттаивании, вмещающих постоянно действующие водонасыщенные талики надмерзлотного типа, преимущественно техногенного происхождения. Все это благоприятствует развитию опасных криогенных процессов при техническом нарушении естественных условий.

В данной работе рассматривается задача теплового влияния проектируемого подземного коллектора на окружающий его массив мерзлых грунтов. Коллектор представляет собой теплообменник типа "труба в трубе" (см. рис. 1), глубина заложения ($H + r_6$) которого варьируется от 3.5 до 7 м. Минимальное расстояние коллектора от близстоящих зданий ($B_y = L + r_6$) составляет 5 м.

На рис. 1 схематически показана расчетная область теплообмена, где цифрой 1 обозначен рабочая напорная труба из полиэтилена, 2 – опорно-направляющее кольцо, 3 – стальной футляр, который сооружается методом микротоннелирования; между трубами 1 и 2 находится теплоизоляция из пенополиуретана, а между 2 и 3 – воздушная прослойка.

Целью исследования являются определение температурного поля массива грунтов вокруг коллектора при различных глубинах его заложения и изучение влияния теплоизоляции напорной трубы. Процесс теплообмена массива грунтов с коллектором исследуется при учете сезонных изменений условий теплообмена на дневной поверхности. Методом исследования является математическое моделирование.

Постановка задачи и ее решение. Математическая постановка задачи оттаивания–промерзания массива грунтов в основании здания осуществлена на основе общей постановки задач типа Стефана. При этом задача теплопроводности с фазовым переходом "вода - лед" формулируется как обычная краевая задача для квазилинейного параболического уравнения с разрывными коэффициентами, которое дополняется начальным и граничными условиями, определяемыми характером сопряжения тепловых потоков. В математической модели были приняты следующие допущения:

• перенос тепла внутри массива грунта осуществляется только теплопроводностью, тем самым при расчете температурного поля не учитываются массообменные процессы;

• теплофизические характеристики слоев массива грунтов считаются кусочно-постоянными для талого и мерзлого состояний, учитывая их малое изменение в рассматриваемом диапазоне температур;

• фазовый переход влаги происходит при постоянной температуре без изменения начальной влажности и объема.

Уравнение теплопроводности имеет вид

$$\tilde{C}(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right),\ 0 < y < B_y,\ 0 < z < B_z,\ t > 0 \qquad (1)$$

где коэффициенты λ и $\tilde{C}$ аппроксимируются как кусочно-постоянные (сглаженные) функции по температуре в окрестности фазового перехода.

Наиболее подходящим для численного решения прикладных задач Стефана, которые в основ-

ном бывают многомерными и характеризуются наличием нескольких немонотонно движущихся фронтов фазового перехода, является метод, основанный на подходе, изложенном в монографии [1]. Для этого метода авторы работы [2] разработали экономичную разностную схему сквозного счета со сглаживанием разрывных коэффициентов в уравнении теплопроводности по температуре в окрестности фазового перехода.

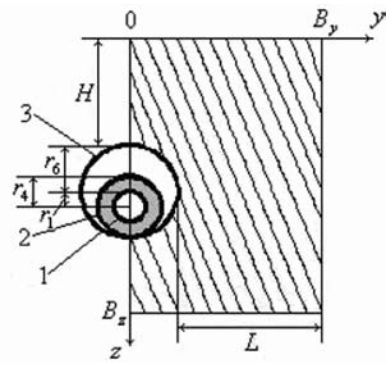


Рисунок 1. Расчетная область

В данной работе используются следующие аппроксимации температурной зависимости теплофизических характеристик в окрестности фазового перехода (рис. 2): линейная для и параболическая для

$$\lambda(T)=\begin{cases}\lambda_{\mathrm{f}}, & T<T_{\mathrm{ph}}-\Delta_{\mathrm{f}};\\ \lambda_{\mathrm{f}}-\left(\lambda_{\mathrm{f}}-\lambda_{\mathrm{th}}\right)\left(\dfrac{T-T_{\mathrm{ph}}+\Delta_{\mathrm{f}}}{\Delta_{\mathrm{th}}+\Delta_{\mathrm{f}}}\right), & T_{\mathrm{ph}}-\Delta_{\mathrm{f}}\le T<T_{\mathrm{ph}}+\Delta_{\mathrm{th}};\\ \lambda_{\mathrm{th}}, & T\ge T_{\mathrm{ph}}+\Delta_{\mathrm{th}};\end{cases} \tag{2}$$

$$\widetilde{C}(T)=\begin{cases}C_{\mathrm{f}}, & T<T_{\mathrm{ph}}-\Delta_{\mathrm{f}};\\ C_{\mathrm{ph}}+\left(C_{\mathrm{f}}-C_{\mathrm{ph}}\right)\left(\dfrac{T-T_{\mathrm{ph}}}{\Delta_{\mathrm{f}}}\right)^2, & T_{\mathrm{ph}}-\Delta_{\mathrm{f}}\le T<T_{\mathrm{ph}};\\ C_{\mathrm{ph}}+\left(C_{\mathrm{th}}-C_{\mathrm{ph}}\right)\left(\dfrac{T-T_{\mathrm{ph}}}{\Delta_{\mathrm{th}}}\right)^2, & T_{\mathrm{ph}}\le T<T_{\mathrm{ph}}+\Delta_{\mathrm{th}};\\ C_{\mathrm{th}}, & T\ge T_{\mathrm{ph}}+\Delta_{\mathrm{th}};\end{cases} \tag{3}$$

где полуинтервалы сглаживания Δ могут быть не равны друг другу ($\Delta_{\mathrm{th}}\neq\Delta_{\mathrm{f}}$ $\Delta_{\mathrm{th}}>0$ $\Delta_{\mathrm{f}}>0$). При этом скрытая теплота фазового перехода $W=\left(q_{\mathrm{ph}}+T_{\mathrm{ph}}c_p\right)\rho\,\omega$ вводится с применением δ -функции Дирака как сосредоточенная теплоемкость в коэффициент $\widetilde{C}(T)$. Из равенства скрытой теплоты фазового перехода к количеству теплоты, получаемому при аппроксимации объемной теплоемкости в интервале температур от $T_{\mathrm{ph}}-\Delta_{\mathrm{f}}$ до $T_{\mathrm{ph}}+\Delta_{\mathrm{th}}$ и равному площади заштрихованной области (рис. 2, b), можно определить величину объемной теплоемкости при температуре фазового перехода

$C_{\mathrm{ph}}=\left(6W+C_{\mathrm{f}}\left(\Delta_{\mathrm{f}}+3\Delta_{\mathrm{th}}\right)+C_{\mathrm{th}}\left(\Delta_{\mathrm{th}}+3\Delta_{\mathrm{f}}\right)\right)/4\left(\Delta_{\mathrm{f}}+\Delta_{\mathrm{th}}\right)$

Температурное поле в начальный момент времени задается в виде функции, зависящей только от вертикальной координаты , и находится путем аппроксимации данных термометрии

$T=T_0(z)$, t=0 (4)

На дневной поверхности грунтового массива, граничащего с атмосферным воздухом, принимается граничное условие конвективного теплообмена, где учитывается поступление тепла излучением [3]

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}=\alpha_{\mathrm{r.a}}\left(T_{\mathrm{a}}+\frac{Q(1-A)}{\alpha_{\mathrm{a}}}-T\right)\qquad z=0 \tag{5}$$

а на поверхности теплообмена с коллектором принимается условие

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n}=\alpha_{\mathrm{r.sew}}\left(T_{\mathrm{w}}-T\right)\qquad r_6=\sqrt{y^2+z^2} \tag{6}$$

где $\alpha_{\mathrm{r.a}}$, $\alpha_{\mathrm{r.sew}}$ – приведенные коэффициенты теплообмена к поверхностям массива со стороны атмосферного воздуха и коллектора; n – нормаль к поверхности коллектора с наружным радиусом r_6.

Принимаем также условие симметрии

$$\frac{\partial T}{\partial y}=0,\ y=0; \tag{7}$$

условия равенства нулю тепловых потоков на достаточном удалении

$$\frac{\partial T}{\partial y}=0\qquad y=B_y\qquad \frac{\partial T}{\partial z}=0\qquad z=B_z \tag{8}$$

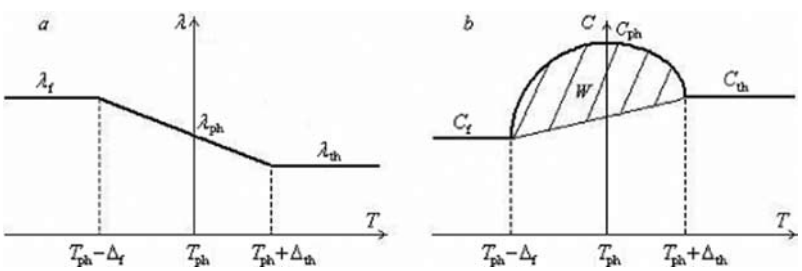


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности (a) и объемной теплоемкости (b) в окрестности фазового перехода

Слой снежного покрова учитывается как термическое сопротивление в приведенном коэффициенте теплообмена

$$\alpha_{\mathrm{r.a}}=1\Big/\left(\frac{1}{\alpha_{\mathrm{a}}}+\frac{h_{\mathrm{sn}}}{\lambda_{\mathrm{sn}}}\right)$$

При этом из монографии [3] используется зависимость истинной теплопроводности снега от его плотности:

$\lambda_{sn} = 1.163\left(0.03 + 0.303\rho_{sn} - 0.177\rho_{sn}^2 + 2.25\rho_{sn}^3\right)$, , где p_{sn} измеряется в г/см^3

Коэффициент теплоотдачи от атмосферного воздуха к дневной поверхности массива как для летнего, так и для зимнего периода определяется по формуле [4]: $\alpha_a = 15.12\sqrt{\upsilon_a}$, где v – среднемесячная скорость ветра.

В разработанной математической модели учитываются циклические изменения температуры атмосферного воздуха, воздействия суммарной солнечной радиации и альбедо дневной поверхности, изменения толщины и теплопроводности снежного покрова, а также изменение коэффициента теплоотдачи атмосферного воздуха в зависимости от скорости ветра.

Поставленная задача (1)-(8) решается конечно-разностным методом с использованием продольно-поперечной схемы (суммарной аппроксимации), при этом исходное уравнение (1) расщепляется на уравнения с весами [5]. Таким образом, эффективный расчет двумерной задачи строится на основе метода расщепления по пространственным координатам с использованием схемы переменных направлений [6] и с привлечением для обеспечения устойчивости получающихся одномерных задач неявных методов на основе прогоночных алгоритмов.

Вычислительный эксперимент и обсуждение результатов. Расчеты выполнены для условий г. Якутска при исходных данных, включающих: сведения о вещественном составе массива грунтов, их теплофизических характеристиках, данные термометрии, данные конструкции исследуемого заглубленного сооружения.

Физические свойства массива грунтов были определены научно внедренческим центром «Геотехнология» при инженерно-геологических изысканиях. Так, для среднезернистого мерзлого песка получены характеристики: ω = 0.25, ρ =1530 кг/м^3, T_{ph} = 0°С, λ_{th} = 2.21 Вт/(м^{3o}С), λ_f = 2.442 Вт/(м°С), C_{th} = 3.289 10^6 Дж/(м^{3o}С), C_f = 2.198 10^6 Дж/(м^{3o}С). По СНиП [7] коэффициент теплопроводности: для полиэтиленовой трубы λ_{pp} = 0.43 Вт/(м^{3o}С), для пенополиуретановой изоляции

Среднемесячные значения температуры воздуха T_a и скорости ветра v_a были взяты из СНиП [8], а значения суммарной солнечной радиации Q и альбедо поверхности A из [9]. Также для расчета используются среднедекадные значения толщины h_{sn} и плотности p_{sn} снежного покрова [3]. Значения этих величин между соседними месяцами (или декадами) аппроксимируем линейными зависимостями, тем самым получим их циклические изменения за год.

Предполагается, что вода в потоке хорошо перемешивается, так что все ее характеристики можно усреднить по сечению напорной трубы. Физические свойства воды считаются постоянными. Течение воды гидродинамически стабилизировано, т.е. задается средняя по сечению скорость v_w , профиль скорости и коэффициент теплоотдачи не меняются по длине трубы. Это допущение позволяет избежать применения уравнений Навье-Стокса для описания конвективного теплообмена внутри трубы, что привело бы к неоправданному усложнению математической модели.

Учет неравномерности распределения скорости по сечению трубы осуществляется путем использования полуэмпирических зависимостей коэффициента конвективного теплообмена от чисел Рейнольдса $\mathrm{Re}_w = \upsilon_w d_1 / \nu_w$ и Прандтля $\mathrm{Pr}_w = \nu_w C_w / \lambda_w$. Среднее значение коэффициента теплоотдачи от воды к трубе вычисляется по формуле: $\alpha_w = \mathrm{Nu}_w \lambda_w / d_1$, где число Нуссельта для турбулентного режима $\mathrm{Nu}_w = 0.021\,\mathrm{Re}_w^{0.8}\,\mathrm{Pr}_w^{0.43}$ [10]. В этих уравнениях за определяющую температуру принимается средняя температура воды, а за определяющий размер – внутренний диаметр напорной трубы . Так, при T_w = 18°С, v_w = 1.5 м/с и d_1 = 0.43 м коэффициент теплоотдачи получится α_w = 2436.4 Вт/(м^2°С).

Для расчета необходимо учесть наличие воздушной прослойки между изоляционной трубой коллектора и стальным футляром. Вследствие ограниченности пространства и наличия восходящих и нисходящих потоков здесь сильно усложняются условия движения и теплоотдачи. Они зависят как от формы и размеров пространства, так и от свойств воздуха его температуры и температурного напора между поверхностями прослойки ΔT_{a1}. Авторы работы [10] предложили рассчитывать тепловой поток через прослойки толщиной h_{a1} по закону Фурье, при этом в эквивалентном коэффициенте теплопроводности учитывается влияние переноса теплоты теплопроводностью и конвекцией. Значение коэффициента конвекции зависит от интенсивности свободной конвекции и описывается экспериментальной функцией вида: $\varepsilon_{con} = f\left(\mathrm{Gr}_{a.l}\,\mathrm{Pr}_{a.l}\right)$. При вычислении чисел Прандтля и Грасгофа $\mathrm{Gr}_{a.l} = \beta_{a.l} g h_{a.l}^3 \Delta T_{a.l} / \nu_{a.l}^2$ за определяющую температуру берется средняя температура воздуха внутри прослойки , а за определяющий размер – ее толщина . При малых значениях аргумента принято, что или . Это означает, что передача теплоты от горячей поверхности к холодной осуществляется только теплопроводностью воздуха. При значениях $10^3 < \mathrm{Gr}_{a.l}\,\mathrm{Pr}_{a.l} < 10^6$ – $\varepsilon_{con} = 0.105\left(\mathrm{Gr}_{a.l}\,\mathrm{Pr}_{a.l}\right)^{0.3}$, а при $10^6 < \mathrm{Gr}_{a.l}\,\mathrm{Pr}_{a.l} < 10^{10}$ – $\varepsilon_{con} = 0.4\left(\mathrm{Gr}_{a.l}\,\mathrm{Pr}_{a.l}\right)^{0.2}$. Снижение интенсивности теплопередачи при больших значениях аргумента объясняется взаимной помехой в движении восходящих (нагретых) и нисходящих (охлажденных) потоков воздуха.

Зная физические свойства воздуха при средней температуре T_{a1} и разность температур определяем вначале значение определяющего критерия, затем коэффициент конвекции и эквивалентный коэффициент теплопроводности воздуха при различных толщинах воздушной прослойки.

Таким образом, все слои конструкции коллектора (напорная труба, теплоизоляция, опорно-направляющее кольцо, кольцевое воздушное пространство и стальной футляр) учитываются как термические сопротивления в приведенном коэффициенте конвективного теплообмена от кол-

Таблица 1 - Величины для определения

h_{ins}, м	h_{a1}, м	λ_{eq}, Вт/(м·°С)	d_3, м	d_4, м	$\alpha_{r.sew}$, Вт/(м^2·°С)
0	0.123	0.188	0.696	0.72	0.364
0.010	0.103	0.169	0.470	0.49	0.281
0.045	0.068	0.126	0.540	0.56	0.159
0.070	0.043	0.083	0.590	0.61	0.123

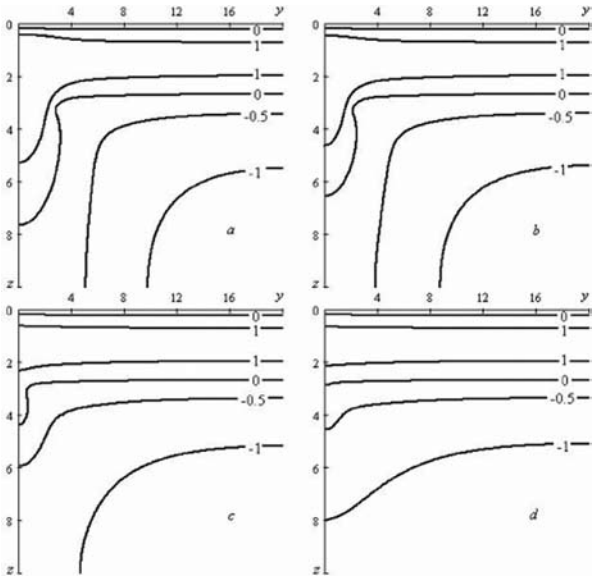


Рисунок 3 - Конфигурации изотерм в середине октября (через 30 лет эксплуатации) при заглублении коллектора на 3.5 м и толщине изоляции напорной трубы: a – 0 мм; b – 10 мм; c – 45 мм; d – 70 мм

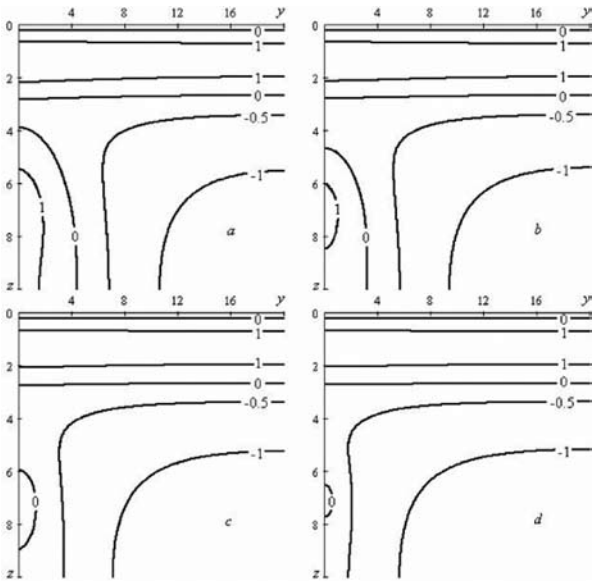


Рисунок 4 - Конфигурации изотерм в середине октября (через 30 лет эксплуатации) при заглублении коллектора на 7 м и толщине изоляции напорной трубы: a – 0 мм; b – 10 мм; c – 45 мм; d – 70 мм

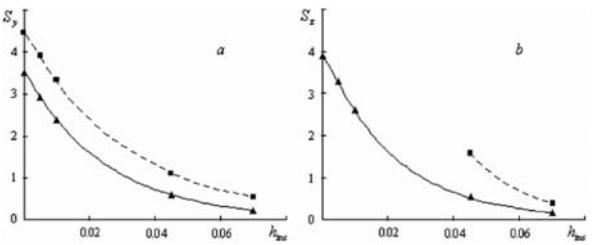


Рисунок 5 - Зависимость (a) и (b) от толщины изоляции (через 30 лет эксплуатации): сплошная линия – при заглублении коллектора на 3.5 м, точечная – на 7 м

лектора к массиву грунтов

По конструкции коллектора известны диаметры м, м, м, м, а значения диаметров и зависят от толщины тепловой изоляции. Окончательные результаты расчетов при разных толщинах изоляции и воздушной прослойки сведены в табл. 1.

В результате получены температурные поля массива грунтов около заглубленного коллектора в различные моменты времени, которые представлены на рис. 3 и 4. На этих рисунках цифры у кривых соответствуют значениям температур. В ходе расчетов выявлено, что глубина сезонного оттаивания грунтов вблизи коллектора возрастает с течением времени.

Для рис. 5 величина означает максимальное расстояние по координате от оси симметрии до фазового фронта, а – глубина оттаивания грунтов под коллектором. Координаты месторасположения таликовой зоны вокруг коллектора определены при температуре 0 оС. В зависимости от засоленности и влажности грунтов эти найденные значения могут быть больше. Видно, что с увеличением толщины теплоизоляции напорной трубы мощность таликовой зоны уменьшается.

Анализ результатов при 30-летнем расчетном цикле показал, что слой теплоизоляции и воздушной прослойки способствуют затуханию тепловых возмущений и значительно уменьшает ореол оттаивания массива грунтов, тем самым позволяет увеличить несущую способность сооружения и продлевает срок его эксплуатации.

На основании выполненных численных расчетов при проектировании подземного коллектора рекомендуется учитывать следующее:

- с увеличением толщины теплоизоляции оттаивание массива грунтов уменьшается, при этом радиус оттаивания по вертикальному направлению больше чем по горизонтальному;
- ореол оттаивания массива грунтов вокруг коллектора при его заглублении на 3.5 м меньше, чем при заглублении на 7 м, что связано с циклическим влиянием внешнего воздействия на дневной поверхности.

Обозначения

A – альбедо; C – объемная теплоемкость, Дж/(м^3°C); c_p – удельная теплоемкость воды при постоянном давлении, Дж/(кг°C); d – диаметр, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2; Gr – число Грасгофа; h – толщина, м; l – длина, м; Nu – число Нуссельта; Pr – число Прандтля; Q – суммарная солнечная радиация, Вт/м^2; q_f – удельная теплота фазового перехода “вода - лед”, Дж/кг; r – радиус, м; Re – число Рейнольдса; S – радиус оттаивания, м; T – температура, °C; t – время, с; v – скорость, м/с; V – скрытая теплота фазового перехода, Дж; y, z – координаты, м; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м^2°C); B – температурный коэффициент объемного расширения, 1/К; Δ – температурные полуинтервалы сглаживания δ - функции Дирака, °C; ε – поправка; λ – ко-

эффициент теплопроводности, Вт/(м°С); v – кинематическая вязкость, $м^2/с$; ρ – плотность, $кг/м^3$; ω – влажность.

Нижние индексы: 0 – начальное состояние; a – воздух; a.l – воздушная прослойка; con – конвекция; eq – эквивалентный; f – мерзлый; ins – теплоизоляция; ph – фазовый переход; p.p – напорная труба; r – приведенный; sew – коллектор; sn – снег; s.c – стальной футляр; th – талый; w – вода.

Список литературы

1. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.

2. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерных задач Стефана // Журнал вычисл. математики и матем. физики. 1965. Т. 5, № 5. – С. 816–827.

3. Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. – Якутск: Якутское книжное изд-во, 1975. – 304 с.

4. Порхаев Г.В., Щелоков В.К. Прогнозирование температурного режима вечномерзлых грунтов на застраиваемых территориях. – Л.: Стройиздат, 1980. – 112 с.

5. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

6. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 196 с.

7. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 28 с.

8. СНиП 23-01-99. Строительная климатология / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 59 с.

9. Спасская падь: Комплексные исследования мерзлотных ландшафтов /Федоров А.Н., Максимов Т.Х., Гаврильев П.П. и др. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2006. – 210 с.

10. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕРЗЛЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАЧАЛА ЗАМЕРЗАНИЯ

В.С. Колунин[1], А.В. Колунин[1], А.Д. Писарев[1]

[1]Институт криосферы Земли СО РАН, г.Тюмень, e-mail: askold@ikz.ru

Проведены опыты по измерению тепломассообменных свойств водонасыщенной керамики, содержащей макровключение. В градиентном поле температуры лед движется относительно керамики. Движение льда в полости ячейки увеличивает коэффициент теплопроводности образца примерно 1.2 раза.

Известно, что теплопроводность мерзлого водонасыщенного грунта выше, чем талого [1]. Это не удивительно, потому что коэффициент теплопроводности льда почти в 1,5 раза выше коэффициента теплопроводности воды. Однако, мерзлые глинистые грунты обнаруживают немонотонный характер зависимости теплопроводности от температуры – максимум находится вблизи температуры начала замерзания. Такое поведение теплопроводящих свойств высокодисперсного мерзлого грунта может быть следствием режеляционного движения льда относительно грунтовых частиц [2]. Для проверки этой гипотезы нами были проведены опыты с образцом керамики, содержащей макровключение льда.

Методика эксперимента

Общий вид экспериментальной установка по изучению тепломассообменных свойств мерзлых пористых материалов вблизи температуры начала замерзания изображен на рис. 1. В качестве объекта исследования выбрана модельная ячейка бипористой среды - цилиндр из пористой керамики с полостью (Рис. 2). Пористая среда сбоку полости была собрана из трех колец керамики, разделенных тонким слоем герметика. Тем самым предполагается, что весь поток массы через среднюю часть образца будет переноситься включением льда посредством режеляции.

Основные характеристики образца и элементов основного блока установки приведены в таблице 1.

Подготовительный этап опыта включает следующие работы: вакуумирование образца и подводящих трубок, заполнение системы дегазированной водой, одностороннее замораживание керамического образца и последующая оттайка подводящих трубок (7) и емкостей (14) (Рис. 2), домораживание воды в полости. По времени подготовительный этап занимает от трех суток до недели.

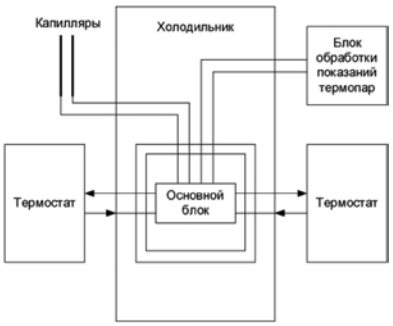
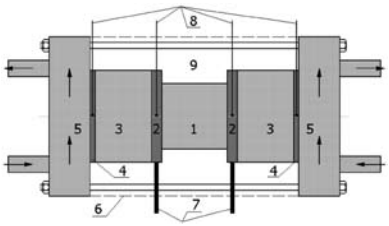


Рисунок 1 - Общий вид экспериментальной установки.

Таблица 1. Характеристики элементов экспериментальной ячейки

	Диаметр (внешний), мм	Высота, мм	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	Коэффициент гидропроводности, м²/(Па·с)
Полость (лед) (10)*	20,2	16,5	2,2	
Керамика (11)	29,7	26,9	1,4	$1{,}9\cdot10^{-13}$
Обойма (12)	32,2	26,9	0,35	
Измерительный цилиндр (3)	44,5	31,4	0,21	
Пенопласт (9)	79	102,5	0,044	



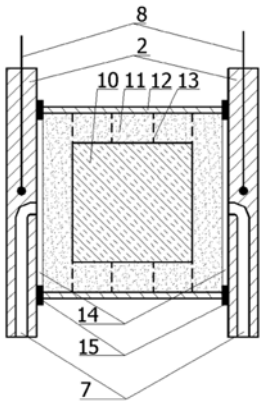


Рисунок 2 - Схема основного блока установки по измерению тепломассообменных параметров. а. Общий вид. 1 - образец, 2 - латунные пластины, 3 - измерительные цилиндры из плексигласа, 4 - медные пластины, 5 - латунные теплообменники, через которые прокачивается термостатируемая жидкость, 6 - экран из медной фольги, 7 - водоканалы, 8 - измеряемые концы разностных термопар, 9 - пенопласт. б. Образец с пластинами. 10 - полость, 11- пористая керамика, 12 - пластиковая обойма, 13 - стык колец из пористой керамики (герметик), 14 - зазоры, заполненные водой, 15 - резиновые уплотнители.

Керамика служит фазовым барьером от проникновения льда в емкости (14) вплоть –0,05°С.

В эксперименте измеряются величины потоков тепла и массы через образец, вызванные разностью температур латунных пластин (2). Для определения величины теплового потока служат эталонные цилиндры (3), а поток жидкости находится по движению мениска жидкости в калиброванных капиллярных трубках. Величина температуры измеряется в четырех точках 8 (Рис. 2а) при помощи разностных медь-константановых термопар.

Опорный спай термопары поддерживается при температуре 0°С, посредством его погружения в термос с дисциллированной водой и измельченным

льдом. В свою очередь термос размещается в холодильнике с температурой воздуха незначительно выше 0°С.

Для соответствия разности электрического напряжения и перепада температуры на спаях термопары используется стандартная градуировочная характеристика [Термопары, 2002].

Термо-ЭДС термопар оцифровываются 24-битным шестиканальным аналого-цифровым преобразователем, выполненным на микросхеме AD7794 [AD7794 data sheet, 2006]. При помощи микроконтроллера PIC18F252 [DS39564B data sheet, 2002] показания в цифровом коде передаются на компьютер и регистрируются с интервалом 10 секунд. Для повышения точности измерения частота оцифровки выбрана кратной сетевой помехе (50 Гц).

При помощи термостата проведено определение абсолютной погрешности системы измерения, которая составляет не более ±0,01 градуса. Погрешность в измерении разности температур дифференциальным методом - менее ±0,004 градуса.

В настоящей статье представлены результаты опытов по изучению зависимости потоков через образец от перепада температуры на латунных пластинах.

Для большинства измерений среднеквадратичное отклонение среднего значения температуры теплообменников не превышает 0,0005 градуса, а латунных пластин - 0,005 градуса.

Для сравнения результатов измерений с теорией создана вычислительная программа по решению сопряженных тепловой задачи во внутренней области основного блока и задачи фильтрации в керамике. Входными параметрами являются температура теплообменников (5) и давление в трубках (7) (Рис. 2а). Программа находит скорость движения льда в полости ячейки, температуру латунных пластин (2), также величины потоков тепла и жидкости через основания образца.

Градиент температуры инициирует движение льда (10) в полости ячейки (рис. 2б) и, как следствие, через образец устанавливается поток жидкости. Объемный расход воды определяется по движению мениска в капиллярных трубках, подсоединенных к входу и выходу (7) ячейки.

Для нахождения потока тепла к наружным основаниям пластин (9) плотно прижаты эталонные цилиндры, через которые осуществляется теплообмен образца с массивными термостатируемыми пластинами (теплообменниками). Величина аксиального потока тепла в ячейке определяется согласно закону Фурье по измеренным температурам на основаниях эталонных цилиндров.

Единичное измерение занимает период времени от 12 до 36 часов, в течение которого на теплообменниках поддерживаются установленные значения температуры. За этот же период времени определяется объем жидкости, прошедшей через образец.

Экспериментальные величины потоков тепла и расхода жидкости в зависимости от перепада температуры на основаниях образца представлены на Рис. 3. Между величиной потоков и перепадом температуры на границах образца наблюдается примерно линейная зависимость. Понижение средней температуры при прочих равных условиях приводит к уменьшению величин потоков тепла и массы. Сравнение с теорией показывает, что на обоих графиках экспериментальные точки лежат ниже расчетных значений.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений, показывают, что система обладает термоосмотическими свойствами, т.е. градиент температуры создает поток массы через образец. Поэтому в основу обработки экспериментальных данных положены уравнения переноса в общем виде:

$$J_V = C_{pp}\frac{\Delta p}{\Delta x} + C_{pt}\frac{\Delta T}{T_0 \Delta x} \qquad J_q = C_{tp}\frac{\Delta p}{\Delta x} + C_{tt}\frac{\Delta T}{T_0 \Delta x} \qquad (1)$$

где J_V– плотность объемного потока [м·с$^{-1}$] и J_q – плотность потока тепла [Дж·м$^{-2}$·с$^{-1}$] через основания образца; *d*p, *d*T - перепады давления жидкости [Па] и температуры [К] на высоте образца *d*x [м]; C_{pp}, C_{pt}, C_{tp}, C_{tt} - коэффициенты переноса; T_0 = 273,15 К.

Поскольку опыты проводились при нулевом перепаде давления, то набор экспериментальных точек позволяет определить коэффициенты C_{tt} и C_{pt}.

Как можно видеть на рисунке 3, потоки тепла и массы, а значит и С-коэффициенты, зависят от средней температуры образца, которая, по этой причине, включена в совокупность параметров результата измерения.

Величины коэффициентов в зависимости от средней температуры образца приведены на Рис. 4 – 5 . Можно видеть, что с понижением температуры абсолютное значение коэффициента C_{tt} уменьшаются.

Весь цикл измерений включал семь серий. После каждой серии за исключением четвертой производилась промывка системы дистиллированной водой в течение от 1 до 7 суток. Необходимость в этом обнаружилась в ходе эксперимента. В 1 серии было замечено, что величины потоков массы через образец значительно меньше расчетных.

В конце этой серии температура фазового равновесия лед-вода оказалось равной –0,017 ºС, что соответствует концентрации раствора неэлектролита примерно 0,01 моль/л. Величина концентрации попадает в диапазон значений от 0,001 до 0,01 моль/л, в пределах которого происходит, согласно теоретическим оценкам, резкое уменьшение скорости движения льда относительно каркаса пористой среды.

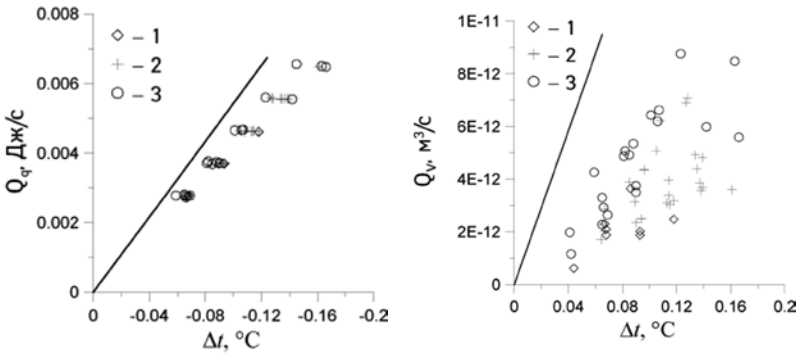


Рисунок 3 - Потоки тепла (а) и вещества (б) через образец в зависимости от разности температуры на его основаниях. Символы - экспериментальные данные при различных средних температурах t0 [єС]: 0,04 (1); 0,03 (2); 0,02 (3). Линии – результат расчета.

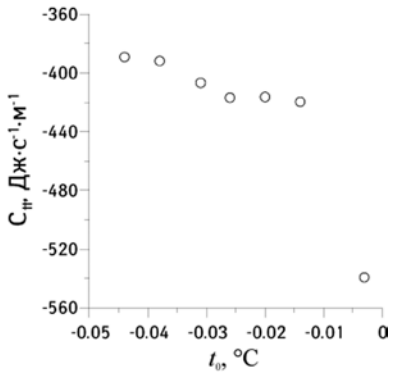


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента Ctt от средней температуры образца.

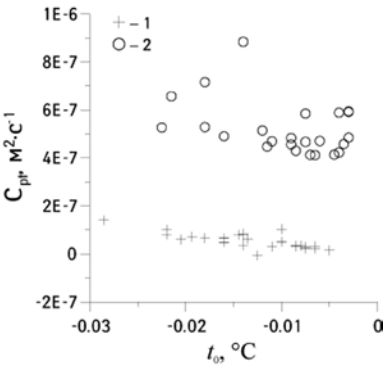


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента переноса Cpt от средней температуры образца для 1 и 2 серий измерений.

Таблица 2 - Теоретические значения коэффициентов Ctt и Cpt.

C_{pt}, м²с□-1	C_{tt}, Дж·м⁻¹с⁻¹
1,40·10□6	555

С целью проверки предположения о попадании в воду посторонних примесей была осуществлена промывка всей системы дистиллированной водой в течение недели. На Рис. 5 приведены значения коэффициента C_{pt}, найденного по результатам измерений в 1 и 2 сериях.

Для вычисления коэффициент C_{tt} были взяты результаты измерений 6 и 7 серий.

Теоретическая модель, дает величины С-коэффициентов, представленные в Таблице 2.

Сравнение коэффициентов переноса тепла C_{tt} (Рис. 4 и Таблица 2) показывает, что абсолютное значение теоретического коэффициента оказывается выше экспериментального практически по всем диапазоне температуры. Заметный вклад в величину коэффициента C_{tt} дает режеляционное движение льда. Так, если лед неподвижен относительно керамики, теоретическое значение коэффициента C_{tt} оказывается равным 345 Дж·м$^{-1}$с$^{-1}$.

Теория предсказывает более высокую скорость льда по сравнению с экспериментальной. Это различие может быть следствием двух причин: в теории не учитывается гидросопротивление пленки незамерзшей воды между основанием включения льда и стенками полости, а также предполагается отсутствие растворимых соединений в воде. Оба этих фактора уменьшают скорость льда относительно керамики.

В свою очередь, уменьшение скорости режеляционного движения льда и наличие незамерзающих каналов между областями плавления льда и замерзания воды приводят к тому, что величина коэффициента переноса C_{pt}, измеренного в эксперименте, становится заметно меньше теоретического. (Таблица 2 и Рис. 5).

Представленные выше оценки получены для пористой среды с макровключением льда. Значение коэффициента C_{pt}, определяется во многом гидравлическими свойствами каналов между областями плавления и замерзания льда, а значит и размером включения. С уменьшением размера льда роль проводимости гидравлических каналов возрастает и, как результат, должна быть меньше величина недиагональных коэффициентов. В настоящее время отсутствует необходимое количество экспериментального материала, на основании которого можно судить о значимости участия микровключений льда в тепломассообменных процессах в мерзлых пористых средах.

Список литературы

1. Комаров И.А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М., Научный мир, 2003, 608с.

2. Колунин В.С. Тепломассоперенос в пористой среде с ледяными включениями // Криосфера Земли, 2004, Т.8, №4, 45-53.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ МЕТОДОМ КИНЕТИКИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Е.Г. Старостин

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск,
e-mail: e.g.starostin@iptpn.ysn.ru

Представлены результаты исследования содержания незамерзшей воды в грунтах методом кинетики кристаллизации. В исследованном интервале температуры выявлена сильная зависимость содержания незамерзшей воды от общей влажности.

Повышение температуры горных пород криолитозоны в результате климатических изменений и техногенных воздействий может привести к полной и частичной потере несущей способности мерзлых грунтов оснований зданий и сооружений. Тем более что это все происходит на фоне все усиливающегося засоления грунтов. В свете этого актуальными являются исследования фазового состояния воды в мерзлых горных породах в интервале вблизи температуры начала замерзания.

Именно при изменениях в этой области температуры происходит в основном формирование и потеря несущей способности грунтов. Миграция воды и связанное с ней пучение грунтов также определяются резкими изменениями свойств грунта в этом интервале температуры.

Несмотря на важность, исследований закономерностей формирования фазового состояния воды в мерзлых горных породах вблизи температуры начала ее замерзания явно недостаточно. Это, во многом, объясняется сложностями экспериментальных измерений в данном интервале температуры. Такие исследования предполагают очень точное термостатирование. Даже колебания температуры в 0,1°С могут вызывать недопустимую погрешность измерений. Это связано с тем, что в этой области даже незначительные изменения температуры вызывают интенсивные фазовые переходы. Это, в свою очередь, становится причиной резких изменений всех свойств грунтов.

Особенности тех или иных методов исследования также могут становиться препятствием для получения данных в этой области температуры. Например, в методе непрерывного нагрева трудности возникают вследствие появления в образце фронта фазового перехода [19].

Метод

Исследования кинетики кристаллизации поровой воды и связанных с ней процессов во влажных дисперсных средах, в том числе в грунтах, проводятся давно. В последнее время наблюдается всплеск интереса исследователей к данной проблеме

[6 – 8, 14, 23, 24, 26, 31]. Разработанный нами метод определения фазового состава воды при отрицательных температурах по кинетике кристаллизации позволяет измерять количества незамерзшей воды вблизи температуры начала замерзания.

Расчет баланса теплоты при кристаллизации воды при скачке температуры после переохлаждения позволяет рассчитать фазовый состав воды при температуре, достигаемой в конце скачка. Исходя из этого, разработан новый метод определения содержания незамерзшей воды и льдистости в горных породах, строительных материалах [17, 18].

Сущность метода заключается в следующем. Исследуемый образец, содержащий как один из компонентов воду, охлаждают до достижения состояния переохлаждения воды. В переохлажденном состоянии поддерживают до сведения к минимуму перепадов температуры в образце и спонтанной кристаллизации воды. Если не происходит спонтанной кристаллизации, то ее вызывают внешним, например, механическим, воздействием. Кристаллизация (зародышеобразование) воды начинается при температуре переохлаждения и сопровождается выделением теплоты кристаллизации. В результате этого наблюдается рост температуры. Изменение температуры образца во время проведения эксперимента (термограмма) показано на рис. 1. При температуре начала равновесной кристаллизации появившийся лед и оставшаяся в жидком состоянии вода приходят в равновесие друг с другом. Дальнейшая кристаллизация воды происходит при понижении температуры. Таким образом, в начальном этапе кристаллизации воды происходит скачок температуры образца от температуры переохлаждения до температуры начала равновесной кристаллизации воды (рис. 1).

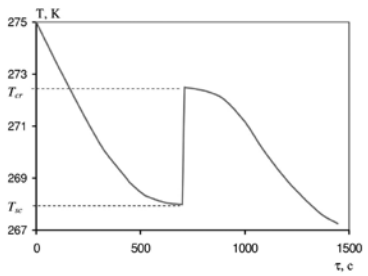


Рисунок 1 - Термограммы замерзания воды в грунтах

В течение всего процесса охлаждения образца и последующей кристаллизации воды непрерывно измеряют температуру образца. Величину переохлаждения регулируют температурой окружающей среды или выбором момента времени внешнего воздействия, вызывающего кристаллизацию. Составляют тепловой баланс начального этапа кристаллизации поровой воды, используя разность температур переохлаждения и начала равно-

весной кристаллизации, и по нему рассчитывают содержание незамерзшей воды и льдистости при температуре начала равновесной кристаллизации.

Тепловой баланс кристаллизации, начинающейся при температуре переохлаждения, до достижения температуры начала равновесной кристаллизации имеет вид

$$-\left[L-(C_w-C_i)(T_0-T)\right]dm = m_{sc}C_{sc}dT + mC_w dT + (m_0-m)C_i dT \qquad (1)$$

где m_{sc} –масса скелета грунта; m – масса незамерзшей воды при температуре T; m_0 – общая масса воды; C_{sc}, C_w и C_i – теплоемкости скелета грунта, воды и льда соответственно; L – теплота кристаллизации воды при температуре T_0.

Интегрирование уравнения (1) от температуры переохлаждения T_{sc}, при которой вся вода находится в жидком состоянии, до температуры начала равновесной кристаллизации T_{cr} дает

$$\frac{m_{sc}C_{sc}+m_0C_i+m_1(C_w-C_i)}{m_{sc}C_{sc}+m_0C_w} = \frac{L-(C_w-C_i)(T_0-T_{sc})}{L-(C_w-C_i)(T_0-T_{cr})}$$

где m_1 – масса незамерзшей воды при температуре T_{cr}.

Отсюда, учитывая, что общая влажность w_0 и влажность w_{uf}, определяемая водой, остающейся в талом состоянии при температуре T_{cr}, равны

$$W_0 = \frac{m_0}{m_{sc}} \qquad W_{uf} = \frac{m_1}{m_{sc}}$$

получим формулу для расчета содержания незамерзшей воды при температуре

$$W_{uf}(T_{cr}) = \frac{1}{C_w-C_i}\left[(C_{sc}+W_0C_w)\frac{L-(C_w-C_i)(T_0-T_{sc})}{L-(C_w-C_i)(T_0-T_{cr})} - C_{sc}-W_0C_i\right] \qquad (2)$$

Для расчета содержания незамерзшей воды по формуле (2) необходимо в ходе эксперимента измерить температуру переохлаждения , температуру начала равновесной кристаллизации воды и влажность .

Таким образом, предлагаемый метод позволяет определить содержание незамерзшей воды и льдистость в грунтах и строительных материалах при отрицательных температурах. Применение метода позволяет, по сравнению с калориметрическим методом и методом непрерывного нагрева, повысить точность определения фазового состава воды в дисперсных средах вблизи температуры начала замерзания.

Аппаратура

Установка состоит из термокамеры, позволяющей задавать и поддерживать отрицательную температуру, измерительной ячейки с образцом, термодатчиков и компьютерно-измерительной системы «Аксамит-6.25».

При разработке методики проведения измерений сформулированы требования к измерительной ячейке: сохранение влажности в течение нескольких циклов замораживания-оттаивания и восстановление однородной текстуры образца после каждого цикла замораживания-оттаивания. Исходя из этих требований апробировано несколько вариантов конструкции измерительной ячейки. В результате проведения контрольных экспериментов выбран вариант измерительной ячейки из полимерной пленки с одним термодатчиком в центре образца.

Образец грунта замораживался в ячейке в термокамере МК-53 фирмы «Binder», которая позволяет с большой точностью задавать температуру до -50°С. При проведении экспериментальных исследований непрерывно измерялась температура образца. Измерение температуры и сохранение данных проводились в автоматическом режиме с использованием компьютерной измерительной системы «Аксамит 6-25» и персонального компьютера.

Нужно отметить простоту экспериментальной установки, реализующей предлагаемый метод. В ходе эксперимента измеряются только температура и влажность образца, что осуществляется современными средствами измерения достаточно просто и с высокой точностью.

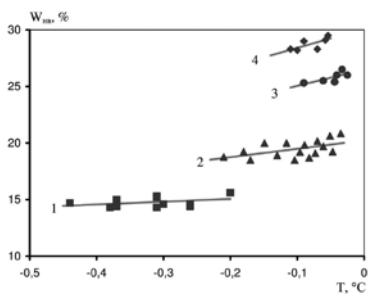


Рисунок 2 - Температурная зависимость содержания незамерзшей воды в суглинке с общей влажностью: 1 – 16,3%; 2– 21,1%; 3 – 27,2%; 4 – 30,1%

Результаты и обсуждение

Проведены исследования содержания незамерзшей воды в суглинке с влажностью: 16,3; 21,1; 27,2; и 30,1%. Получены экспериментальные данные по температурной зависимости незамерзшей воды в суглинке вблизи температуры начала замерзания в зависимости от влажности (рис. 2).

Полученные экспериментальные данные сопоставлены с результатами исследования фазового состава воды в горных породах методом непрерывного ввода тепла. На рис. 3 приведены результаты исследования содержания незамерзшей воды в суглинке обоими методами. Видно, что совместное использование данных методов позволяет получить данные в широком интервале температуры включая область вблизи 0°С.

Несмотря на большое количество исследований фазового состава воды в разных горных породах и дисперсных материалах,

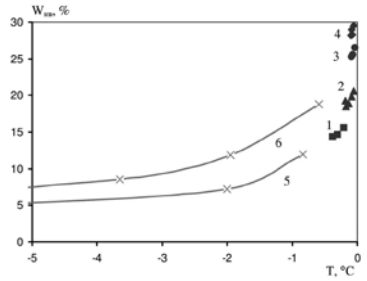


Рисунок 3 - Температурная зависимость содержания незамерзшей воды в суглинке с общей влажностью: 1 – 16,3%; 2 – 20,6%; 3 – 27,2%; 4 – 30,1%. Сплошные кривые – содержание незамерзшей воды в суглинке полученные методом непрерывного нагрева. Общая влажность: 5 – 17,0%; 6 – 20,6%

нет единой точки зрения в вопросе о влиянии общего влагосодержания в них на содержание незамерзшей воды. В ранних исследованиях преобладало мнение, что содержание незамерзшей воды в грунтах и дисперсных материалах не зависит от общего влагосодержания или, если даже и существует такая зависимость, то она является незначительной, и ею можно пренебречь [2, 4, 5, 11 – 13, 22, 27].

Данное положение до сих пор является довольно распространенным [10, 25] и закладывается в основу как экспериментальных методов исследования [9, 10], так и математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в дисперсных средах при отрицательных температурах [3, 15, 21].

Противоположная точка зрения, что содержание незамерзшей воды ощутимо зависит от общего влагосодержания, также имеет место быть и подтверждается большим количеством исследований [10, 16, 20 29]. Особенно это касается исследований с использованием метода ЯМР [1, 30].

Результаты измерений подтверждают, что зависимость содержания незамерзшей воды от общей влажности четко проявляется и в интервале температуры, в которой проводятся эксперименты данным методом (рис. 2).

Следует указать, что использование таких методов определения содержания незамерзшей воды как контактный, криоскопический, адсорбционно-гигроскопический [9, 10] не может выявить эту зависимость. Эти методы, на самом деле, устанавливают зависимость температуры начала замерзания от общего влагосодержания и основаны на предположении идентичности данной зависимости с кривой содержания незамерзшей воды. Методы, основанные на улавливании температуры появления или исчезновения льда [28], также не могут быть использованы для исследования зависимости содержания незамерзшей воды от общей влажности.

В отличие от них предлагаемый метод позволяет исследовать зависимость содержания незамерзшей воды от общей влажности. Это подтверждают и результаты настоящих исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 09-05-98504)

Список литературы

1. Ананян А.А., Волкова Е.А., Голованова Г.Ф. Некоторые результаты исследования фазового состава воды в мерзлых тонкодисперсных горных породах методом ЯМР // Инженерное мерзлотоведение. – Новосибирск, Наука, 1979. – С. 128-133.

2. Бакулин Ф.Г. Льдистость и осадки при оттаивании многолетнемерзлых четвертичных отложений Воркутинского района. – Изд-во АН СССР, 1958. – 96 с.

3. Бровка Г.П. Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании. – Минск, Наука и техника, 1991. – 192 с.

4. Вотяков И.Н. Связь между содержанием незамерзшей воды в мерзлых грунтах и гигроскопической влажностью грунта // Изв. Сиб. отд. АН СССР. – 1960, № 3. – С. 16-23.

5. Гаврильев Р.И. Определение температурной зависимости удельной эффективной теплоемкости промерзающих и протаивающих грунтов и количества незамерзшей воды в них по одному опыту // Методы определения тепловых свойств горных пород. – М.: Наука, 1970. – С. 16-24.

6. Гречищев С. Е., Павлов Арк. В., Шешин Ю. Б., Гречищева О. В. Экспериментальные закономерности формирования переохлаждения поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 4. – С. 41-44.

7. Гречищев С. Е., Павлов Арк. В., Гречищева О. В. Закономерности формирования переохлаждения поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов // Материалы Третьей конференции геокриологов России. Т. 1. – М.: Изд. МГУ, 2005. – С. 38-45.

8. Гречищев С.Е., Павлов Арк.В., Гречищева О.В. Закономерности предкристаллизационного переохлаждения поровой влаги дисперсных грунтов в градиентном поле температур // Криосфера Земли, 2006, т. 10, №4. – С. 56-58.

9. Гречищев С.Е., Чистотинив Л.В., Шур Ю.Л. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов. – М.: Наука, 1984. – 232 с.

10. Ершов Э.Д., Акимов Ю.П., Чеверов В.Г. и др. Фазовый состав влаги в мерзлых породах. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 190 с.

11. Иванов Н.С. Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах. – М.: Наука, 1969. – 240 с.

12. Лиштван И. И., Бровка Г.П., Давидовский П.Н. Исследование фазового состава воды в торфе при низких температурах // Коллоидный журн., 1979, т. 41, N 6. –С. 1095-1099.

13. Нерсесова З.А., Цытович Н.А. Незамерзшая вода в мерзлых грунтах // Доклады на междунар. конф. по мерзлотоведению. Секция 4. Фазовые равновесия и превращения. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 62-70.

14. Павлов Арк.В. Лабораторные исследования объемной кристаллизации поровой влаги в зоне приповерхностного охлаждения дисперсных пород // Материалы Третьей конференции геокриологов России, т. 1. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – С. 83-86.

15. Пермяков П.П. Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах. – Новосибирск, Наука, 1989. – 88 с.

16. Старостин Е.Г., Тимофеев А.М. Зависимость количества незамерзшей воды от общего влагосодержания // Исследования по теплофизическим проблемам Севера: Сборник научных трудов конференции, посвященной памяти Н.С. Иванова. – Якутск, 1999. – С. 88-96.

17. Старостин Е.Г. Определение количества незамерзшей воды по кинетике кристаллизации // Криосфера Земли, 2008, № 2. – С. 60-64.

18. Старостин Е.Г. Патент на изобретение № 2339024 «Способ определения фазового состава воды в дисперсных средах при отрицательных температурах». – Заявка 2007101011/28 (001058) от 09.01.2007.

19. Степанов А.В., Тимофеев А.М. Теплофизические свойства дисперсных материалов. – Якутск, Якутский научный центр СО РАН, 1994. – 124 с.

20. Тимофеев А.М., Старостин Е.Г. Экспериментальное определение теплоты кристаллизации связанной воды // Изв. ВУЗов. Приборостроение, 2003, т. 46, № 3. – С. 62-68.

21. Фельдман Г. М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах.– Новосибирск, Наука, 1988. – 258 с.

22. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.

23. Chevalier D., Le Bail A., Ghoul M. Freezing and ice crystals formed in a cylindrical food model: part II. Comparison between freezing at atmospheric pressure and pressure-shift freezing // Journal of Food Engineering, 2000, vol. 46. – P. 287-293.

24. Fen-Chong T., Fabbri A. Freezing and thawing porous media: experimental study with a dielectric capacitive method // Comptes Rendus Mecanique, 2005, vol. 333. – P. 425-430.

25. Fukuda M., Kim H. S., Kim Y. Ch. Preliminary result of frost heave experiments using standart test sample provided by TC8 // Ground Freezing 97. – Rotterdam, Balkema, 1997. – P. 25-30.

26. Fuller M.P., Wisniewski M. The use of infrared thermal imaging in the study of ice nucleation and freezing plants // J. Therm. Biol., 1998, vol. 23, No. 2. – P. 81-89.

27. Hoekstra P. Moisture Movement in Soils under Temperature Gradients with the Cold - Side Temperature below Freezing // Water Resources Research, 1966, v. 2, No 2. – P. 241-250.

28. Mironov V.L., Lukin Yu.I. A physical model of dielectric spectra of thawed and frozen bentonitic clay within the frequency range from 1 to 15 GHs // Russian Physics Journal, 2011, Vol. 3, No 9. – P. 956-961.

29. Starostin E. G., Timofeev A. M. Dependence of unfrozen water quantity on total moisture content // Ground Freezing 97. – Rotterdam, Balkema, 1997. – P. 161-164.

30. Tice A. R., Burrous C. M., Anderson D. M. Determination of unfrozen water in frozen soil by pulsed Nuclear magnetic Resonance // Proc. 3rd Int. Conf. Permafrost. Edmonton, vol. 1. – Ottawa, 1978. – P. 149-155.

31. Watanabe K. Relationship between growth rate and supercooling in the formation of ice lenses in a glass powder // Journal of Crystal Growth, 2002, vol. 237–239. – P. 2194–2198.

КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА И МОДУЛЬ УПРУГОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И ГРУНТОВ

М.М. Иудин

ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова», г.Якутск,
e-mail: mmi_52@mail.ru

Предложена модель расчета обобщенного коэффициента Пуассона мерзлых горных пород и грунтов в зависимости от взаимодействия двух систем напряженного поля, определяемые соотношением коэффициентов Пуассона минерального скелета и льда. Влияние ползучести мерзлых пород и грунтов учитываются методом переменных модулей. Предложена геомеханическая модель оценки модуля упругости горных пород и грунтов в мерзлом и талом состоянии, которые определяются структурным состоянием породного массива.

Массив многолетнемерзлых горных пород и грунтов представляет собой твердое тело, состоящее из минеральных частиц и кристаллов льда, сцементированных в многофазную систему. Массив находится в естественном температурном режиме, состояние которого определяется соотношением различных фаз (незамерзшая вода, газообразные вещества в порах, льдистость горных пород). Механическое поведение мерзлых пород и грунтов в значительной мере определяется развитием термодинамических, тепломассообменных, химических, физико-химических процессов в жидкой, газообразной и твердой фазе.

Многолетнемерзлый массив горных пород и грунтов обладает существенным элементом в своей структуре: наличие льда в порах и трещинах, который в значительной степени определяет физико-механические свойства горных пород. Коэффициент Пуассона горной породы в мерзлом состоянии будет определяться свойствами следующих компонентов: минеральный скелет горной породы и лед, находящийся в порах и трещинах.

Как считают авторы [1], коэффициент Пуассона равный 0,4 для льда является наиболее подходящей величиной. В составе мерзлых горных пород коэффициент Пуассона льда может принимать значения 0,3 – 0,4 [2]. Таким образом, можно констатировать, что лед в порах и трещинах горной породы имеет коэффициент Пуассона близкий к величине 0,4, которую можно принять в расчетах по оценке протекания термомеханических процессов в породном массиве. Коэффициент Пуассона горных пород имеет широкий диапазон значений от 0,1 до 0,5.

Поэтому, средневзвешенный коэффициент Пуассона для многолетнемерзлого породного массива будет определяться соотношением коэффициентов Пуассона горной породы и льда:

$$\nu_{пм} = f(\nu_{гп}, \nu_{л})$$

где ν – коэффициент Пуассона, индексы означают: «пм» – породный массив; «гп» – горная порода; «л» – лед.

Вид функции коэффициента Пуассона породного массива описывается сложной зависимостью и определяется многими факторами, в частности от характера деформирования элементов породного массива.

В качестве практической функции примем зависимость А.И. Мороза [3], в которой теоретически обоснован вид зависимости для определения обобщенного коэффициента Пуассона среды от двух систем напряжений.

В многолетнемерзлом породном массиве две системы напряжений могут образовываться независимо в процессе деформирования минерального скелета породы и льда, обладающих разными исходными коэффициентами Пуассона.

В модифицированном виде обобщенный коэффициент Пуассона для многолетнемерзлого породного массива можно представить следующим образом:

$$\nu_{пм} = \frac{k\alpha_{гп} - \alpha_{л}}{k(1+\alpha_{гп}) - 1 - \alpha_{л}} \quad \alpha_{гп} = \frac{\nu_{гп}}{1-\nu_{гп}}, \quad \alpha_{л} = \frac{\nu_{л}}{1-\nu_{л}} \qquad (1)$$

где k – коэффициент, определяемый соотношением от взаимодействия двух систем напряжений.

Выполним расчеты по формуле (1) для разных соотношений коэффициентов Пуассона минерального скелета и льда, причем коэффициенты имеют значения характерные для деформирования породного массива кимберлитовых месторождений (табл. 1).

Таблица 1 - Обобщенный коэффициент Пуассона в мерзлом породном массиве

Коэффициент Пуассона составляющих массива	Коэффициент k				
	0	-1	-5	-50	-500
$\nu_{гп}$=0,2; $\nu_{л}$ =0,4	0,4	0,315	0,242	0,205	0,2
$\nu_{гп}$=0,3; $\nu_{л}$ =0,4	0,4	0,355	0,321	0,303	0,3
$\nu_{гп}$=0,45; $\nu_{л}$ =0,4	0,4	0,426	0,443	0,449	0,45

Результаты расчетов показывают, что значение обобщенного коэффициента Пу-

ассона зависит от соотношения напряженного состояния двух систем, формирующего в мерзлом породном массиве. Этот вывод подтверждается теоретическими результатами исследований А.И. Мороза [3].

Как отмечает И.В. Баклашов и Б.А. Картозия [4], упругие перемещения пород происходят практически мгновенно со скоростью распространения упругих волн в массиве. По причине малости упругих перемещений основная доля конечных перемещений породного массива приходится на неупругие, которые обычно развиваются со временем.

Существует несколько способов расчета ползучести горных пород в геомеханике и механике грунтов. В зависимости от вида решаемой механической задачи используются теории ползучести, уравнения которой позволяют выразить связь между напряжением, деформацией, ее скоростью и временем в явном виде: теория наследственной ползучести, теории старения, упрочнения и течения, а также кинетическая теория ползучести. Смещения породного массива возрастают из-за увеличения объема пород при растрескивании в результате ползучести. При этом может произойти отделение от массива некоторых объемов пород и возникновение нового породного контура. Тогда общее смещение определяется суммированием смещений за счет увеличения объема разрушенных пород и ползучести породного массива.

Другим способом учета свойств ползучести пород и грунтов является применение метода переменных модулей из теории линейной вязкоупругости. Суть метода заключается в следующем: сначала решается упругая задача по определению напряжений и деформаций в соответствующей постановке, затем вместо упругих параметров среды подставляются интегральные временные операторы, которые позволяют учитывать свойства ползучести пород, и далее получается решение, которую можно считать решением упруго-вязкой модели.

Временной аналог коэффициента Пуассона имеет следующий вид, выраженный через функцию ползучести Ф [4]:

$$\nu(\tau) = 0{,}5 - \frac{0{,}5 - \nu}{1 + \Phi}, \qquad \Phi = \frac{\delta \tau^{1-\alpha}}{1 - \alpha}$$

где τ – время, α, δ – характеристики ползучести пород.

Таким образом, чтобы адекватно определить влияние свойств пород на характер деформирования мерзлых горных пород достаточно применить метод переменных модулей теории линейной вязкоупругости к уже полученному решению задачи соответствующей упругой модели деформирования породного массива вокруг выработки.

Лед в отличие от минерального скелета горной породы под действием длительной нагрузки чаще проявляет ползучесть при деформировании. Горная порода в зависимости от составляющих его минералов тоже может проявлять свойства ползучести. Поэтому, в мерзлом породном массиве проявление ползучести может быть, как со стороны льда, так и со стороны горной породы.

Тогда, коэффициенты в формуле (1) найдем в следующем виде:

$$\alpha_{гп}(\tau) = \frac{0{,}5(1+\Phi) - 0{,}5 + \nu_{гп}}{0{,}5(1+\Phi) + 0{,}5 - \nu_{гп}} \qquad \alpha_{л}(\tau) = \frac{0{,}5(1+\Phi) - 0{,}1}{0{,}5(1+\Phi) + 0{,}1} \qquad (2)$$

Параметры, входящие в функцию ползучести, имеют достаточно широкий статистический разброс по данным экспериментальных исследований, что подчеркивает необходимость выполнения аналитической оценки влияния ползучести.

При анализе коэффициента Пуассона в мерзлом состоянии возможны два варианта проявлений ползучести. В первом варианте свойства ползучести в мерзлом породном массиве могут проявлять только один элемент – лед. Во втором варианте свойства ползучести проявляют оба элемента породного массива – минеральный элемент горной породы и лед.

Обобщенный коэффициент Пуассона для мерзлых горных пород и грунтов с учетом ползучести минерального скелета и льда имеет сложную зависимость, требует анализа распределения и соотношения льдистости в массиве.

Модуль упругости мерзлых пород с учетом ползучести всех элементов, так как выделить влияние каждого отдельного элемента не представляется возможным, найдем в виде:

$$E_M(\tau) = \frac{E_M}{1 + \Phi}$$

где Ем – модуль упругости породы, определяемой в лабораторных условиях при естественной температуре породного массива; Ем(τ) – изменение модуля упругости в процессе длительного деформирования породы.

Если в выработке поддерживается положительный тепловой режим воздуха, то по мере оттаивания мерзлого массива горные породы значительно снижают свою устойчивость, а иногда переходят в разрушенное состояние. Поэтому, в зоне протаивания горные породы в случае их разрушения представляются несвязной, сыпучей средой. Такой подход действительно характерен для описания механического состояния дисперсных, сильнотрещиноватых горных пород. Мерзлые коренные, осадочные породы при оттаивании хотя и имеют меньшую прочность, чем в мерзлом состоянии, но сохраняют свою связность, а устойчивость породного обнажения будет зависеть от текстурного, структурного строения и трещиноватости пород приконтурного слоя массива. Поэтому, оцен-

ку влияния трещиноватости мерзлых горных пород целесообразно производить, когда мерзлые породы перейдут в талое состояние вокруг горной выработки. Лед, как цементирующий элемент, потеряет свое свойство, и трещины в зоне протаивания будут определять упругие свойства горных пород в талом состоянии. Трещиноватость горных пород образуется в результате длительного воздействия геомеханических, тектонических и физико-механических процессов, действовавших и происходящих в породном массиве и земной коры. Трещиноватость является определяющей структурно-механической особенностью породного массива. Трещины наблюдаются в породах любого происхождения (осадочных, магматических и метаморфических) и по генетическому признаку подразделяются на естественные (природные) и искусственные (техногенные) трещины.

Руппенейт К.В. [5] предлагает реальный породный трещиноватый массив заменить эквивалентным по деформируемости сплошным твердым телом. Это позволит применить основные дифференциальные уравнения теории упругости к эквивалентному массиву горных пород и оценивать уровень напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки. Эквивалентный массив горных пород наделяется приведенным модулем деформации. Значение модуля деформации подбирается таким образом, чтобы перемещение на контакте поверхности породного массива и подземного сооружения было бы одинаковым для реального и эквивалентного массива.

Приведенный модуль деформации для одной системы макротрещин определяется по формуле [5]:

$$E_T = \frac{E_O}{1+\eta}, \quad \eta = \frac{\delta}{h\zeta} \tag{3}$$

где $E_т$ – модуль деформации горных пород в трещиноватом массиве; E_0 – модуль упругости породы в монолитном состоянии; h – расстояние между трещинами; δ – ширина раскрытия трещины; ζ – относительная площадь фактического касания шероховатых поверхностей трещины, практически равняется 0,0003.

Величина 1/h при анализе трещиноватости породного массива имеет смысл модуля трещиноватости или интенсивности трещиноватости или густоты трещин [5, 6]. Тогда, после преобразований формулы (3) целесообразно привести к следующему виду:

$$E_T = \frac{E_O}{1+\psi \cdot M_T} \tag{4}$$

где ψ – определяется соотношением δ/ζ; $M_т$ – модуль трещиноватости горной породы.

Снижение модуля упругости горных пород в зоне трещиноватости породного массива можно оценить по формуле [6]:

$$E_T = \frac{E_O}{1+0{,}5M_T} \tag{5}$$

Если сравнить формулы (4 и 5), то в принципе формула (5) имеет ограниченное применение, т.к. коэффициент ψ определен только для фиксированного случая, который сконцентрирован в величине 0,5. В то время как формула (4) имеет широкое применение, т.к. коэффициент ψ определяется экспериментальным путем и его можно оценивать для конкретного месторождения.

Из формулы (4) следует выделить коэффициент, который имеет смысл такой же, как коэффициент структурного ослабления горных пород в массиве:

$$k = \frac{1}{1+\psi \cdot M_T} \tag{6}$$

Рассчитаем значения коэффициента k для разных соотношений δ/ζ, которые приведены в таблице 2.

Анализ результатов расчета показывает, что чем меньше соотношение δ/ζ, тем меньше влияние трещиноватости на снижение модуля упругости горных пород в массиве. В целом соотношение δ/ζ оценивает полноту контактов шероховатых поверхностей в трещине: чем меньше это соотношение, тем больше площадь контакта поверхностей в трещине. Чем больше показатель модуля трещиноватости горных пород, тем сильнее влияние трещиноватости на модуль упругости. Этот вывод в целом не противоречит современному представлению механизма развития геомеханических процессов в породном массиве вокруг горной выработки.

Таблица 2 - Значения коэффициента k

Показатель модуля трещиноватости M_T	Отношение δ/ζ				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	0,91	0.83	0,77	0,72	0.67
2	0,83	0,72	0,63	0,56	0,33
6	0,63	0,45	0,36	0,29	0,14
7	0,59	0,42	0,32	0,26	0,13
10	0,50	0,33	0,25	0,20	0,09
11	0,48	0,31	0,23	0,18	0,08
20	0,33	0,20	0,14	0,11	0,05

Таким образом, существующие системы трещиноватости горных пород неодинаково влияют на геомеханические процессы, происходящие в породном массиве вокруг горных выработок. Это влияние можно оценить через снижение упругих свойств горных пород в зоне трещиноватости пород-

ного массива.

При проявлении ползучести горных пород в зоне протаивания мерзлого породного массива модуль деформации по формуле (4) изменяется следующим образом:

Коэффициент Пуассона горных пород в массиве формируется или «интегрируется» в величину, которую можно назвать обобщенным коэффициентом Пуассона породного массива в пределах области решаемой геомеханической задачи, и определяется многими факторами.

Существенное значение на обобщенный коэффициент Пуассона имеет принимаемая геомеханическая модель массива горных пород, в которой коэффициент Пуассона должен адекватно описывать процесс деформирования горных пород в окрестности выработки и, особенно, характер перемещения породного контура выработки. Упругая модель деформирования породного массива предполагает зависимость обобщенного коэффициента Пуассона от структурных особенностей горных пород (блочность, слоистость, трещиноватость). Реологическая модель предполагает зависимость коэффициента Пуассона от проявлений ползучести пород в массиве. Горная порода редко деформируется по одной геомеханической модели, как правило, целесообразно применять комбинированные модели деформирования. Тогда, обобщенный коэффициент Пуассона будет определяться интегрированной суммой составляющих коэффициента от разных влияющих факторов. Геомеханическую модель формирование коэффициента Пуассона в зоне протаивания мерзлого породного массива вокруг выработки можно построить следующим образом. В зоне протаивания мерзлых пород вокруг выработки исчезает лед-цемент в трещинах и порах, и появляются в ней дополнительные трещины и микротрещины в окрестности породного обнажения. Это вызывает изменение коэффициента Пуассона мерзлых пород в зоне протаивания. Минеральный скелет горной породы в диапазоне положительных температур может проявлять свойства ползучести, т.к. с температурой изменяются механические свойства минералов, составляющих горную породу. Поэтому коэффициент Пуассона горной породы претерпевает изменения в зоне протаивания вокруг выработки, обусловленные трещиноватостью и ползучестью.

В зоне протаивания мерзлых пород коэффициент Пуассона будет определяться по формуле:

$$\nu_T(\tau) = 0{,}5 - \frac{0{,}5 - \nu_T}{1 + \Phi},$$

где $V_т$ – коэффициент Пуассона горной породы в талом состоянии, определяемой в лабораторных условиях.

Таким образом, обоснована и предложена геомеханическая модель оценки коэффициента Пуассона и модуля упругости горных пород и грунтов в мерзлом и талом состоянии, которые формируются и определяются структурным состоянием породного массива. Это позволит вести расчет напряженно-деформированного состояния мерзлого породного массива с учетом перераспределения механических свойств горных пород в зависимости от изменения температурного режима.

Список литературы

1. Эмери Дж., Мирза Ф. Моделирование методом конечных элементов течения больших масс льда // Физика и механика льда: пер. с англ. / под ред. П. Трюде. – М.: Мир, 1983. – С.82-94.

2. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

3. Мороз А.И. К вопросу об определении коэффициента Пуассона осадочной горной породы // ФТПРПИ. – 2006. – №4. – С.59-68.

4. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механические процессы в породных массивах. – М.: Недра, 1986. – 272 с.

5. Руппенейт К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1975. – 223 с.

6. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок / И.А. Турчанинов, Г.А. Марков, В.И. Иванов, А.А. Козырев и др. – Л.: Наука, 1978. – 256 с.

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ НАСЫПИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА УЧАСТКЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОРОД ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА

С.П. Варламов, П.Н.Скрябин

Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН, г.Якутск, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

Строящаяся железнодорожная линия Томмот-Кердем на 692-734 км пересекает участок распространения пород ледового комплекса. Освещены особенности организации наблюдательной сети инженерно-геокриологического мониторинга, включающего наблюдения за динамикой просадки, температуры и глубины протаивания грунтов, начиная со времени вырубки просеки трассы и отсыпки насыпи. Результаты исследований показали, что это наиболее сложный для строительства и эксплуатации железной дороги участок, который запроектирован по I принципу. На просеке трассы глубина сезонного протаивания продолжает увеличиваться, а температура верхних горизонтов мерзлых пород повышаться. На насыпи, отсыпанной в холодный период, установлено поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород, при этом, чем выше высота насыпи, тем интенсивнее скорость ее поднятия. При отсыпке насыпи в теплый период с удалением сезонноталого слоя в её основания отмечено формирование чаши протаивания. Геокриологические обследования выявили участки фильтрации надмерзлотных вод сезонноталого слоя через песчаную насыпь и угрожающие её устойчивости. Предложены мероприятия обеспечивающие устойчивость земляного полотна. Оценка изменений теплового состояния насыпей и прилегающей к ней территории успешно может быть решена на основе геокриологического мониторинга.

Введение

Железнодорожная линия Томмот-Кердем на 692-734 км пересекает участок распространения пород ледового комплекса, где льдистость достигает 0,7-0,8 дол. ед. Институт мерзлотоведения СО РАН с 2005 года проводит на этом участке экспериментальные исследования за тепловым состоянием грунтов основания насыпи и прилегающей к трассе территории. Это наиболее сложный для строительства и эксплуатации железной дороги участок. По П.А.Соловьеву [1] ледовый комплекс представляет особый горизонт, насыщенный жилами льда, более или менее единый и плащевидно залегающий на обширных участках, неоднородный по возрасту, составу, генезису и мощности.

Проблемы «ледового комплекса» рассматривались на научно-техническом совете и семинаре-совещании, проведенных в г.Якутске [2 и 3]. По итогам обсуждений ОАО «Проекттрансстрой» принял решение организовать систему инженерно-геокриологического мониторинга на стадии строительства и эксплуатации железной дороги на этом участке. После начальных 2-3 лет эксплуатации железной дороги предусматривается проектирование дополнительных мероприятий, обеспечивающих устойчивость земляного полотна.

Результаты исследований на экспериментальном полигоне

В 2005 г. были организованы исследования на экспериментальном полигоне на участке развития ледового комплекса, где льдистые грунты и повторно-жильные льды залегают на глубинах всего 0,6-1,2 и 1,8-2,3 м соответственно от поверхности. По льдистости и просадочности они относятся к IV и V категориям типа грунтов. В центральной части полигона были удалены лесорастительный и напочвенный покровы. Периферийный участок полигона с удаленным древостоем представлял аналог просеки (рис. 1).

Просадка грунтов на поверхности с удалением напочвенного (мощность 0,1-0,2 м) и лесорастительного покровов в 2010-2011 г.г. составила в среднем 29 см. На поверхности с удалением древостоя, начиная с 2008 г. просадка стабилизировалась на уровне 15 см (рис. 2).

Величина чаши оттаивания в грунтах на участке с удаленными напочвенным и лесорастительным покровами в четвертом году достигла своего максимума (рис. 3а). По сравнению с мощностью сезонноталого слоя в лесу она увеличилась в среднем в 2,8 раза. Процесс стабилизации многолетнего протаивания пород ледового комплекса обусловлен интенсивным произрастанием травяного покрова (см. рис. 1). На участке с удалением древостоя глубина оттаивания грунтов незначительная и на 3-ий год составила 1,60 м. Далее отмечается тенденция к уменьшению мощности сезонноталого слоя. В 2009 г. температура грунтов на участке с



Сентябрь 2005 Август 2009

Рисунок 1 - Общий вид экспериментального полигона.

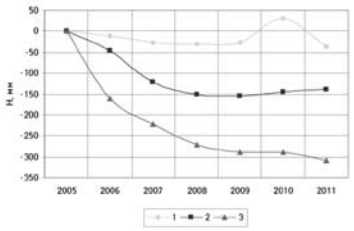


Рисунок 2 - Деформация поверхности экспериментальной площадки в районе ПК 6940: 1 – естественная поверхность; 2 – поверхность с удалением лесорастительного покрова; 3 – поверхность с удалением напочвенного и лесорастительного покровов.

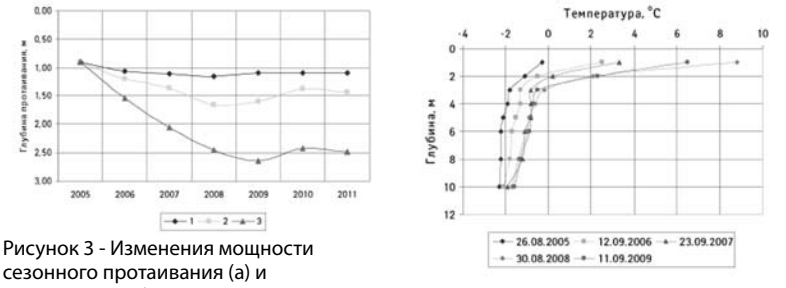


Рисунок 3 - Изменения мощности сезонного протаивания (а) и температуры (б) грунтов на экспериментальном полигоне. 1 - поверхность с естественной растительностью; 2 – поверхность с удалением лесорастительного покрова (вырубка); 3 – поверхность с удаленным напочвенным и лесорастительным покровами.

удаленным напочвенным и лесорастительным покровами в конце теплого периода на глубинах 4, 6 и 10 м по сравнению с 2005 г. соответственно повысилась на 1,2, 1,3 и 0,7 оС. Заметное повышение температуры грунтов происходило в сезоннопротаивающем слое (рис. 3б). В теплые и многоснежные зимние периоды последних четырех лет промерзающий слой не смыкался с многолетнемерзлыми грунтами.

Организация наблюдательной сети инженерно-геокриологического мониторинга и особенности строительства земляного полотна

Для проведения инженерно-геокриологического мониторинга в системе железнодорожное полотно – окружающая среда в 2007-2010 г.г. были оборудованы 7 поперечных профилей в районе пикетов: 6926, 6932, 6934, 7087, 7088, 7089, 7179. Бурение скважин и их оборудование для режимных температурных наблюдений под основания земляного полотна были проведены после вырубки просек трассы и до начала их отсыпки (рис. 4), в районе ПК 7179 - после возведения нулевой насыпи, а на окружающей территории (просека, лес) во время возведения насыпи. Всего пробурена и оборудована 41 скважина. После укладки шпалорельсов на земляное полотно были установлены стационарные марки для наблюдения за деформацией его поверхности. В таблице 1 приведены сроки начала-окончания вырубки просек трассы, отсыпки земляного полотна и укладки шпалорельсов. Следует отметить, что процессы отсыпки насыпи были произведены круглогодично (рис. 5).

В январе-феврале 2009 г. на поперечнике ПК 6932 была начата отсыпка насыпи с укладкой на глубине 1,0-1,5 м теплоизоляционного материала из пенополистирола толщиной 5 см. Высота насыпи составляла 1,0-1,5 м. На поперечнике ПК 6934 отсыпка насыпи высотой 1-4 м произведена в марте-апреле, а на поперечнике ПК 6926 в конце холодного периода. В конце летнего периода 2009 г. на поперечнике ПК 7088 была частично отсыпана насыпь высотой до 1 м, а на поперечнике ПК 7087 была начата выемка грунта сезонно-талого слоя с последующей заменой его скальными грунтами. На участке поперечника ПК 7179 отсыпка насыпи в 2009 г. была произведена в летний период с заменой грунта сезонноталого слоя скальными грунтами.

В итоге в августе-сентябре 2010 г. на поперечниках ПК 6926 и 6934 строителями сооружены из скального грунта насыпи высотой 7 м, в первом на бермах с установкой сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ) до глубины 4 м. На поперечнике ПК 6932 выполнена отсыпка насыпи высотой до 2,5 м. Здесь на бермах установлены СОУ, в телах бермы и насыпи уложены теплоизоляционные материалы из пенополистирола. На поперечнике ПК 7087 отсыпана насыпь высотой 2,5 м с субвертикальными охлаждающими откосами из скального грунта. На поперечнике ПК 7088 на



Рисунок 4 - Бурение термометрических скважин и укладка полипропиленовых труб для отвода косы термогирлянд из зоны влияния железнодорожных насыпей в районе ПК 6934 (август 2007 г.).

Таблица. Сроки начала-окончания вырубки просек трассы, отсыпки земляного полотна и укладки шпалорельсов.

Пикеты	Сроки				
	Вырубка просек трассы		Возведение насыпи		Укладка
	Начало	Окончание	Начало	Окончание	шпалорельсов
6926	-	-	Апрель 2009	Июль 2010	Август 2010
6932	Зима 2006	Весна 2007	Январь-февраль 2009	Июнь 2010	
6934			Март-апрель 2009		
7087	Зима 2008	Весна 2008	Август-сентябрь 2009		Сентябрь 2010
7088			Август 2009		
7089			Сентябрь 2009		
7175	Весна 2007	Весна 2008	Июнь-июль 2009		
7179					
7270	Зима 2008	Весна 2008			



Рисунок 5 - Отсыпка насыпи на выемках трассы в районе 732 км в апреле (а) и 711 км в августе (б) 2009 г.

откосах с консольным навесом высота насыпи составляла 2,5-3,0 метра. На поперечнике ПК 7089 отсыпана насыпь высотой до 2,5 м с укладкой пенополистирола в его основании и установкой СОУ на бермах. На поперечнике ПК 7179 сооружена нулевая насыпь из скального грунта мощностью 2,2 м с заменой грунта сезоннопротаивающего слоя.

Тепловое состояние грунтов оснований сооружаемых насыпей

Результаты экспериментальных наблюдений показали, что на просеке железной дороги глубина сезонного протаивания грунтов на третий год (2009 г.) после вырубки леса увеличилась по сравнению с естественным фоном (лес) в 1,5-1,7 раза, что намного больше, чем на экспериментальном полигоне на этот срок. Это объясняется тем, что просека трассы железной дороги отличается от экспериментального полигона большей открытостью и соответственно наибольшим приходом солнечной радиации. В 2011 г. на просеке отмечено дальнейшее увеличение глубины сезонного протаивания грунтов (1,4-2,2 раза), а также и в лесу (перемычка между просекой железной дороги и притрассовой автодороги). Последнее связано с изменением условий теплообмена поверхности с атмосферой, т.е. уменьшением затененности, т.к. перемычка имеет небольшую ширину. На маревых участках увеличение глубины сезонного протаивания грунтов в естественных условиях в 2011 г., по сравнению с 2007 г. составило 16-22 %, а у основании насыпей – 32-52 %.

На мари (ПК 6926) в зиму 2007/2008 гг. до отсыпки насыпи грунты на глубинах 0,2 и 1,5 м охладились соответственно на 6,6-6,9 и 2,1-3,1 оС. Здесь охлаждающее влияние низкой насыпи, высотой 1,5-2,0 м зимой 2008/2009 гг. заметно понижает температуру грунтов основания насыпи. Так на отметках 0,2 и 1,5 м под насыпью температура грунтов понижается соответственно до -17,2 и -7,9°С (рис. 6). К осени 2009 г. верхняя граница многолетнемерзлых пород оказалась приподнятой под осью трассы на 1,0-1,2 м, а под откосами бермы на 0,5 м. В сентябре 2010 г. температура грунтов под основания насыпи на этих отметках составила соответственно 0,2 и –1,7 оС. К концу теплого периода 2010 г. после возведения 7 метровой насыпи под ним ещё остается маломощный (0,3-0,5 м) талый слой. Этот интенсивный охлаждающий эффект на первый год, по-видимому, объясняется отсыпкой насыпи в зимнее время на мерзлый грунт, а потеря этого эффекта на второй год – отепляющим влиянием тела высокой насыпи на подстилающие грунты в летний период.

На просеке трассы ПК 6932 и 6934 в зиму 2007/2008 гг. понижение температуры грунтов до отсыпки насыпи на глубинах 0,2 и 1,5 м достигла соответственно величины 3,3-4,9; 0,6-2,6 и 3,1-3,8; 0,7-1,3 оС (рис. 7 и 8). Здесь слабая интенсивность накопления холода грунтами, по сравнению с маревым участкам (ПК 6926), объясняется более поздними сроками смыкания фазовых границ, из-за увеличения мощности сезонноталого слоя после вырубки леса. В зиму 2008/2009 гг. после отсыпки насыпи грунты заметно начали аккумулировать холод до глубины 4-5 м. Температура грунтов основания насыпи на отметках 0,2; 1,5 и 3,0 м на этих пикетах понизились соответственно на 14,5-21,6; 4,3-9,7 и 1,4-6,1°С.

В районе ПК 6932 после отсыпки насыпи грунты её основания заметно охладились. К концу летнего периода 2009 г. верхняя граница многолетнемерзлых пород на оси трассы была приподнята на 1 м, а под откосами бермы заметно меньше (0,5 м). В зиму 2009/2010 гг. грунты под основаниями насыпи охладились по-разному. Так, на отметке 0,2 м температура грунтов достигала по оси трассы -6°С, под откосами правой бермы -8,5°С и левой бермы -4,5°С. Это, по-видимому, объясняется накоплением надмерзлотных вод сезонноталого слоя у левой бермы и, соответственно, большей потерей тепла на фазовые переходы. На следующий летний сезон под осью трассы и под откосами берм верхняя граница многолетнемерзлых пород сохранилась на уровне предыдущего сезона. Следует отметить, что под влиянием вышеперечисленного фактора

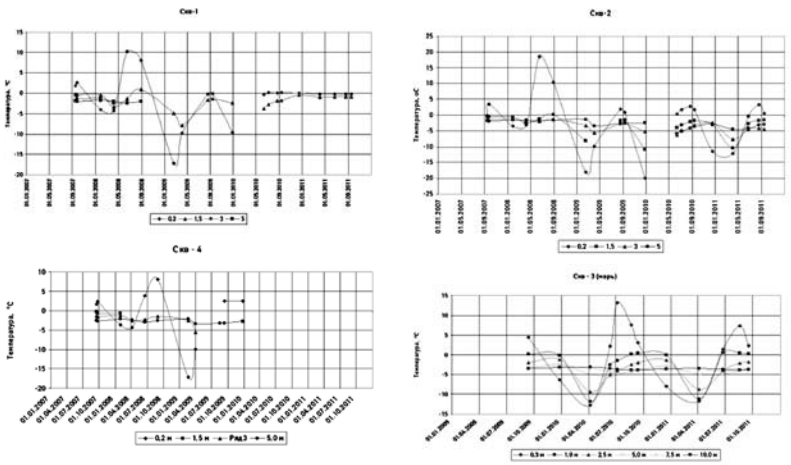


Рисунок 6 - Динамика температуры грунтов основания насыпи в районе пикета 6926 по оси трассы (Скв-1), под правым (Скв-2) и левым (Скв-4) бермами и на мари в естественных условиях (Скв-3).

под откосами левой бермы температура грунтов на отметке 0,2 м имеет тенденцию к повышению, т.е. от 0,7°С (2009 г.) до 1,9°С (2011 г.).

В районе ПК 6934 процесс формирования термического режима грунтов основания насыпи происходит иначе, чем на ПК 6932. Здесь грунты сезонноталого слоя находятся в более переувлажненых условиях, т.к. находятся в отличие последних на более низких гипсометрических отметках с относительно большими уклонами. Под влиянием этих факторов амплитуды колебаний температуры грунтов в холодный и теплый периоды были наибольшими. На оси трассы после отсыпки насыпи высотой 3-4 м грунты её основания в зимний период заметно охладились и к концу летнего периода 2009 г. верхняя граница многолетнемерзлых пород на оси трассы была приподнята более 1 м, под правым нижним откосам насыпи примерно на 1 м, а под левым откосам - меньше 0,5 м. На оси трассы грунты основания насыпи на отметке 0,2 м в первый зимний сезон охладились до -10, а во второй сезон всего до –7°С. Это связано с тем, что грунты тела насыпи уже начали промораживаться снизу, а отсыпка насыпи достигла проектного уровня (7 м), поэтому амплитуда колебания температур уменьшилась. Температура грунтов основания насыпи на этой отметке на правой нижней части откосов насыпи в первый зимний сезон охладилась до – 9°С, а во второй сезон до – 15°С. Здесь наблюдается более интенсивное охлаждение грунтов основания насыпи, чем на оси трассы. Грунты основания насыпи в левой нижней части её откоса, наоборот, в первый зимний сезон сильно охладились до – 13 оС, а во второй заметно меньше (-4,5°С). Это связано с накоплением надмерзлотных вод сезонноталого слоя у основания насыпи и потерей запаса холода на фазовые переходы при промерзании грунтов этого слоя, как и в районе ПК 6932.

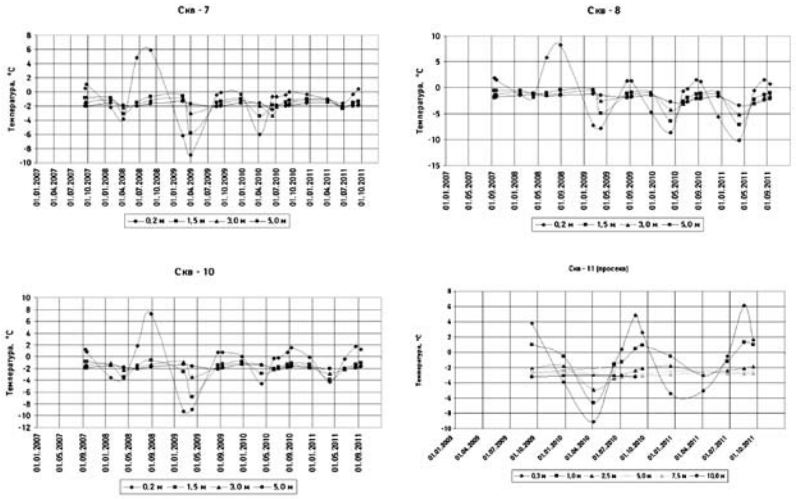


Рисунок 7 - Динамика температуры грунтов основания насыпи в районе пикета 6932 по оси трассы (Скв-7), под правым (Скв-8) и левым (Скв-10) бермами и на просеке (Скв-11).

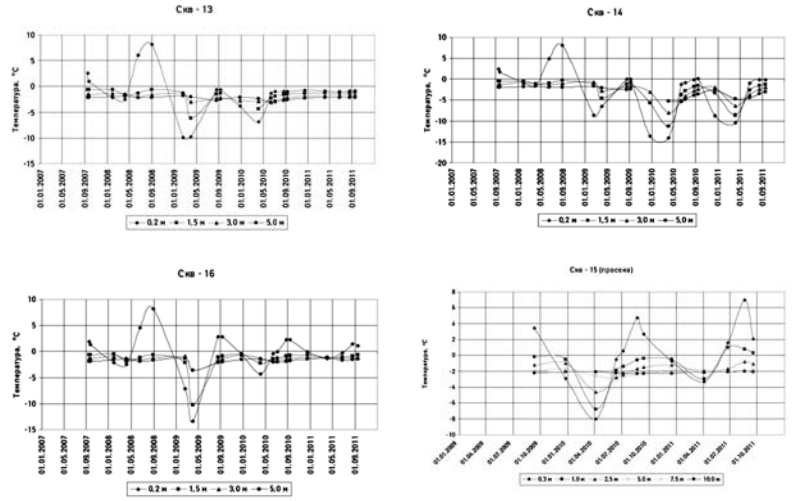


Рисунок 8 - Динамика температуры грунтов основания насыпи в районе пикета 6934 по оси трассы (Скв-13), под правым (Скв-14) и левым (Скв-16) основаниями его откосов и на просеке (Скв-15).

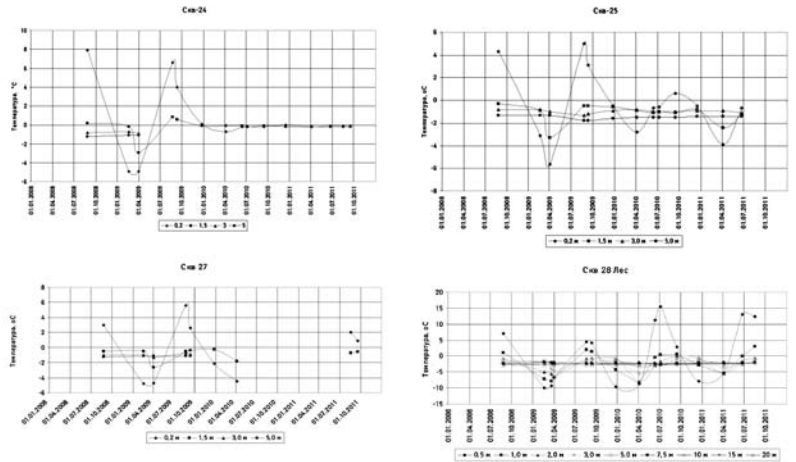


Рисунок 9 - Динамика температуры грунтов основания насыпи в районе пикета 7088 по оси трассы (Скв-24), под правым (Скв-25) и левым (Скв-27) откосами насыпи со консольными деревянными навесами и в лесу в естественных условиях (Скв-28).

В районе ПК 7088 отсыпка насыпи высотой 2,5 м произведена в конце августа 2009 г., поэтому температуры грунтов основания ее по оси трассы на глубине 0,2 м к концу августа и началу сентября были высокими и соответственно равны 6,5 и 4,3°С. Зимой 2009/2010 гг. грунты основания насыпи на глубине 1,5 м почти не охладились (-0,1°С), а на глубине

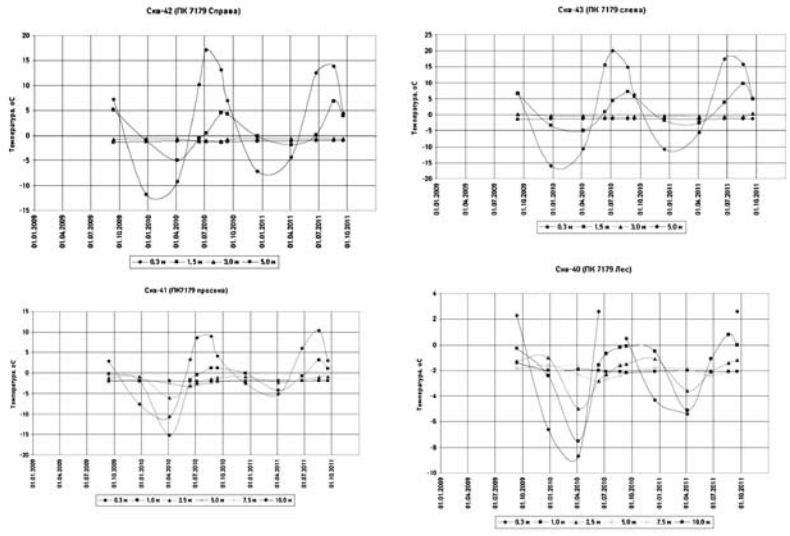


Рисунок 10 - Динамика температуры тела насыпи и грунтов её основания (Скв-42, Скв-43), на просеке (Скв-41) и в лесу (Скв-40) в районе пикета 7179.

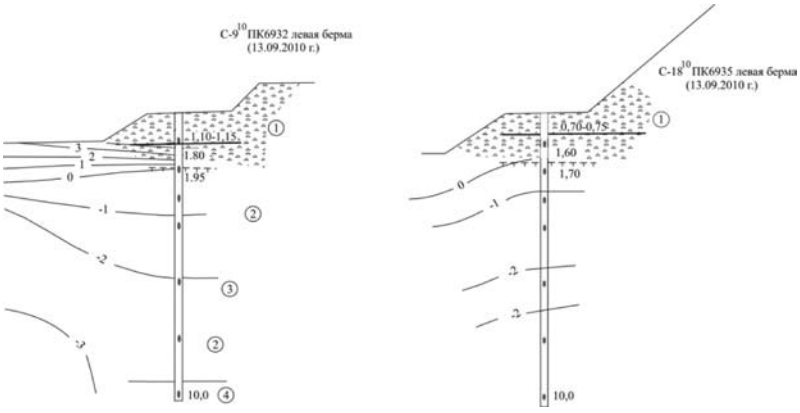


Рисунок11 - Изменение глубины протаивания и температуры грунтов основания берм при укладке теплоизоляционного материала на разных глубинах в районе ПК 6932 и 6935.

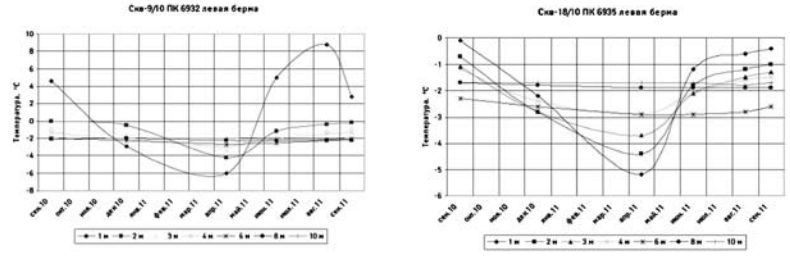


Рисунок 12 - Динамика температуры тела бермы и грунтов её основания на 0,5 м (Скв-18/10) и 1,3 м от сезонноохлаждающих устройств (Скв-9/10).

0,2 м понижение температуры составило всего до -0,7°С. Следовательно, при промерзании не происходило смыкания с многолетнемерзлыми грунтами. В летний сезон 2011 г. температура грунтов основания насыпи по оси трассы в 1,5 метровом слое не отпускалась ниже -0,2°С.

В районе пикета 7179 бурение и оборудование термических скважин произведено в конце августа 2009 г. после возведения земляного полотна с выемкой грунтов сезонно-протаивающего слоя. При бурении глубина протаивания от поверхности насыпи составляла 2,5-3,0 м при мощности скального грунта 2,2 м. Итак, здесь искусственно создана чаша протаивания грунтов в основании насыпи. Это подтверждают и температурные данные. Так, в зимний сезон в теле насыпи на глубине 1,5 м температура понижается до -5,0°С, а в летний сезон она повышается до 4,3-7,1°С (рис. 10), и грунты на глубине 5 м остаются стабильно высокотемпературными (-1,1...-1,3°С). По расчётам нулевая изотерма находилась глубже 2 м и, по видимому, здесь промерзающий слой не смыкается с многолетнемерзлыми породами.

На участке распространения пород ледового комплекса при возведении земляного полотна широко использовался теплоизоляционный материал из пенополистирола. В августе 2010 г. бурение скважин на бермах пикетов 6932 и 6935 показало, что теплоизоляционная эффективность его зависит от глубины укладки. С увеличением глубины укладки ослабевает теплового влияния. Так, при укладке его на глубине 0,7 м глубина протаивания грунтов под бермой ПК 6932 составила 1,70 м, а при укладке на глубине 1,1 м – 1,95 м (ПК 6935) (рис. 11). В зиму 2010/2011 гг. на бермах вышеперечисленных пикетов начали действовать сезонноохлаждающие установки (СОУ).

Годичный цикл наблюдений в термометрических скважинах с разной удаленностью от СОУ показали, что охлаждающий эффект его на расстоянии 0,5 м заметное, а на удалении 1,3 м резко снижается (рис. 12). В сентябре 2011 г. обследование СОУ на бермах в районе ПК 6932 показали, что после установки СОУ стволы скважины не заполнялись грунтом, поэтому у стволов скважин глубина сезонного протаивания колебалась в пределах 1,85-2,40 м. Также это подтвердило выкопанный здесь шурф для прокладки оптоволоконных кабелей, где глубина сезонного протаивания составляла 1.85-1,90 м. Для повышения охлаждающего эффекта СОУ необходимо досыпать стволы скважин дисперсным грунтом.

Экспериментальные исследования за тепловым режимом грунтов под теплоизоляционными покрытиями были проведены в 1971-1973 г.г. на стационаре Якутск. Плиты из пенопласта (марка ПС-1 и ПС-4) сокращают глубину сезонного протаивания 3-6 раз, но повышают среднегодовую тем-

пературу грунтов [4]. Представляют интерес работы ООО НПО «ФундаментСтройАркос» успешно применяемые в условиях криолитозоны Западной Сибири. Компания разработала эффективные, надежные устройства, обеспечивающие устойчивость мерзлого состояния грунтов за счет использования естественного холода: трубчатые системы замораживания и температурной стабилизации, сезоннодействующие охлаждающие устройства [5].

Выводы

За период наблюдений глубина сезонного протаивания на просеке трассы продолжает увеличиваться, а температура верхних горизонтов многолетнемерзлых пород повышаться.

На насыпи, отсыпанной в холодный период, наблюдается поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород, при этом, чем выше высота насыпи, тем интенсивнее скорость ее поднятия. При отсыпке насыпи в теплый период с удалением сезонноталого слоя в её основании формируется чаша протаивания.

Для обеспечения устойчивости насыпи необходимо накопление запасов холода в её теле и грунтах основания, поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород. Рекомендуется постоянное удаление снежного покрова с поверхности насыпи, или его уплотнение. Отсыпку насыпи необходимо проводить только в зимний период.

Результаты данного этапа исследований пока не позволяют подтвердить эффективность использования теплоизолирующих покрытий, термостабилизаторов, консольных навесов для предотвращения повышения температуры грунтов основания и деградации мерзлой толщи.

Список литературы

1. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / П.А.Соловьев. – Москва: Изд-во АН СССР, 1959. – 144 с.

2. Проектирование и строительство земляного полотна железной дороги Томмот-Кердем в сложных инженерно-геокриологических условиях. Итоги инженерных изысканий в 2005 г.: Материалы научно-технического совета 7-8 декабря 2005 г. в Якутске. – Якутск, 2005. – 118 с.

3. Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот-Кердем на участке «ледового комплекса (Материалы семинара-совещания 11-12 сентября 2007 г. в г. Якутске). – Якутск: ООО «Центр Трансстройиздат», 2007. – 165 с.

4. Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. – Якутск, 1975. – 302 с.

5. Строительство на вечномерзлых грунтах. – Тюмень, 2011. – 15 с.

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХА

А.Б. Шабаров, Б. В. Григорьев, А.А. Вакулин

ФГБОУ ВПО "Тюменский государственный университет", e-mail: kaf_mms@utmn.ru

В статье представлена методика определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах.

Продолжающаяся в настоящее время активная разработка нефтяных и газовых месторождений, эксплуатация уже существующих и строительство новых нефте и газопроводов а также строительство технических сооружений и жилых зданий на территории вечно и многолетнемерзлых грунтов влечет за собой исследование грунта данной местности. Широко известен тот факт, что в мерзлом и вечномерзлом грунте имеется вода в жидкой фазе - незамерзшая вода. Данный эффект может наблюдаться вплоть до температуры -70°С, хотя основное количество влаги переходит в лед в диапазоне от 0 до-3°С. Незамерзшая вода в мерзлом грунте оказывает значительное влияние на теплофизические свойства грунта, в особенности на теплоемкость и теплопроводность. Существует ряд методов по определению количества незамерзшей воды в грунтах: дилатометрический, криоскопический, калориметрический и другие. Наиболее распространенным является калориметрический метод, в его основе лежит уравнение теплового баланса.

$$c_Г m_Г |T_{Г1} - T_{Г2}| + c_В (m_{Висх} - m_Л) |T_{Г1} - T_{Г2}| + c_Л m_Л |T_{Г1} - T_{Г2}| + c_Б m_Б |T_{Г1} - T_{Г2}| + Q_Ф m_Л = K(T_{К1} - T_{К2}) \quad (1)$$

где К- тепловое значение калориметра, сГ, сВ, сЛ сБ [кДж/кгК]- соответственно теплоемкость сухого грунта, воды, льда и материала бюкса; mГ, mВисх, mЛ, mБ [кг]- масса грунта, воды исходная, льда и бюкса; QФ [кДж/кг] - теплота фазового перехода; |Тг1-Тг2|-изменение температуры образца в ходе эксперимента; (Тк1-Тк2) - изменение температуры калориметрической жидкости в ходе эксперимента. Из формулы (1) следует:

$$m_Л = \frac{K(T_{К1} - T_{К2}) - |T_{Г1} - T_{Г2}|(c_Г m_Г + c_В m_{Висх} + c_Б m_Б)}{Q_Ф - |T_{Г1} - T_{Г2}|(c_В - c_Л)} \quad (2)$$

Всё дело в том что фазовый переход вода – лед сопровождается значительным выделением теплоты- теплоты фазового перехода, составляющей 334 кДж/кг, поэтому зная количество энергии, потраченное на нагрев грунта от некоторой отрицательной температуры ТГ1 до положительной температуры ТГ2 легко определить массу льда что содержалась в грунте при температуре ТГ1.

Для определения количества незамерзшей влаги в разных типах грунтов на кафедре ММС ТюмГУ была создана установка, включающая в себя термостат, калориметр, а также сопутствующие приборы и детали.

Исследуемый грунт помещают в тонкостенный металлический цилиндр с размерами 60мм х 40мм. В центр цилиндра вставлен термометр сопротивления. Образец помещают в стакан с двойными стенками, пространство между которыми заполнено песком, далее стакан ставят термостат заполненный незамерзающей жидкостью и охлаждают в течении 5-6 часов до выбранной отрицательной температуры. Указанная длительность нужна для установления равновесного состояния в системе лед – вода.

Калориметр представляет собой сосуд, заполненный калориметрической жидкостью (в данном случае дистиллированной водой) и окруженный слоем изоляционного материала, датчиками температуры выступают два термометра сопротивления. Калориметрический опыт состоит из трех периодов. Начальный период - за 10-15 минут до окончания охлаждения образца включают мешалку, встроенную в крышку калориметра и фиксируют, ход изменения температуры калориметрической жидкости. После чего образец извлекают из термостата и незамедлительно помещают в калориметр. Интервал времени с момента погружения образца в калориметр до начала равномерного изменения калориметрической жидкости – главный период. По завершению данного периода в течение 10 минут продолжают фиксировать температуру калориметрической жидкости – конечный период.

По известным данным теплоемкости и массы сухого грунта, грунтовой воды металлического цилиндра и полученному в ходе эксперимента изменению температуры образца и калориметрической жидкости по формуле (2) находят массу льда в содержащемся образце при температуре ТГ1 и по формуле (3) находят искомое содержание незамерзшей воды.

$$m_{Н.В} = m_{В.исх} - m_Л \quad (3)$$

Поправку на теплообмен вычисляют по формуле Реньо – Пфаундлера – Усова.

Аналогичным путем находят массу незамерзшей воды при других значениях ТГ1, и по полученным данным строят кривую (рис.1) зависимости температуры образца от содержания незамерзшей воды.

В ходе проведенных авторами экспериментов были получены ряд значений mн.в при различных температурах. В исследуемый грунт - глина, массой 117.46г с содержанием воды 27.51г.

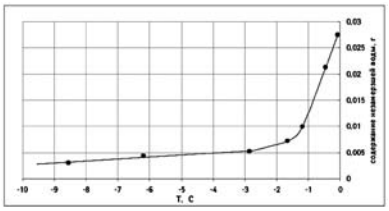


Рисунок 1 - Кривая зависимости содержания незамерзшей воды от температуры

Рисунок 1 наглядно иллюстрирует характер изменения содержания незамерзшей воды в грунте с уменьшением температуры, видно что особенно интенсивные фазовые превращения происходят в диапазоне 0 – -1.5°С, начиная с -3°С и до -10°С содержание незамерзшей воды изменяется в узком диапазоне значений и с понижением температуры достигает постоянной величины, равной количеству прочносвязанной воды.

Список литературы

1. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. Москва 1973г
2. Материалы по лабораторным исследованиям грунтов. ред. Цытович.- Москва: Академия наук СССР. 1957.
3. Материалы по лабораторным исследованиям грунтов. Отв.ред. Цытович.- Москва: Академия наук СССР. 1953.
4. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М., Высш. шк.,1973г

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЛАЖНЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ МОРОЗНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А.В. Колмогоров

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П.Ларионова СО РАН, г. Якутск,
e-mail: a.v.kolmogorov@ iptpn.ysn.ru

Рассматривается математическая модель, основанная на положениях теории континуального разрушения, предлагаемая для описания изменения физико-механических характеристик влажных грунтов подверженных циклическому замораживанию – оттаиванию. Получены рекуррентные соотношения для определения значений длительной прочности, коэффициента фильтрации и меры накопленных повреждений среды после n циклов замораживания – оттаивания. Предложена формула, выражающая долговечность грунта подверженного предварительному циклическому замораживанию – оттаиванию через долговечность грунта неподвергнутого воздействию циклов.

Для математического описания изменений структуры среды под действием различных внешних факторов и закономерностей влияния их на физико-механические свойства среды в механике сплошных сред используются модели и методы теории повреждаемости [1]. Считается, что возникновение и накопление повреждений могут быть связаны, в первую очередь, с необратимыми деформациями среды. В грунтах такие деформации могут развиваться при ползучести (вязкопластическое течение) и при замерзании воды в порах (необратимые объемные деформации).

Согласно теории континуального разрушения [2], считается, что в процессе реологического деформирования мера повреждений ω меняет свое значение от 0 до 1. Когда значение меры повреждений достигает единицы, материал разрушается. Различные варианты зависимости меры повреждений от реологических деформаций можно построить на основе известных критериев механической прочности. В механике горных пород и грунтов в качестве такого критерия часто рассматриваются предельное значение необратимой деформации [3] и критическое значение энергии диссипации при вязко-пластической деформации [1]. Примером модели длительной прочности, основанной на использовании критерия предельного значения накопленной необратимой деформации, является модель предложенная В.Н.Тайбашевым [3] для длительной прочности мерзлых крупнообломочных горных пород. Используя в качестве критерия длительной прочности значение накопленной вязко-пластической деформации до разрушения им получено соотношение для долговечности грунта при различных уровнях постоянных напряжений:

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_\infty}{\sigma_1 - \sigma_\infty}\right)^m \qquad (1)$$

где t1 – время до разрушения при σ_1, t_2 - при σ_2.

Более обоснованным является критерий прочности, когда материал разрушается при достижении количеством энергии затраченной на необратимые деформации критического значения W_{kp}. Мощность энергии затрачиваемой на вязкопластическое деформирование среды равна:

$$\dot{W} = e^p(\sigma - \sigma_\infty) \qquad (2)$$

В этом случае критерием длительной прочности грунта будет интеграл по времени от (2):

$$W_{kp} = \int_0^{t_{kp}} (\sigma - \sigma_\infty) e^p dt \qquad (3)$$

При постоянных напряжениях σ=σ1 и σ=σ2 для долговечности получим соотношение:

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_\infty}{\sigma_1 - \sigma_\infty}\right)^{m+1} \qquad (4)$$

Для водонасыщенных грунтов находящихся в талом состоянии, длительная прочность в основном определяется деформациями минерального скелета и, следовательно, накоплением повреждений при неупругих деформациях скелета. В двухфазной модели талый грунт рассматривается как пористая среда насыщенная водой [4]. В этом случае, в зависимости (4) вместо напряжений σ должны фигурировать эффективные напряжения $\sigma^f = \sigma - p$:

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{\sigma_2^f - \sigma_\infty}{\sigma_1^f - \sigma_\infty}\right)^{m+1} \qquad (5)$$

где p – поровое давление, а σ_∞ относится к минеральному скелету.

Экспериментальных данных по исследованию влияния циклического морозного воздействия на физико-механические свойства влажных дисперсных систем, в том числе на длительную прочность различных грунтов и горных пород, довольно много, но работ, посвященных математическому моделированию этого явления, практически нет. Перераспределение влаги и изменения связей между компонентами криогенной системы при замерзании и оттаивании поровой воды, влияют на

структуру и физико-механические свойства среды, связанных, в конечном счете, с необратимыми деформациями минеральных частиц [5]. На характер изменений структуры среды и на миграцию влаги существенное влияние оказывают начальное влагосодержание, степень влагонасыщенности, условия дренирования, предварительное уплотнение, гранулометрический состав минеральных частиц, величина температуры замораживания, продолжительность и цикличность морозного воздействия [6].

Анализ данных экспериментальных исследований влияния количества циклов замерзания-оттаивания на значения таких характеристик влажных грунтов как модули упругости, коэффициенты теплопроводности и диффузии, показывает, что существенное влияние на эти изменения имеют первые 4 -10 циклов и с увеличением числа циклов влияние их уменьшается.

Рассмотрим применение моделей теории повреждаемости для описания влияния циклического замораживания и оттаивания на свойства влажных дисперсных сред. С точки зрения теории накопления повреждений, влияние циклов промерзания – оттаивания на длительную прочность можно учесть предполагая аддитивность накопленных повреждений при ползучести ω_p и при воздействии циклов промерзания – оттаивания на грунт ω_n. Мера поврежденности ω образца подвергнутого предварительно n циклам замораживания – оттаивания, а затем испытанию на длительную прочность при постоянном напряжении $\sigma = \sigma_1$ будет суммой:

$$\omega = \omega_n + \omega_p \qquad (6)$$

Для описания процесса накопления повреждений используется энергетический подход. В качестве энергии, расходуемой на создание повреждений в материале, принимается энергия работы активных напряжений на поле вязко-пластических деформаций. Кинетическое уравнение накопления повреждений при ползучести принимается в виде:

$$\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{e^p(\sigma - \sigma_\infty)}{W_{kp}} \qquad (7)$$

При постоянном напряжении $\sigma = \sigma_1$ из интеграла от (7) с учетом условия $\omega_p(0) = 0$ получим:

$$\omega_p(t_1, \sigma_1) = \frac{(\sigma_1 - \sigma_\infty)^{m+1}}{W_{kp}} t_1 \qquad (8)$$

где t_1 - время до разрушения, т.е. долговечность при σ_1 напряжении .

Используя положения теории накопления повреждений можно математически описать изменение различных физико-механических параметров среды, таких как теплопроводность, коэффициент фильтрации, диффузии, модули упругости и ползучести и т.д. при циклическом морозном воздействии [8,9]. C.A.Pagen и V.K.Khosla [9] провели экспериментальные исследования влияния циклического замораживания -оттаивания в условиях свободного дренирования образцов глинистых грунтов на их прочность и реологические характеристики. Образцы имели различное начальное влагосодержание и влагонасыщенность, а также подвергались предварительному уплотнению по общепринятой схеме. На рисунке 1 приведена кривая зависимости модуля ползучести от числа циклов замораживания – оттаивания глинистых грунтов по данным работы [9].

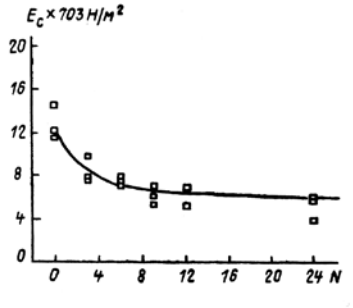


Рисунок 1 - Зависимость модуля ползучести глинистого грунта от числа циклов замораживания – оттаивания [9].

В первом приближении, это влияние на физико-механические свойства грунта можно учесть с помощью выражения:

$$f_n = f_\infty + (f_0 - f_\infty)e^{-kn} \qquad (9)$$

где f_0, f_∞ - соответственно, начальное (n = 0) и конечное (n -> ∞) значения параметров грунта при циклическом морозном воздействии, k- также параметр грунта. Значение параметра f_n можно найти с помощью рекуррентной формулы:

$$f_n = f_{n-1} - (f_0 - f_\infty)(1 - e^{-k})e^{-k(n-1)} \qquad (10)$$

Кривая зависимости модуля ползучести суглинка от количества циклов замораживания-оттаивания на рисунке 1 хорошо описывается с помощью выражения (9) при f_0=12, f_∞=6, k=0,25.

Выражению (9) соответствует мера накоплений повреждения в виде:

$$\omega_n(n) = \omega_\infty(1 - e^{-kn}) \qquad (11)$$

где ω_∞ - максимальная мера накопления повреждений при n -> ∞. Эта формула получается из решения кинетического уравнения вида [2]:

$$\frac{d\omega_n}{dn} = ae^{-bn} \qquad (12)$$

Основанием к такому выбору кинетического уравнения служит естественная оценка скорости накопления повреждений: скорость накопления повреждений максимальна в начальных циклах и с возрастанием количества циклов уменьшается до нуля.

Интегрируя (12) по n, с учетом условий: $\omega(0) = 0$ при n = 0 и $\omega(n) = \omega_\infty$ при n -> ∞, получим формулу (11). Для меры накопления повреждения при n-ом цикле имеем рекуррентную формулу:

$$\omega_n = \omega_{n-1} + \omega_\infty(1 - e^{-k})e^{-k(n-1)} \qquad (13)$$

Для долговечности грунта t(n), подвергнутого предварительно циклическому замораживанию и оттаиванию n раз, получим зависимость:

$$t(n) = t_0[1 - \omega_n(n)(1 - e^{-kn})] \quad (14)$$

где t_0 – долговечность грунта неподвергнутого воздействию циклов промерзания – оттаивания при том же напряжении.

В испытаниях на длительную прочность, образец грунта сначала подвергается воздействию n циклов промерзания – оттаивания, а затем определяется время до разрушения образца при постоянном напряжении. Из уравнения (6) с учетом (8) и (11) получим условие для длительной прочности в этом случае. Из этого условия для его долговечности влажного грунта, подверженного предварительно n циклам замерзания-оттаивания, при постоянном уровне напряжения $\sigma = \sigma_1$, получим выражение:

$$t_1 = \frac{1 - \omega_\infty + \omega_\infty e^{-bn}}{a(\sigma - \sigma_\infty)^{m+1}} \quad (15)$$

Если долговечность грунта, неподверженного морозному воздействию при том же уровне напряжения равна:

$$t_1^* = \frac{1}{a(\sigma_1 - \sigma_\infty)^{m+1}} \quad (16)$$

то для грунта подверженного n циклам получим соотношение для долговечности:

$$t_1(n) = t_1^*[1 - \omega_\infty(1 - e^{-bn})] \quad (17)$$

В этом случае, влияние количества циклов промерзания – оттаивания на длительную прочность влажного грунта описывается выражением:

$$\sigma(n) = \sigma_\infty - (\sigma_0 - \sigma_\infty)e^{-bn} \quad (18)$$

где σ_0 и σ_∞ – значения длительной прочности грунта при n=0 и при n->∞.

В работе Курилко А.С. [8] приведены результаты измерения коэффициента фильтрации песчано-глинистых смесей с различной влажностью в зависимости от циклов замораживания-оттаивания. Определялось значение коэффициента фильтрации до морозного воздействия и его значения после одного, двух и четырех циклов замораживания-оттаивания. Значение коэффициента фильтрации до морозного воздействия было $k_ф=10^{-8}$м/с т.е в (9) $f_0=0,1$. Используя рекуррентное соотношение (10) были определены значения параметров уравнения (9) k=0,5 и f_∞=15,2 для песчано-глинистого грунта с влажностью 40%. На рис.2 приведена кривая зависимости коэффициента фильтрации от числа циклов замораживания-оттаивания, построенная с помощью уравнения (9) и с использованием полученных значений параметров k и f_∞.

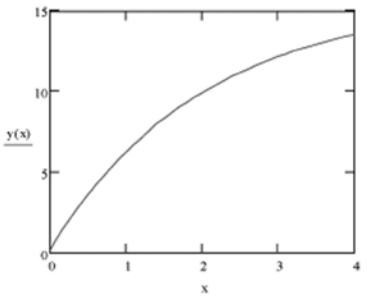


Рисунок 2 - Кривая зависимости коэффициента фильтрации от числа циклов замораживания-оттаивания.

Здесь $y(x)=k_ф \cdot 10^7$м/с, x = n.

Из рисунка 2 видно, что в этом случае значение коэффициента фильтрации через четыре цикла не достигает предельного значения f_∞= 15,2. Это указывает на то, что в данном случае для достижения предельно-длительного значения коэффициента фильтрации необходимо большее число циклов замораживания-оттаивания.

Список литературы

1. Бондарь В.С. Неупругость. Варианты теории. – М.: Физматлит, 2004.- 144 с.

2. Кондауров В.И., Фортов В.Е. Основы термомеханики конденсированной среды. – М.: Издательство МФТИ, 2002. - 336с.

3. Тайбашев В.Н. Физико-механические свойства мерзлых крупнообломочных пород. Труды ВНИИ-1, т.XXXIII – Магадан, 1973, - 160с

4. Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А. Механика насыщенных пористых сред. – М.: Недра, 1970. – 339 с.

5. Washburn A.L., Burrous C., Rein R. Soil deformation resulting from some laboratory freeze-thaw experiments. Proc. 3rd Int. Conf. Permafrost, Edmonton, 1978. Vol.1 Ottawa, 1978, - p. 756-762.

6. Frydman S., Melnik J., Baker R. The effect of prefreezing on the strength and deformations properties of granular soils. Soils and Found., 1979, 19, № 4, p.31-42.

7. Филиппов П.И., Тимофеев А.М., Степанов А.В. Влияние циклического замораживания-оттаивания на теплофизические характеристики грунтов. //Бюллетень научно-технической информации /Физико-технические проблемы Севера. – Якутск: Изд-во Якутского филиала СО РАН СССР, декабрь 1982.- с.19-23.

8. Курилко А.С. Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства горных пород. – Якутск: ЯФ ГУ «Издательство СО РАН», 2004.- 153с.

9. Pagen C.A., Khosla V.K. Effect of freeze-thaw on rheological characteristics of a compacted clay. Transp. Res. Rec., 1974, № 497 – p.1-17.

КОРРОЗИЯ НА КОНТАКТАХ МЕТАЛЛОВ СО ЛЬДОМ

А.В. Шавлов, А.А. Рябцева, А.Д.Писарев

Институт криосферы Земли СО РАН, г. Тюмень, e-mail: shavlov@ikz.ru

Представлены результаты лабораторных измерений количества меди, израсходованной в электрохимическом процессе коррозии на фронте кристаллизации воды. Приведены результаты измерения напряжения гальванических пар некоторых металлов в воде и во льду. Проанализирована численно обоснованная модель интенсификации коррозионного процесса на фронте кристаллизации.

Важной проблемой инженерной геокриологии является проектирование фундаментов сооружений с учетом особенностей процессов, происходящих в мерзлых грунтах. К ежегодным катастрофическим убыткам приводят электрохимические процессы на контактах металлов со льдом и льдонасыщенным грунтом, имеющие результатом коррозию металлических конструкций, т.е. убыль атомов металла из состава конструкций и ослабление их прочностных свойств. Согласно оценкам экспертов коррозия, например, трубопроводов, проложенных в мерзлых грунтах, имеет интенсивность сравнимую или даже превышающую интенсивность коррозии в грунтах лесостепной зоны [1] не смотря на то, что среднегодовая температура в мерзлых грунтах на десятки градусов ниже. Причиной высокой коррозионной активности мерзлых грунтов является наличие льда и особенностей физико-химических процессов на его поверхности.

Под электрохимической коррозией металла подразумевается процесс с полуреакцией окисления атомов металла на границе металл-раствор: $Me \rightarrow Me^{z+} + ze^-$ и, в большинстве случаев, полуреакцией восстановления кислорода: $\frac{1}{4}O_2 + H^+ + e^- \rightarrow \frac{1}{2}H_2O$, где Me – металл, z – степень окисленности металла, e – электрон. В отсутствии кислорода для небольшого ряда металлов с отрицательным электродным потенциалом вместо второй полуреакции возможно протекание полуреакции восстановления ионов водорода: $H^+ + e^- \rightarrow \frac{1}{2}H_2$. Альтернативным электрохимическому может служить процесс коррозии по химическому механизму: Me + Ox -> Me^{z+}, где Ox и Red - окисленная и, соответственно, восстановленная формы реагентов.

Для выяснения закономерностей протекания коррозии на контактах металла со льдом (лед выступает в качестве раствора) нами были выполнены лабораторные измерения скорости коррозии металла меди на фронте кристаллизации воды и плавления льда, измерены электродные потенциалы металлов алюминия, меди, железа и свинца во льду, проанализирована вероятная модель коррозионного процесса.

Коррозию исследовали с помощью экспериментальной методики, основанной на регистрации изменения электропроводности тонкой металлической пленки [2]. Предполагается, что атомы металла, вступая в окислительно-восстановительную реакцию, выбывают из процесса переноса тока, и электропроводность металла снижается. Методика позволяла регистрировать коррозию непосредственно в процессе ее протекания. Пленки меди получали с помощью вакуумного поста ВУП-5 путем термического напыления металла на кварцевую или стеклотекстолитовую подложку. Площадь пленок равнялась 0,5х2см^2 при межэлектродном расстоянии 2 см. Сопротивление пленок составляло около 10 Ом. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) пленок был близок к объемному значению ТКС меди. Среднюю толщину пленок оценивали в 20 моноатомных слоев по количеству металла, израсходованного при напылении, и по расстоянию от подложки до испарителя. Плёнку после получения выдерживали на воздухе более 12 часов, при этом на ее поверхности образовывался слой окисла и величина сопротивления пленки стабилизировалась. Замечено, что пленки, длительное время выдержанные на воздухе, подвергались большей коррозии в последующих опытах. Кстати, согласно местоположению в ряду напряжений металлов, медь может корродировать только по схеме с восстановлением атомов кислорода. Реакция с восстановлением ионов водорода невозможна термодинамически.

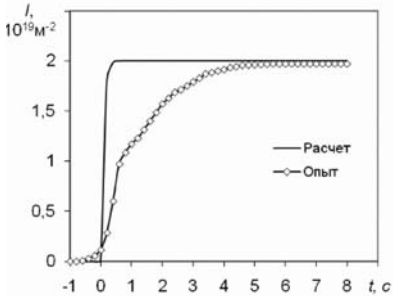


Рисунок 1 - Экспериментальная и расчетная зависимости поверхностной плотности I прореагировавших атомов меди от времени t.

На поверхность приготовленной медной плёнки наносили каплю дистиллированной воды диаметром 3-4 мм, затем помещали пленку в рабочий объём и вакуумировали. Капля частично испарялась и, вследствие уноса тепла паром, быстро замерзала. При замерзании капли сопротивление медной пленки необратимо увеличивалось примерно на 2 %. Погрешность измерения сопротивления с помощью прибора В7-34А составляла менее 0,1%. В ряде опытов для замораживания капли использовали азотный криостат, но в этом случае, возможно, из-за более низкой скорости охлаждения, эффект изменения сопротивления пленки был слабее. На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость поверхностной плотности прореагировавших атомов меди от времени с момента начала кристаллизации. Поверхностная плотность была рассчитана из значений электросопротивлений

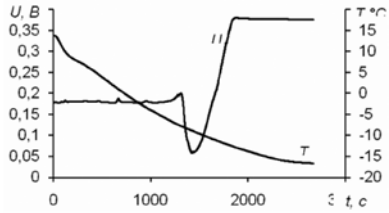


Рисунок 2 - Зависимость разности потенциалов U гальванической пары медь-свинец и температуры T теплообменника от времени t в процессе замораживания раствора.

пленки. В выполненных опытах изменение толщины пленки составило около 5×10^{-10} м. Это соответствует толщине примерно 1 моноатомного слоя. Повторные опыты с замораживанием воды на том же участке поверхности пленки приводили к уменьшению эффективной толщины пленки примерно на такую же величину. Таким образом, коррозия, по-видимому, протекала в отсутствии дефицита исходных реагентов и не контролировалась процессами диффузионного переноса реагентов и продуктов реакции к месту реакции и от него. Она могла лимитироваться вероятностью преодоления потенциального барьера реакции. При плавлении льда ускорение коррозии не наблюдалось.

Следует отметить, что необратимое уменьшение электропроводности медной пленки при кристаллизации воды не было обусловлено каким-либо нехимическим процессом, например, механической порчей поверхности пленки при трении о лед. Опыты с пленками благородного металла – серебра, имеющего механические характеристики, близкие к меди, не обнаружили никакого изменения сопротивления при кристаллизации воды.

Измерения электродных потенциалов металлов во льду представляют интерес для выяснения термодинамической выгодности протекания той или иной реакции. Прямые измерения потенциалов осложнены трудноустранимыми процессами поляризации электродов, вызванными их пассивацией и перенапряжением, возникающим при замыкании измерительной цепи. Поэтому, основное внимание в исследованиях было уделено изучению поведения напряжения гальванических пар, образованных электродами из различных металлов и раствором при переводе раствора из жидкого в замороженное состояние. В качестве раствора использовалась дистиллированная вода. Охлаждение раствора осуществляли с помощью теплообменника, подключенного к проточному термостату. Разность потенциалов регистрировали с погрешностью ±10 мВ. Абсолютная погрешность измерения температуры составляла ±1°.

На рис.2 изображена типичная зависимость разности потенциалов и температуры теплообменника от времени. Гальваническая пара была образована медным и свинцовым электродами. Разность потенциалов между электродами в воде составила 0,17 В (медный электрод заряжался положительно). Вследствие поляризации электродов значение разности потенциалов пары было меньше разности стандартных электродных потенциалов, составляющей 0,47 В. При понижении температуры разность потенциалов оставалась практически постоянной. После замерзания раствора в межэлектродной области, произошедшего после достижения теплообменником температуры -8°С, разность потенциалов увеличилась до значения 0,38 В. Аналогичным образом вели себя напряжения гальванических пар Cu-Al, Cu-Fe, Fe-Pb. Они увеличивались в 1,5-2 раза при переводе раствора в замороженное состояние. При расплавлении льда напряжения пар возвращались к прежнему для воды значению.

Поведение напряжения гальванических пар при замораживании указывает на изменение стандартных электродных потенциалов в большую сторону при переходе вода->лед. В результате этого протекание окислительно-восстановительных реакций во льду, в частности коррозии, представляется энергетически более выгодным, чем в жидком растворе, хотя скорость процесса во льду может быть низкой.

Для объяснения экспериментальных данных по коррозии металла на фронте кристаллизации нами была предложена модель, заключающаяся в том, что на фазовом фронте, вследствие эффекта отторжения льдом собственных носителей заряда (ионных и ориентационных дефектов), данные носители накапливаются в неравновесном количестве [3]. Эти дефекты могут диффундировать к границе льда с металлом и там рекомбинировать с высвобождением энергии. Далее энергия может быть передана путем столкновений реагентам. Барьер реакции может быть преодолен, и коррозия ускорится.

Численная оценка концентрации N неравновесных носителей, необходимых для объяснения опытного (рис.1) значения поверхностной плотности прореагировавших атомов меди, I=2×1019 м-2, была выполнена по формуле N=I/L, где L- длина диффузии. Она дала для ионных дефектов (ионы водорода и гидроксид-ионы) величину $N=10^{25}$ м$^{-3}$ (при $L=3\times10^{-6}$м), а для ориентационных - $N=10^{28}$ м$^{-3}$ (при $L=2\times10^{-9}$м). Вторая величина концентрации на практике вполне достижима, так как сравнима с равновесной концентрацией ориентационных дефектов в воде, а первая не может быть достигнута, так как должна на много порядков превысить равновесную концентрацию протонов в воде, равную 10^{20} м$^{-3}$, что невозможно. Таким образом, ориентационные дефекты являются наиболее вероятными стимуляторами коррозии при кристаллизации воды.

Нами были выполнены расчеты концентрации ориентационных дефектов вблизи фронта кристаллизации и интенсивности их рекомбинации в воде и во льду. Они показали, что при низкой скорости кристаллизации, почти все неравновесные дефекты (99,5 %) отторгаются фронтом и рекомбинируют в объеме воды, и только 0,5 % - во льду. При высокой скорости кристаллизации ситуация изменяется: неравновесные дефекты не успевают отторгаться и рекомбинируют, в основном, во льду. Во льду энергия рекомбинации намного выше, чем в воде (0,68 и около 0,03 эВ, соответственно). Именно во льду энергия рекомбинации может быть достаточной для преодоле-

ния барьера коррозии, равного для меди – 0,52 эВ. Поэтому наибольшей интенсивности коррозии можно ожидать при высокой скорости кристаллизации. Уже при скорости более 10^{-7} м/с интенсивность коррозии может превышать изотермическую.

Под потенциальным барьером коррозии, протекающей по электрохимическому механизму, мы подразумеваем энергоемкий процесс образования активных частиц - ионов водорода, необходимых для реакции. Полагаем, что ионы водорода могут образовываться при диссоциации молекул воды за счет энергии рекомбинации ориентационных дефектов. В случае процесса, идущего по химическому механизму, под барьером реакции подразумеваем затраты энергии, необходимые для преодоления сил отталкивания реагентов на малых расстояниях.

Проанализированный механизм ускорения коррозии прост и универсален. Он может быть применен для объяснения интенсификации любых реакций в замороженных растворах, контролируемых скоростью преодоления потенциального барьера.

Список литературы

1. Великоцкий М.А. Коррозионная активность грунтов в различных природных зонах //Вестн. Моск. Ун-та, Сер. 5, География, 2010, № 1, с.21-27.

2. Шавлов А.В., Писарев А.Д., Рябцева А.А. Динамика электропроводности пленок металлов во льду при его структурном превращении. Рекомбинационно-фононный механизм ускорения коррозии //Криосфера Земли, 2006, Т.X, № 3, с.42-48.

3. Шавлов А.В., Рябцева А.А. Механизм ускорения коррозии металлов во льду при структурных превращениях и кристаллизации воды //Журнал физической химии, 2007, Т. 81, №. 7, с. 1186–1191.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЕРЗАНИЯ ПЫЛЕВАТОЙ ГЛИНЫ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ВНЕШНЕМ ДАВЛЕНИИ

В. Г. Чеверев[1, 2], Р. С. Бурнаев[1], В. Е. Гагарин[1], Е. В. Сафронов[1,2]

[1]МГУ им. М. В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, Москва, Россия, e-mail: cheverev44@mail.ru
[2]ООО «Лаборатория геоинновационных технологий МГУ», Москва, e-mail: vcheverev@geoinnotech.ruu

Исследование влияния внешней нагрузки на морозное пучение промерзающей пылеватой глины проводилось с целью дальнейшего развития математического моделирования этого процесса. Изложена методика проведения физического моделирования и приведена схема соответствующего устройства. Предложено аналитическое выражение и проведена серия опытов по оценке влияния внешней нагрузки на промерзание и морозное пучение грунта. Показан сложный характер зависимости относительного пучения промерзающей пылеватой глины от внешней нагрузки при консолидированном и неконсолидированном состоянии.

Морозное пучение грунтов, вызванное криогенной миграцией, это наиболее сложный процесс, и к тому же особо опасный для определенной категории инженерных сооружений. Оно зависит от характеристик состава, строения промерзающих грунтов и факторов внешней среды. Как правило, в виду физико-химической природы взаимодействия порового раствора и минерального компонента [6], эта зависимость нелинейная.

Результаты экспериментальных исследований по этой проблеме опубликованы в ряде работ[2, 4, 5, 6]. Инверсия зависимости морозной пучинистости существует в ряду песок-глина, в наибольшей степени проявляясь в пылеватых супесях и суглинках [4]. Она имеет место и от скорости промерзания, оказываясь оптимальной при значениях 1-2 см/сут [3, 4]. По данным лабораторных опытов максимальное пучение пылеватых грунтов с влажностью более 25-30% отмечено при градиентах температуры 0,1-0,3 град/см. Интенсивность пучения понижается по мере отклонения от критического значения градиента температуры в промерзающей зоне в ту или иную сторону. Возникает вопрос, имеет ли место нелинейность зависимости морозной пучинистости грунтов от внешней нагрузки?

Влияние давления на морозное пучение грунтов рассматривалось в работе [2, 4, 5 и др.]. На основании лабораторных экспериментов отмечается, что уже при небольших величинах внешней нагрузки на грунт, его морозное пучение заметно снижается в результате уменьшения притока влаги в зону промерзания. Н.А. Пузаков [5] объяснял эту зависимость влиянием давления на содержание незамерзшей воды в мерзлом грунте и считал, что процесс морозного пучения прекращается при увеличении глубины промерзания до 0,9-1,2 м, что соответствует давлению на зону промерзания около 15-20 кПа.

Однако авторы работы [4] сомневаются в наличии критического давления, так как по их данным в натурных условиях грунты способны подвергаться пучению даже при давлении выше 100-300 кПа. Влияние давления на морозное пучение грунтов авторы рассматривают в двух аспектах: 1 – изменение фазового состава в сторону повышения содержания незамерзшей воды и 2 – влияние внешней нагрузки на компрессию талой зоны промерзающего грунта.

По первому аспекту можно возразить. По нашим данным внешнее давление на грунт в условиях открытой по влагообмену системы снижает содержание незамерзшей воды [6], но влияние этого эффекта на морозное пучение пока еще предстоит выяснить. По второму аспекту не все так однозначно, и усадка и компрессия талой зоны промерзающего грунта могут иметь место, но причины здесь две: понижение порового давления в талой зоне за счет переноса влаги в промерзающую зону и наоборот повышение порового давления за счет внешней нагрузки, если она есть. Результирующий эффект зависит от условий промерзания и свойств грунта, но оба фактора действуют в одну сторону – уплотняют талую зону промерзающего грунта.

Ниже рассматриваются результаты авторов, полученные по этой проблеме на основе экспериментальных исследований.

Мерзлый грунт следует рассматривать как систему, состоящую из тонких дискретных минеральных элементов (частиц), которые разделены пленками незамерзшей воды. При этом внешняя нагрузка будет восприниматься этими пленками в полной мере. Отсюда нагрузка пропорционально своей величине увеличит потенциал незамерзшей воды, и, соответственно, повысит температуру начала замерзания ее в грунте.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс (ИВК-Пучение), который состоит из следующих основных блоков (рис. 1):

1. блок для размещения образцов грунтов с целью их промораживания;
2. охлаждающий циркуляционный термостат;

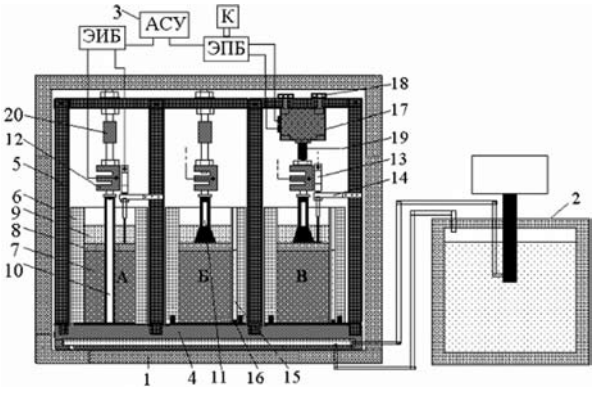


Рисунок 1 - Схема устройства для лабораторного определения характеристик пучинистости грунтов: А – касательных сил, Б – нормальных сил, В – деформаций пучения. Условные обозначения в тексте.

3. блок силового пневматического нагружения;

4. электроизмерительный блок (ЭИБ) и автоматизированной системы управления (АСУ).

Отличительными особенностями ИВК-Пучение являются то, что имеющаяся в первом блоке (1) полая охлаждающая плита (4), расположена под цилиндрами (6) с образцами грунтов (7). При этом, с целью выравнивания температурного поля на поверхности охлаждающей плиты, она выполнена из нержавеющий стали толщиной 10 мм.

Кроме того, для обеспечения заданного влажностного режима промерзания образцов грунта слой капиллярно-пористого материала (9) уложен на его теплый торец. Для контроля над положением нулевой изотермы и передвижением фронта промерзания в грунте в стенке полого цилиндра предусмотрен вертикальный канал (15), смещенный по горизонтали к образцу. Он заполнен дистиллированной водой для определения положения нулевой изотермы, а для контроля положения фронта промерзания грунта - водным раствором равным раствору в порах грунта по температуре начала замерзания. Для дополнительного контроля над температурным полем в грунте вдоль его оси, например, в полости модели сваи (10), устанавливают термокосу.

Конструктивно измерительно-вычислительный комплекс состоит из следующих деталей и узлов.

На плите (4) закреплена силовая рама (5). На ней также установлены гильзы (6) с образцами (7). В гильзе имеется вертикальный канал (15), который снизу у плиты закрыт металлической пробкой (16). Канал (15), на высоту не менее чем высота образца, заполнен водой (или раствором). На образце лежит пористый латунный диск (8), на котором уложен мелкозернистый капиллярно-пористый песок (9).

При определении удельных касательных сил пучения и степени морозной пучинистости грунтов – вариант А (рис. 1), по оси образца размещается модель сваи (10), которая нижним торцом упирается в плиту (4), а верхним в датчик силы (12), а последний в силовую раму (5). Для контроля над деформациями пучения используется датчик положения (13), АСУ и ЭИБ.

При определении удельных нормальных сил пучения – вариант Б, между пластиной (8) и датчиком силы (12) устанавливается стойка (11).

При измерении степени морозной пучинистости грунтов в условиях внешней нагрузки – вариант В, используется пневмопривод, состоящий из электропневматического блока (ЭПБ) и из пневмоцилиндра (17), закрепленного на силовой раме болтами (18). Нагрузка на промораживаемый образец передается через шток пневмоцилиндра (19) и датчик силы (12). Управление давлением осуществляется АСУ. Контроль над деформациями пучения осуществляют с помощью датчиков положения (13), АСУ и ЭИБ. Общее давление в системе создается с помощью компрессора (К).

Ниже рассматривается методика применения ИВК-Пучение для определения степени морозной пучинистости грунтов (рис.1, В).

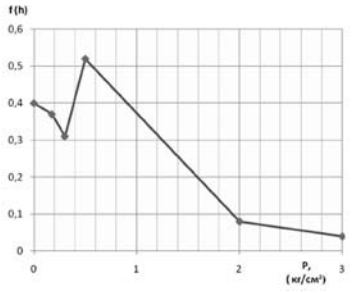


Рисунок 2 - Зависимость относительного морозного пучения f(h) от приложенной нагрузки (P) с предварительным уплотнением той же нагрузкой

Для обеспечения заданного влажностного режима промерзания образца грунта служит слой капиллярно-пористого материала (9), например, мелкозернистого песка, уложенного на его теплый торец. Устройство позволяет провести испытания по трем типам влажностного режима. Первый режим – закрытая система, поступление влаги извне отсутствует. В этом случае слой песка отсутствует, или между ним и грунтом положена влагонепроницаемая пленка.

Второй режим – открытая система, поступление влаги извне имеет место, но без напора. В этом случае слой песка увлажнен только до капиллярного насыщения. Капиллярно-подвешенная вода в порах песка – резерв для поступления воды извне в промерзающий грунт. Варьируя толщиной слоя песка можно управлять объемом резервного влагосодержания. При этом гидростатическое давление со стороны капиллярно-насыщенного песка на испытуемый грунт отсутствует.

Третий режим – открытая система, поступление воды извне происходит под напором. В этом случае над слоем водонасыщенного песка поддерживается еще слой воды, уровень которого до поверхности образца грунта (7) и определяет величину напора. Уровень слоя воды постоянно поддерживается в ходе опыта с помощью сосуда Мариотта.

Перед началом промораживания температура образцов и термокамеры должна быть понижена до +0,2 ÷ +0,5°С. С этой целью на циркуляционном охлаждающем термостате задается температура +0,2°С. Плита (4), путем перекачки антифриза термостата по замкнутому кругу, охлаждается до

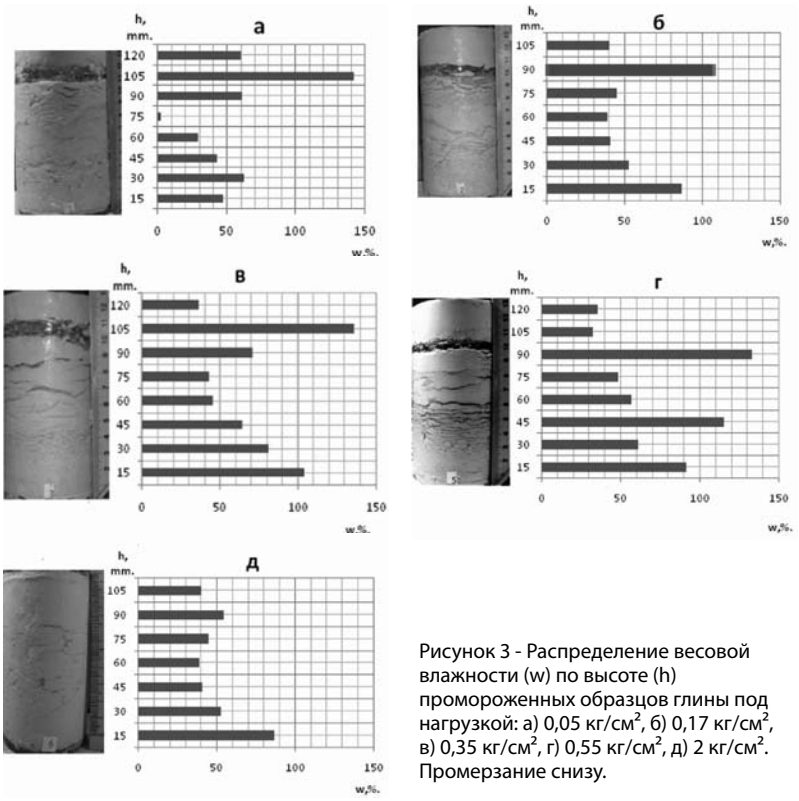


Рисунок 3 - Распределение весовой влажности (w) по высоте (h) промороженных образцов глины под нагрузкой: а) 0,05 кг/см^2, б) 0,17 кг/см^2, в) 0,35 кг/см^2, г) 0,55 кг/см^2, д) 2 кг/см^2. Промерзание снизу.

нужной температуры (+0,2°С) и, соответственно, охлаждает все, что установлено в термокамере, в том числе испытуемые образцы грунта. Теплоизоляция термокамеры должна быть достаточно эффективной, чтобы исключить существенный приток тепла в нее извне. Предварительное охлаждение образцов грунта и термокамеры в целом завершается после достижения температуры в верхней части термокамеры +0,5°С. На этот этап уходит несколько часов.

Термостат переводится на температуру промораживания грунта, например -2,5°С, и включается циркуляция антифриза. Плита (4), приобретая отрицательную температуру, охлаждает нижние слои образца грунта, которые становятся мерзлыми, когда их температура достигнет температуры начала замерзания и ниже. Возникает фронт промерзания, разделяющий образовавшийся мерзлый и вышележащий не мерзлый (или талый) слой грунта.

Контроль над продвижением фронта промерзания во времени и по глубине выполняется с помощью канала (15), где параллельно фронту промерзания движется фазовая граница лед-вода, соответствующая ±00С. Определение местоположения этой границы выполняется датчиком положения. Для более точного совпадение температуры замерзания воды в канале с температурой на фронте промерзания, вместо воды в канал заливается водный раствор, температура начала замерзания которого соответствует температуре начала замерзания испытуемого грунта.

При промораживании пучинистого грунта, поровый раствор из немерзлой зоны перемещается в промерзающую зону, где в диапазоне температур $T_{нз}$ ÷ -0,6°С происходит замерзание избытка влаги с образованием прослоев льда и пучением грунта. В ходе промораживания образца грунта, его деформации пучения фиксируют датчиком положения (13), ЭИБ и АСУ.

Степень морозной пучинистости определяют по формуле [1]:

$$\varepsilon_{fh} = h_f / d_i \qquad (4)$$

где h_f - вертикальная деформация образца грунта в конце испытания, мм; d_i - фактическая толщина промерзшего слоя образца грунта, мм.

Определение степени морозной пучинистости грунтов при переменной внешней нагрузки (рис.1, В) выполняется с помощью АСУ, компрессора, ЭПБ и пневмоцилиндра (17). При этом система пневмопривода работает на поддержание статического давления на промерзающий образец грунта, который пучится, оказывая противодавление на датчик силы и шток (19) пневмоцилиндра.

Испытания проводились на модельных образцах каолинитовой глины, с изначальной влажностью 53 %. Образцы глины помещались во фторопластовые обоймы с толщиной стенки 20 мм, что по нашим наблюдениям исключает промерзание грунта с боков и искажение температурного поля.

Образцы помещались в термостатированный блок, температура охлаждающей плиты поддерживалась -2,5°С, температура зоны подачи воды +0,5°С. Образцы в ходе всего эксперимента находились под заданной постоянной нагрузкой 0,05; 0,17; 0,42; 0,50; 2,0 и 3,0 кг/см^2.

Было проведено три серии экспериментов: 1 – промораживание образцов неконсолидированной глины при различных нагрузках, 2 – то же уплотненной глины до различной плотности, но при промораживании без нагрузки и 3 – промораживание консолидированной глины при нагрузке уплотнения.

Получена неизвестная ранее нелинейная зависимость относительной деформации морозного пучения промерзающего пылеватого грунта от внешнего давления в диапазоне 0 - 3 кг/см^2 (рис. 2). При этом относительная деформация морозного пучения пылеватой глины при давлениях от 0,05 до 0,42 кг/см^2 снижается в зависимости от скорости промерзания 2 - 3 раза, а затем при давлении 0,5 кг/см^2 резко возрастает и становится даже выше, чем при давлении 0,05 кг/см^2. Можно предположить, что сложный характер зависимости морозного пучения грунтов от внешней нагрузки определяется перекрестным эффектом влияния разнонаправленных деформаций пучения промерзающей зоны и усадки (компрессии) талой зоны грунта в ходе его промерзания.

С дальнейшим ростом внешнего давления (от 0,5 до 3 кг/см^2) увеличение относительной де-

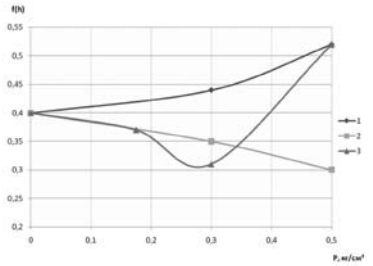


Рисунок 4 - Зависимость относительного морозного пучения f(h) образцов пылеватой глины: 1 - от приложенной грузки (P), без предварительного уплотнения; 2 - с предварительным уплотнением, но при промерзании без нагрузки; 3 - от приложенной нагрузки, с предварительным уплотнением той же нагрузкой.

формации морозного пучения сменяется снижением на порядок и далее очевидно произойдет его полное прекращение, когда внешнее давление сравняется с давлением криогенной миграции.

Как видно из сводного графика (рис. 4) в диапазоне нагрузок 0-0,5 кг/см^2 степень морозного пучения увеличивается с ростом нагрузки в неконсолидированных образцах пылеватой глины, но уменьшается в консолидированных образцах. Первая зависимость, вероятно, объясняется повышением порового давления и, соответственно, усилением криогенной миграции, а вторая снижением влагопроводности глины при ее уплотнении. Третья зависимость имеет более сложный характер, который обусловлен, вероятно, перекрестным эффектом влияния повышения порового давления в глине под влиянием внешней нагрузки и снижения влагопроводности глины при уплотнении. Для однозначного истолкования полученных результатов планируется проведение дополнительных экспериментальных исследований и математическое моделирование процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по гранту 10-05-01151-а.

Литература

1. ГОСТ 28622-90. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (научные руководители В.О. Орлов и В.Г. Чеверев).

2. Гольдштейн М.И. Деформации земляного полотна в основании сооружений при промерзании и оттаивании/М., Трансжелдориздат, 1948.

3. Ершов Э.Д., Чеверев В.Г., Лебеденко Ю.П. Способ определения давления морозного пучения грунтов. Авт. свид. № 1596241. Бюл. 30.09.90.

4. Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Л.: Стройиздат, 1977, 183 с.

5. Пузаков И.А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог/Автотрансиздат, 1960 (Союздорнии).

6. Чеверев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов/М.: Научный мир, 2004, 234с.

ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА ВОДЫ В МОНТМОРИЛЛОНИТЕ ПО ДАННЫМ ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА ЯМР

В.А. Власов, А.Г. Заводовский, М.Ш. Мадыгулов

ИКЗ СО РАН, г.Тюмень, e-mail: zag-2-57@yandex.ru

Методом ЯМР исследована кинетика кристаллизации воды в образцах глины монтмориллонита с влажностью 40–120%. Установлено, что в исследуемых образцах при температурах ниже -8 оС равновесное содержание незамерзшей воды $W_{нз}(T)$ устанавливается практически сразу же после завершения фазового перехода вода-лед и установления температуры образца равной температуре окружающей среды. В дальнейшем для большинства исследуемых образцов содержание незамерзшей воды не менялось в течение более 10 суток и соответствовало $W_{нз}(T)$. Однако в неоднородных по влажности образцах отмечены отклонения от $W_{нз}(T)$ заметно превышающие экспериментальную погрешность. Согласно полученным данным по времени ожидания начала спонтанной кристаллизации поровой влаги долговременная релаксация фазового состава воды в изотермических условиях является следствием преднуклеационных явлений, вклад которых зависит от влажности и температуры образцов. Получено, что уменьшение величины переохлаждения и влажности замедляет установление фазового равновесия в глинистых минералах за счет роста времени жизни метастабильного состояния поровой влаги.

Одним из важнейших показателей, учитываемых при оценке прочностных и теплофизических свойств мерзлых грунтов является равновесное содержание незамерзшей воды $W_{нз}(T)$ [1], которое устанавливается не сразу же после достижения температуры образца, равной температуре окружающей среды, а спустя некоторое время [2,3].

Считается, что изменения фазового состава воды дисперсных сред в изотермических условиях вызваны целым рядом причин [3]. Вследствие этого они характеризуются широким спектром характерных времен релаксации τр содержания незамерзшей воды $W_{нз}(T)$ к равновесному значению $W_{нз}(T)$ при данной температуре среды Т [4-7]: τр меняется от нескольких секунд до нескольких суток в зависимости от влажности, дисперсности и химико-минералогического состава среды. При этом имеющиеся сведения о долговременных изменениях фазового состава воды [3, 6] противоречивы. В ряде случаев они являются косвенными данными и не всегда потверждены экспериментом, позволяющим непосредственно измерять количество незамерзшей воды в процессе ее изменения. Все это сдерживает установление обоснованных критериев подобия при сопоставлении и анализе результатов лабораторных и полевых измерений параметров мерзлых грунтов.

В данной работе массу жидкой фазы воды в образцах монтмориллонитовой глины определяли по методике 90о-го импульса [8] при использовании протонного ЯМР -релаксометра с резонансной частотой на ядрах водорода 30 МГц. При этом погрешность определения массы жидкой фазы воды в рабочем интервале температур -5 ÷ -10°С и влажностей 40÷120 % не превышала 2 мг.

Для проведения ЯМР - измерений образцы монтмориллонита необходимой влажности готовили путем тщательного перемешивания и растирания сухого пылевидного порошка глины с определенным количеством воды до получения однородной пластичной массы. Затем приготовленной смесью заполняли стеклянные пробирки радиусом 4 мм с высотой заполнения не превышающей 10 мм. Для более полного распределения жидкости по всему объему образца их помещали в эксикатор с влажной средой и выдерживали при комнатной температуре в течение не менее суток. С целью предотвращения изменений исходной влажности перед началом измерений пробирки герметизировали.

Как следует из анализа полученных данных, после достижения некоторого начального переохлаждения, разного для исследуемых образцов, отмечалось скачкообразное повышение температуры и резкое уменьшение $W_{нз}(T)$ в результате гетерогенной нуклеации льда и последующего роста образованных при этом зародышей твердой фазы воды (рис. 1). В последующем процесс кристаллизации замедлялся, отражая в первую очередь динамику изменения температуры образцов. При этом повышение температуры закономерно привело к уменьшению величины переохлаждения и, соответственно, к снижению скорости кристаллизации. Последующее снижение температуры не ускорило массовое образование льда, т. к. специфика воды в дисперсных средах предполагает постепенное включение в процесс кристаллизации более связанных слоев воды, которые к тому же превращаются в лед при соответствующих им отрицательных температурах среды.

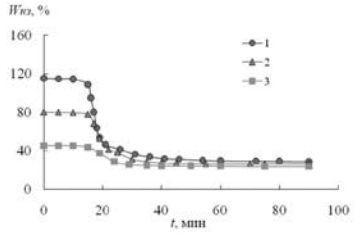


Рисунок 1 - Динамика изменения содержания незамерзшей воды для образцов глины монтмориллонита с исходной влажностью: 1- W = 115%; 2 – W = 80%; 3- W = 45%. Температура среды Тср = - 10°С.

Следует отметить, что после завершения фазового перехода вода-лед в среднем через 1 час устанавливалось тепловое равновесие между образцом и окружающей средой. При этом для большинства из 40 исследуемых образцов по истечении этого времени отклонение содержания незамерзшей воды от равновесного значения не превышало 1% (рис.1). В дальнейшем содержание незамерзшей воды оставалось неизменным в течение более 10 суток и

Таблица 1 - Зависимость времени жизни (указано в минутах) переохлажденного состояния воды в образцах глины монтмориллонита от температуры среды и исходной влажности

Влажность	Температура среды, °С							
W, %	-5.0	-5.2	-5.4	-5.6	-5.8	-6	-8	-10
45	*	*	*	*	*	*	-	0
60	*	*	*	*	90	20	0	0
65	*	*	*	30	12	8	0	0
80	*	*	*	50	0	0	-	0

соответствовало $W_{нз}(T)$.

Из общего числа исследуемых образцов только 4 образца с исходными влажностями 68%, 55%, 90% и 40% показали заметные отклонения содержания незамерзшей воды от равновесного значения после установления в них изотермических условий. Так, например, для образцов с влажностью 40% и 55% величина этих отклонений превышала 10% абсолютной влажности, что значительно больше погрешности эксперимента. По нашему мнению, причина этого связана с нарушением общей методики приготовления образцов: использовались свежеприготовленные образцы, которые, по всей видимости, изначально были неоднородны по влажности. Предположительно, в соответствии с основными результатами работы [9], в этих образцах могло иметь место проявление индукционного эффекта: длительное существование при отрицательных температурах метастабильной воды, находящейся в изолированных объемах и, соответственно, кристаллизующейся в спектре температур и различные моменты времени в силу вероятностного характера образования жизнеспособных зародышей льда.

Для проверки данной гипотезы был изготовлен образец заведомо неоднородный по влажности и состоящий из трех автономных областей с исходными влажностями 43%, 70% и 90%. Как и ожидалось, при различных отрицательных температурах среды наблюдался растянутый по времени фазовый переход вода–лед.

Для установления конкретных значений преднуклеационного периода ожидания растущих зародышей льда в специально поставленных экспериментах были определены характерные времена ожидания начала кристаллизации переохлажденной воды, находящейся в монтмориллонитовой глине. Основные результаты этих исследований представлены в таблице.

Знак “*” означает, что образец не кристаллизовался в течение более 8 часов; “-” – измерения не проведены; “0” – образец кристаллизовался практически сразу же после достижения заданной температуры среды или раньше.

Наглядно видно, что в соответствующей области температур и влажностей индукционный период ожидания начала спонтанной кристаллизации поровой воды отличен от нуля. При этом следует особо отметить, что для каждого из приведенных в таблице образцов время ожидания зародышеобразования резко возрастает в узком температурном диапазоне и при некоторых температурах весьма чувствительно к изменению влажности.

Все это дает основания считать, что при использовании неоднородных по влажности и температуре образцов действительно может наблюдаться растянутый по времени процесс фазового перехода вода - лед. При этом, по всей видимости, определяющее влияние этого эффекта следует ожидать для образцов малой и средней степени влажности, где наиболее вероятнее образование локальных невзаимодействующих областей грунта, отличающихся друг от друга влажностью. Предполагаем, что для сильновлажных образцов монтмориллонита проявление индукционного эффекта возможно при температурах близких к 0°С. Однако этот вопрос остается открытым и требует дополнительных экспериментальных исследований.

В заключении следует отметить, что полученные данные носят предварительный характер и планируются дальнейшие исследования неравновесной кристаллизации воды в капиллярно-пористых и дисперсных средах. При этом предполагается использование также модельных систем.

Список литературы

1. Ершов Э.Д., Акимов Ю.П. Фазовый состав влаги в мерзлых породах.- М.:Изд-во МГУ, 1979, 188 с.

2. Чистотинов Л.В. О релаксационном характере кинетики кристаллизации связанной воды в горных породах//Проблемы геокриологии.- Новосибирск: Наука, 1973, С.50–64.

3. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.А. Криогенные физико - геологические процессы и их прогноз.- М.: Недра, 1980, 383 с.

4. Яницкий П.А. Кинетика фазовых переходов влаги при промерзании и оттаивании. Автореф. дис. …канд. геол. – минер. наук.- М.: МГУ, 1983, 21 с.

5. Нестеров И.И., Даниэлян Ю.С., Яницкий П.А., Галиева В.Н. Неравновесная кристаллизация влаги в мерзлых грунтах//ДАН СССР, 1984, №4, т.277, С.928–935.

6. Литван И.И., Бровко Г.П., Давыдовский П.Н. Исследование фазового состава воды в торфе калориметрическим методом//Инж. Геология, 1985, №4, С.114–122.

7. Поденко Л.С., Заводовский А.Г., Блащаница В.Ф., Кутергин О.Б. Кинетика кристаллизации воды в капиллярно- пористых средах по данным микрокалориметрии и ЯМР//Инженерно - геокриологическое обеспечение строительства сооружений.- Новосибирск: Наука, 1989, С.36–41.

8. Чижик В.И. Ядерная магнитная релаксация. Учебное пособие. Л.: Изд-во ЛГУ, 1991, 256 с.

9. Гречищев С.Е., Павлов А.В., Шешин Ю.Б., Гречищева О.В. Экспериментальные закономерности формирования переохлажденной поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов//Криосфера Земли, 2004, т.VIII, №4, С.41-44.

СИНТЕТИЧЕСКИЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ СПЛАВЫ – НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов

Пермский научно-исследовательский политехнический университет, anutapages@gmail.com

Одна из основных характеристик материалов, эксплуатирующихся в условиях низких температур, это морозостойкость. Морозостойкость – способность материала в насыщенном водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание без видимых признаков разрушения и без значительного понижения прочности. Основная причина разрушения материала под действием низких температур — расширение воды, заполняющей поры материала, при замерзании. Исходя из этого можно утверждать, что морозостойкость находится в прямой зависимости от водонасыщения материала, и от его пористости, в особенности поверхностной пористости, ведь насыщение материала жидкостью начинается с микроконтактов на поверхности.

Однако, если посмотреть на проблему повышения морозостойкости иначе становится очевидным, что иным и одновременно более перспективным путем ее повышения является и использование не тех материалов которые длительное время не разрушаются при оттаивание и замораживание в водонасыщенном состояние, а тех которые в принципе не впитывают воду, ведь таким образом сам деструктивный фактор как таковой будет исключен.

Традиционно в условиях пониженных температур используются морозостойкие бетоны и хладостойкие сплавы, как правило, эти материалы дороже обычных металлов и строительных материалов, современные технологии их производства стремятся к снижению стоимости материалов с повышенной морозостойкостью. Именно поэтому материал, который был бы способен противостоять низким температурам за счет низкого водонасыщения должен быть приемлем для практического использования и из экономических показателей.

Материалами сочетающим в себе и низкое водонасыщение и приемлемую стоимость являются синтетические минеральные сплавы.

Таблица 1 - Химический состав симиналов

Разновидность симинала	Содержание масс., %								
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	K_2O+Na_2O	FeO	Fe_2O_3	Cr_2O_3
На основе габброидных пород	47,3	2,3	12,5	8,3	9,5	2,1	10,9	3,4	0,5
На основе базальтоидных пород	45,5	1,7	15	12	11,5	2,4	9,1	3,5	-

Таблица 2 - Обзор основных физических и механических свойств камнелитых материалов и его традиционных аналогов

Показатель	Симиналы			Серый чугун СЧ12	Огне-упорный кирпич	Бетон ПКБП-441
	Износо-стойкое	Термо-стойкое	Шлаковое			
Объемная масса, кг/м^3	2900-3000	2800-3000	2900-3000	7200	2200	1900
Предел прочности при сжатие, МПа	200-500	150-350	200-450	500	23	45
Предел прочности при изгибе, МПа	20-50	15-40	20-45	280	5	4
Водопоглащение,%	0,1	0,7	0,2	-	11,0	10,0
Ударная вязкость, кДж/м^2	1,25	1,06	1,10	3,00	-	1,20
Модуль упругости, МПа	100500	45000	84000	120000	10000	18000
Термостойкость, °С	200	900	850	-	1000	1100
Теплопроводность при 20° С, Вт/(м·С)	1,52	1,07	1,37	51,00	1,00	0,83

Таблица 3 - Обзор показателей стоимости и долговечности дорожных покрытий

Показатель	Материал			
	Натуральный камень	Асфальтобетон	Симинал	Искусственный камень
Твердость по Моосу	3-8	2-4	6-8	2-4
Износостойкость, г/см^2	1,0-5,5	3,0-8,0	1,0-2,0	2,0-6,0
Кислотостойкость, %	85-99	60-90	85-97	70-80
Морозостойкость, кол-во циклов	200-350	50-80	200-300	20-60
Средний межремонтный срок службы, лет	15-30	2-3	15-25	8
Стоимость 1 м^2 с учетами расходов на монтаж, руб.	900-1500	450-600	600-800	500-600

Синтетические минеральные сплавы (симиналы) - материалы, полученные в результате высокотемпературного синтеза (плавления) минерало-оксидных соединений ультраосновного и основного характера, природного и техногенного происхождения (базальты, габбро-диабазы, металлургические шлаки и т.д.).Технология по которой производят симиналы называют «каменным литьем».

Обычно камнелитые изделия используются для работы в условиях абразивного износа, а так же для нужд дорожного строительства и т.д. Как правило, в процессе эксплуатации изделия, полученные по технологии каменного литья, испытывают на себе действие сжимающих нагрузок, поскольку симиналы как правило обладают повышенной хрупкостью и динамические нагрузки переносят значительно хуже. [1]

Основные свойства симиналов в сравнение со свойствами других более известных материалов для наглядности, а так же химический состав и экономические параметры представлены в табл. 1-3.

Представленные характеристики, в особенности значения водонасыщения и морозостойкости позволяют рассматривать симиналы как материалы для работы в условиях пониженных температур. Однако, из приведенных данных не ясен характер их поведения в таких условиях. Целью настоящего исследования является установление количественных характеристик деформации и разрушения симиналов в различных температурных условиях.

Установить количественные характеристики деформации и разрушения симиналов можно с помощью проведения механических испытаний. Существуют стандартные методики для таких испытаний, однако они имеют ряд недостатков, прежде всего к таковым относятся жесткие требования к форме и размерам образцов. Это осложняет проведение таких испытаний на симиналах, поскольку они плохо обрабатывается резанием, так же стандартные методики не рассматривают возможность использования современного оборудования. [3]

При испытание камнелитых материалов важно, что бы форма образца не оказывала существенное влияние на результаты. Такое возможно только при использовании наиболее современного оборудования. В своих исследованиях мы использовали универсальную испытательную машину (УИМ) марки Zwick – Z250 (Германия) [1]. В процессе испытаний фиксируются значения подаваемой нагрузки, момент инерции, величина деформации и продолжительность испытаний. Управление ходом испытаний и фиксирование их результатов производится с помощью персонального компьютера синхронизированного с установкой. Образцы для проведения испытаний с помощью установки Zwick – Z250 могут быть любой формы, как предусмотренной стандартами, так и любой другой удобной для исследователя, в качестве образцов могут так же выступать готовые детали и их элементы.

В данной работе в качестве образцов использовались бруски в форме параллелепипеда 18х12х15 мм, вырезанный из тела плитки отлитой из износостойкого симинала.

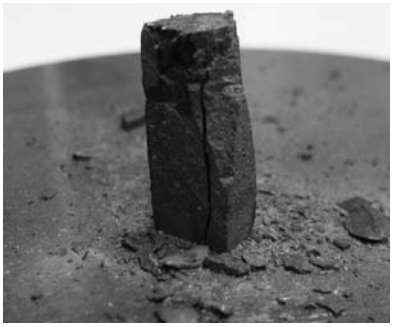


Рисунок 1 - Внешний вид образца после проведения испытаний

В данном исследование рассматриваются результаты измерений величины прочности образцов на сжатие, полученные при проведение стандартных испытаний.

Результаты, полученные в ходе испытаний, с помощью программного обеспечения формировались в виде готовых отчетов, содержащих изображения диаграмм, а так же числовые значения показателей нагрузки, при которой происходило разрушение образцов. Разрушение образцов происходило постепенно, небольшие части образца откалывались от его поверхности, сердцевина образцов в той точке, где была приложена нагрузка оставалась целой даже после того как от него откололось уже 60% всего объема (рис. 1).

Общий уровень предела прочности на сжатие испытуемого симинала составил порядка 230 МПа.

Подробный анализ полученных диаграмм позволил выявить характерные особенности поведения симиналов под воздействием сжимающей нагрузки. Кривые, полученные в результате испытаний имеют пилообразный характер, резкие, небольшие по высоте пики, фиксируют момент, когда в структуре симинала под воздействием нагрузки произошли полиморфные изменения. Эти превращения не приводят к разрушению, они компенсируют действие нагрузки, материал, таким образом, подстраивается под внешние условия. К развитию трещины приводит накопление напряжения, возникающего между отдельными структурными составляющими. Высокие резкие пики свидетельствуют о частичном разрушение, скалывание частицы образца с поверхности. Пики более высокие или глубокие и пологие свидетельствуют о начале развития микротрещин в образцах симиналов перед их разрушением.

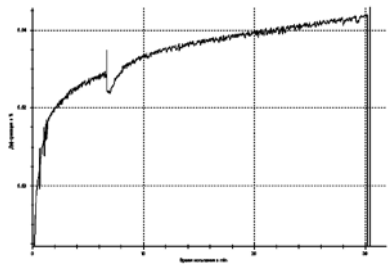


Рисунок 2 - Зависимость величины деформации от времени приложения нагрузки

Возможности оборудования позволяют проводить эксперименты и при статических нагрузках и тем самым устанавливать величину ползучести испытуемых материалов. На рис. 2 представлена диаграмма, описывающая величину деформации от времени приложения постоянной максимально допустимой сжимающей нагрузки. Установлено, что величина ползучести симиналов не превышает 5,5%.

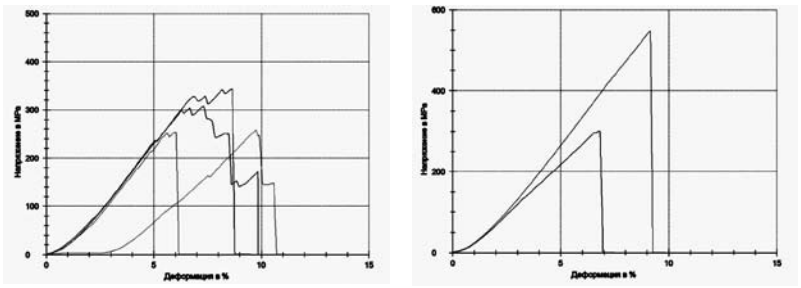
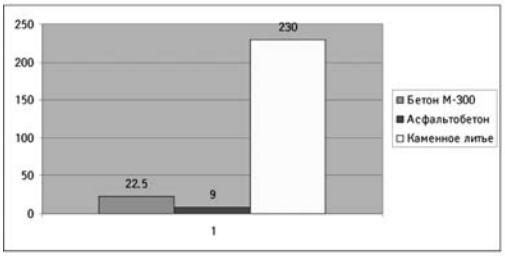


Рисунок 3 - Диаграммы испытаний на сжатие при различных температурах: а – при -40°С, б – при 150°С

Испытательная машина, с помощью которой производились эксперименты позволяет проводить испытания по установлению предела прочности на сжатие в условиях различных температур. Нами были проведены испытания при температуре – 40°С и при темпе-



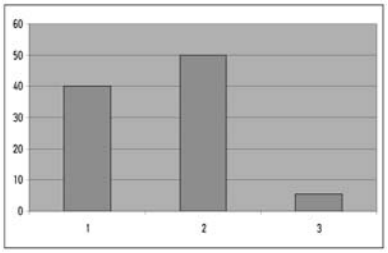


Рисунок 4 - Сравнение механических характеристик каменного литья и обще распространенных материалов: а – прочность на сжатие, МПа, б – ползучесть, % (1- бетон М-300, 2 – асфальтобетон, 3 – симиналы)

ратуре 150°С, время проведения обоих испытаний составило 10 мин. Результаты представлены на рис. 3.

В результате испытаний установлено, что при высоких температурах симиналы реагируют на сжимающую нагрузку более равномерным деформированием, чем при пониженных, величина деформации в таких условиях ниже при тех же нагрузках, что при испытаниях в низких температурах, само же разрушение происходит при приложение более высоких нагрузок. В среднем разница между показателями составила 10%, такая разница не является значительной, хотя при пониженных температурах образцы как правило разрушались на большее количество фрагментов.

Для того, что бы проиллюстрировать результаты, полученные в ходе механических испытаний мы произвели сравнение этих характеристик с аналогичными показателями более распространенных материалов – асфальтобетона и тяжелого бетона марки М-300. Результаты представлены в виде диаграмм на рис. 4. [5]

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что прочность на сжатие камнелитых изделий на основе базальта составляет 230 МПа, при этом величина ползучести не превышает 5,5%, установлено, что камнелитые изделия практически одинаково хорошо работают как при повышенных так и при пониженных температурах. Сравнительный анализ характеристик каменного литья с известными аналогами доказал перспективность его внедрения в строительство и дорожное благоустройство регионов, где пониженные температуры являются обычным условием эксплуатации таких материалов.

Список литературы

1. Игнатова А.М., Мерзляков А.Ф., Ханов А.М. Методика и оборудование определение предела механической прочности на сжатие литых образцов синтетических минеральных сплавов. // «Вестник Пермского государственного технического университета «Машиностроение. Материаловедение» . - №3, т.12, 2010. – с. 123-133.
2. Шемякин Е.И. О свободном разрушении твердых тел. // Докл. АН СССР, 1988, т.300 – с.1090-1094.
3. Спивак А.И. Механика горных пород. М. 1967.- 192 с
4. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М., 1990.- 400 с.
5. Физические величины: Справочник/А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. - М., Энергоатомиздат, 1991.- 356 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Гости и участники Конференции 6

Пленарные доклады 11

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Вельчев С.П. **Этапы, проблемы и технические решения по строительству оснований на вечномерзлых грунтах** 12

Кушнир С.Я. **Трубопроводный транспорт в условиях мерзлых грунтов** 18

Часть 1

Температурная стабилизация вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений при строительстве по I принципу 24

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Мельникова Е.А., Канова К.Н., Посконина Е.А. **Глубинные коллекторные СОУ – новый шаг при строительстве уникальных объектов на примере Вилюйской ГЭС-3** 25

Грузин А.В., Кучеренко М.В. **Применение перспективных видов свай для сооружения нефтегазовых объектов в условиях вечной мерзлоты** 32

Аникин Г.В., Спасенникова К.А. **Расчет глубинных сезонных охлаждающих устройств** 33

Долгих Г.М., Окунев С.Н, Стрижков С.Н., Паздерин Д.С., Гилев Н.Г. **Исследования систем температурной стабилизации грунтов на опытно-промышленном полигоне** 36

Спасенникова К.А. **Компьютерное моделирование системы охлаждения грунта под резервуаром с нефтью** 43

Стрижков С.Н., Загребнев А.С. **Тепловизионные исследования и инфракрасная диагностика систем ТСГ в натурных условиях** 46

Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В, Прокопенко И.Ф., Штефанов Ю.П. **Разработка термостабилизатора круглогодичного действия** 56

Захарова В.Н., Бургутова Н.А. **Выбор принципа строитель ства и технических решений по применению температурной стабилизации грунтов в условиях недостаточной информации о грунтах** 59

Рыкова В.В. **Инженерное мерзлотоведение: информационное сопровождение проблемы и анализ документального потока** 67

Матюхова В. А., Анфилофьева О. С. **Алгоритм принятия технических решений при проектировании систем температурной стабилизации грунтов оснований** 71

Андриянов А.И. **Железная дорога на «вечной» мерзлоте** 77

Тищенко Т. И., Гусев А. Ю. **Технические решения по термостабилизации грунтов устьев нефтяных и газовых скважин** 80

Аникин Г.В., Плотников С.Н. **Компьютерное моделирование работы систем горизонтального охлаждения грунтов** 84

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Паздерин Д.С., Гилев Н.Г. **Исследование ТК с использованием климатических камер и в условиях опытно-промышленного полигона** 88

Штефанов Ю.П., Штефанова О.Ю. **Предприятие «Ньюфрост»: опыт создания термостабилизаторов, проблемы и перспективы** 95

Захарова В.Н., Бекирова С.А. **Прогнозные исследования и технические решения по термостабилизации устья нефтяных и газовый скважин** 97

Меркушина В.В. **Применение полиорганосилоксановых покрытий в борьбе с морозным выпучиванием свай и фундаментов** 103

Безволев С.Г., Цеева А.Н. **Обоснование применения забивных и бурозабивных свай в таликовых зонах, залегающих на многолетнемерзлой толще** 106

Верхотуров А.Г. **Влияние деградации многолетнемерзлых пород на условия разработки месторождений полезных ископаемых в Забайкалье** 114

Стрижков С.Н., Рубель О.Ю. **Исследование геотехнических систем с различными видами устройств термостабилизации грунтов оснований** 117

Крылов Д.А., Сидняев Н.И., Федотов А.А. **Математическое моделирование распределения температурных полей в вечномерзлых грунтах** 126

Сердобов В.Б., Морозов Р.В., Тагиева Н.К. **Процесс скалывающего рыхления мерзлых грунтов и конструкции рыхлителей статического действия** 133

Сивцев А.И., Рожин И.И. **Нетрадиционный флюидоупор мерзлотно-гидратного генезиса** 138

Кузьмин Г.П., Панин В.Н. **О работе воздушного охлаждающего устройства в опытном подземном хранилище семян растений** 143

Чихарев В.А. **Картографирование солифлюкционных склонов** 146

Стрижков С.Н. **Результаты и стратегия инновационных исследований управления науки и проектирования НПО «ФСА»** 148

Сидняев Н.И., Храпов П.В., Разгуляев С.В. **Обзор и анализ устройств и систем для охлаждения и замораживания грунтов** 156

Часть 2

Устойчивость и надежность зданий и инженерных сооружений на вечномерзлых грунтах. Температурный режим вечномерзлых грунтов при хозяйственном освоении регионов и колебаниях климата 184

Матковский В.Н., Пульников Е.А., Лукин Д.В., Кистанов О.Г. **Некоторые вопросы проектирования инженерных сооружений газпромыслового комплекса в условиях севера Западной Сибири на примере заполярного НГКМ** 185

Горелик Я.Б., Романюк С.Н. **Динамика температурного поля и границ протаивания в зоне действия двух вертикальных скважин** 188

Шабаров А.Б., Бахмат Г.В., Михайлов П.Ю., Вакулин А.А., Суровцев И.А. **Экспериментальное исследование теплосилового взаимодействия заглубленного трубопровода с мерзлым грунтом** 191

Сажин А.Ф. **Энергоэффективность использования СОУ для жилых зданий и помещений** 197

Евженко А.Н., Плеханов С.В., Гольцов А.В. **Вопросы качества, влияющие на эффективность работы сезонно-охлаждающих устройств (СОУ)** 201

Достовалов В. Б., Королев А. А. **Динамические смещения в пределах полей развития аллювиальных отложений Бестяхской террасы реки Лена** 208

Горелик Я.Б., Романюк С.Н. **Динамика температурного поля и границ промерзания в зоне действия одиночного трубопровода с холодным теплоносителем** 212

Барышников В.А., Ведров Л.А., Стрижков С.Н., Вельчев С.П. **Повышение качества строительства и эксплуатации систем ТСГ за счет внедрения инновационных методов и совершенствования технологий** 215

Шабаров А.Б., Михайлов П.Ю., Шастунова У.Ю., Вакулин А.А., Суровцев И.А. **Физико-математическое моделирование полей температуры и льдистости в мерзлых грунтах вокруг заглубленного трубопровода** 225

Кондратьев В.Г. **Как обеспечить стабильность железных дорог в криолитозоне** 230

Гусенков А.А., Колдасов Н.В. **Разработка и внедрение методов повышения качества СМР на объектах с системами температурной стабилизации грунтов** 234

Матковский В.Н., Пульников Е.А., Лукин Д.В., Кистанов О.Г. **Закономерности формирования температурного режима грунтов на промышленных площадках в условиях Заполярного месторождения** 238

Варламов С.П., Скрябин П.Н. **Тепловой режим грунтов основания насыпи железной дороги на участке распространения пород ледового комплекса** 241

Сидняев Н.И. Мельникова Ю.С., Храпов П.В., Гласко А.В. **Влияние температурного режима вечномерзлых грунтов на надежность оснований** 247

Мельников А.Е., Павлов С.С. **Постановка вопроса о роли криогенного выветривания в устойчивости железнодорожного полотна Амуро-Якутской магистрали (на примере участка Томмот-Кердем)** 257

Заболотник С.И., Заболотник П.С. **Термический режим грунтов в основании зданий Якутской ТЭЦ** 260

Васильчук А.К. **Опасность пучения при эксплуатации магистральных трубопроводов** .. 269

Шабаров А. Б., Михайлов П. Ю., Вакулин А.А., Вилков М.Н., Суровцев И.А. **Физико-математическое моделирование теплосилового взаимодействия заглубленного трубопровода с мерзлым грунтом 280**

Попов А.П., Самсонова В.В. **Использование естественного криогенного ресурса, программных средств нестационарного численного прогноза, технических средств управления прочностью и устойчивостью грунтовых оснований, как методологическая основа обеспечения и целенаправленного управления механической безопасностью промышленных и гражданских объектов в процессе их эксплуатации в криолитозоне** 282

Исаков В.А., Наумов М.С., Телков Ф.С. Результаты обследования грунтов основания железной дороги Улак – Эльга на участке 0 – 54 км 293

Пронозин Я.А., Епифанцева Л.Р., Порошин О.С., Наумкина Ю.В **Применение мембранных фундаментов на многолетнемерзлых основаниях, проектируемых по II принципу** 298

Бахмат Г.В., Кислицын А.А, Шастунова У.Ю. **Методика расчета теплового режима резервуара типа РВС в зимнее время во время эксплуатации** 301

Кондратьев В.Г., Дементьев А.Д., Кондратьев С.В. **Опыт оценки наледной опасности и разработки противоналедных мероприятий для водопропускных сооружений на одном из участков федеральной автодороги «Амур» Чита – Хабаровск**..... 306

Часть 3

Геотехнический мониторинг промышленных и гражданских объектов и экологические проблемы строительства на вечномерзлых грунтах..... 310

Стрижков С.Н., Скорбилин Н.А. **Геотехнический мониторинг как критерий оценки надежности объектов с системами температурной стабилизации грунтов**..... 311

Быкова А.В., Лобастова С.А. Геотехнический мониторинг термоэрозионно-эрозионных процессов и оврагообразования в природно-технических системах криолитозоны 321

Сорокин Р.В. **К вопросу об оценке геохимической, биологической, литогенетической устойчивости ландшафтов на примере лесотундрового Надым-Пуровского Междуречья** 325

Никоненко В.А. **Метрологическое обеспечение модернизированных эталонов России: средства измерения температуры, теплопроводности и тепловых потоков**..... 329

Волкова Е.В. **Результаты сравнения геокриологического мониторинга систем температурной стабилизации грунтов оснований различных производителей** 335

Кропачев Д.Ю., Амосова Е.В., Паздерин Д.С. **Система мониторинга температур протяженных объектов в вечномерзлых грунтах**..... 341

Стрижков С.Н., Скорбилин Н.А. **Анализ результатов длительный наблюдений за геотехническими системами в криолитозоне** 345

Макаров В.Н. **Эколого-неохимические проблемы освоения Чаяндинского Нефтегазоконденсатного месторождения** 350

Капитонова Т.А., Левин А.И., Стручкова Г.П. **Анализ рисков газодобывающей отрасли Республики Саха (Якутия)** 354

Рузов Ю.В., Самсонова В.В. **Криогенные процессы как фактор риска при эксплуатации трубопроводов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов** 361

Познаркова С.В., Тананаев Н.И. **Геокриологические условия и формирование геотемпературного поля под лабораторным корпусом Игарской геокриологической лаборатории ИМЗ СО РАН** 365

Нерадовский Л.Г., Мельчинов В.П. **Экспериментальные исследования новых возможностей метода георадиолокации в криолитозоне Якутии** 370

Андриянов А.И. **Вечная мерзлота и глубокое сезонное промерзание грунтов, криогенные процессы и явления как природный феномен**..... 380

Акимов М.П. **Влияние подземного трубопровода теплоснабжения на вечномерзлые грунты** 382

Литовко А.В. **Геокриологические условия пород «ледового комплекса» и их воздействие на ж/д АЯМ «Беркакит-Томмот-Якутск»** 386

Лапердин В.К., Юшкин В.И. **Опытно-экспериментальные исследования криогенеза и меры направленные на ослабление его развития (на примере площадки автозаправочного комплекса в посёлке Магистральном – БАМ)** 391

Стрижков С.Н., Рубель О.Ю. **Инновационные подходы к проектированию и строительству полигонов твердых бытовых отходов в криолитозоне** 397

Часть 4

Теплофизика, физико-химия и механика мерзлых грунтов 401

Старостин Е.Г. **Влияние темпа охлаждения на переохлаждение поровой воды** 402

Рожин И.И., Степанов А.В., Цеева А.Н. **Моделирование искусственного замораживания грунтов при продувке воздуха через полые сваи в зимнее время** 405

Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. **Растепление многолетнемерзлых пород от нескольких добывающих скважин** 410

Степанов А.В., Тимофеев А.М., Рожин И.И., Попенко Ф.Е. **Расчет теплового влияния проектируемого подземного коллектора на окружающий массив мерзлых грунтов** ... 414

Колунин В.С., Колунин А.В., Писарев А.Д. **Теплопроводность мерзлых пористых материалов вблизи температуры начала замерзания** 419

Старостин Е.Г. **Определение незамерзшей воды методом кинетики кристаллизации** 422

Иудин М.М. Коэффициент **Пуассона и модуль упругости многолетнемерзлых горных пород и грунтов** 426

Варламов С.П., Скрябин П.Н. **Тепловой режим грунтов основания насыпи железной дороги на участке распространения пород ледового комплекса** 430

Шабаров А.Б., Григорьев Б. В., Вакулин А.А. **Калориметрический метод определения содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах** 436

Колмогоров А.В.. **Математическое моделирование изменения физико-механических свойств влажных грунтов оснований при циклических морозных воздействиях** 438

Шавлов А.В., Рябцева А.А., Писарев А.Д. **Коррозия на контактах металлов со льдом** 441

Чеверев В.Г., Бурнаев Р.С., Гагарин В.Е., Сафронов Е.В. **Физическое моделирование промерзания пылеватой глины при переменном внешнем давлении** 444

Власов В.А., Заводовский А.Г., Мадыгулов М.Ш. **Изменения фазового состава воды в монтмориллоните по данным импульсного метода ЯМР** 448

Игнатова А.М., Игнатов М.Н. **Синтетические минеральные сплавы – новый материал для эксплуатации в условиях пониженных температур** 450

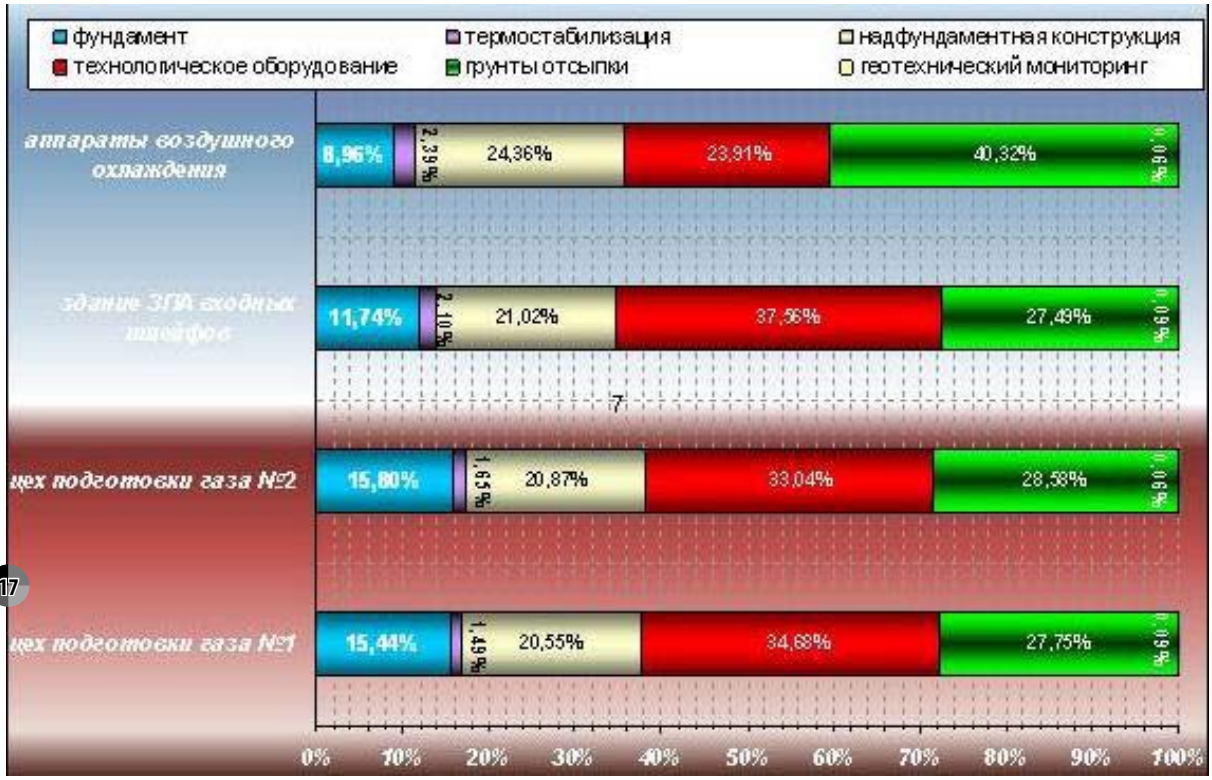


Рис.22 Распределение капитальных затрат при строительстве зданий и сооружений на Бованенковском месторождении (данные института ВНИПИгаздобыча)

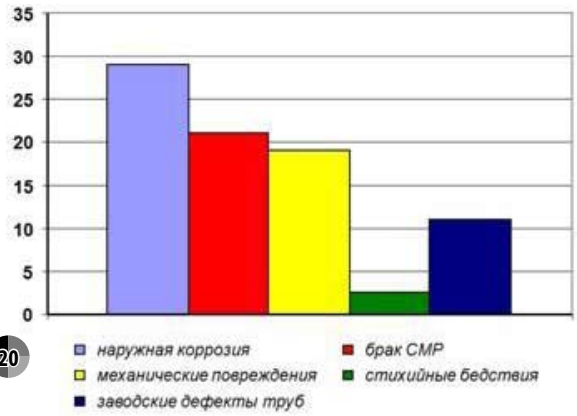


Рис. 8 Причины отказов на магистральных трубопроводах ОАО «Газпром»

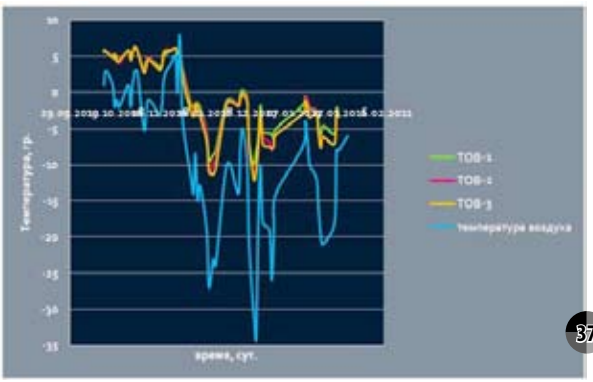


Рисунок 4 - Средняя температуры вертикальных охлаждающих труб с течением времени.

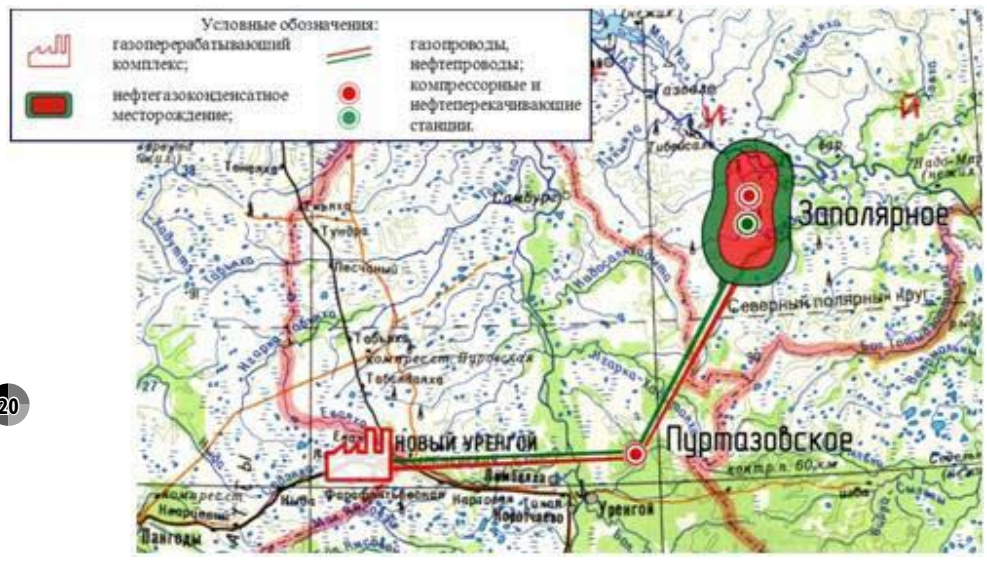


Рис. 10 Заполярное месторождение

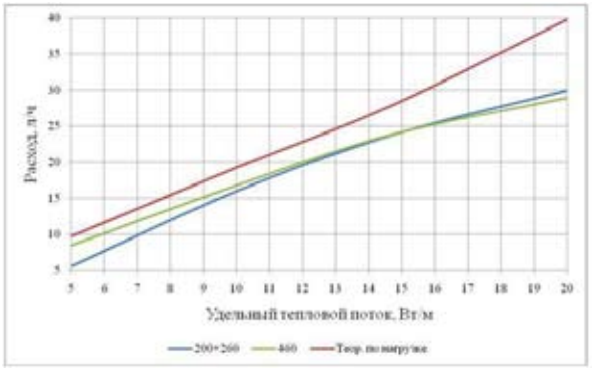


Рисунок 11 - Изменение расхода конденсата от нагрузки

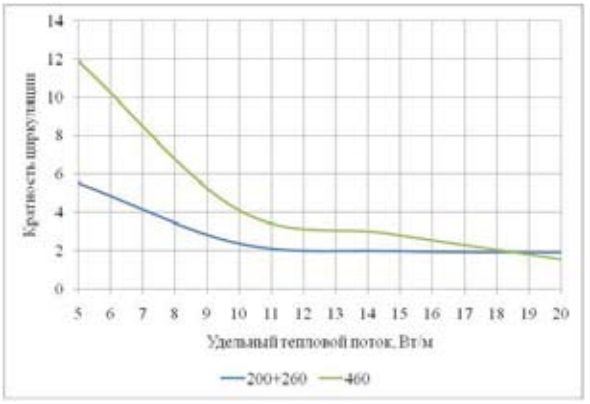


Рисунок 12 - Изменение Кратности циркуляции от нагрузки

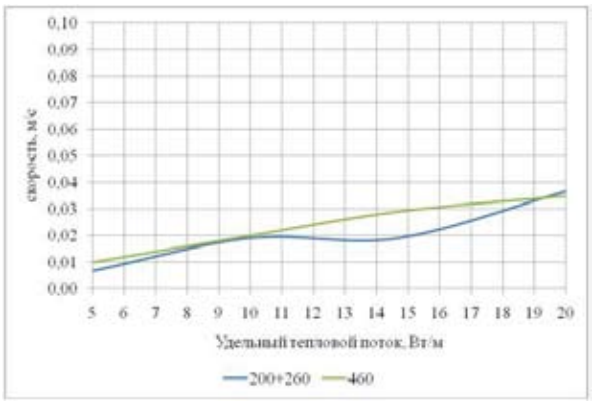


Рисунок 13 - Изменение скорости движения хладагента на входе в испаритель от нагрузки

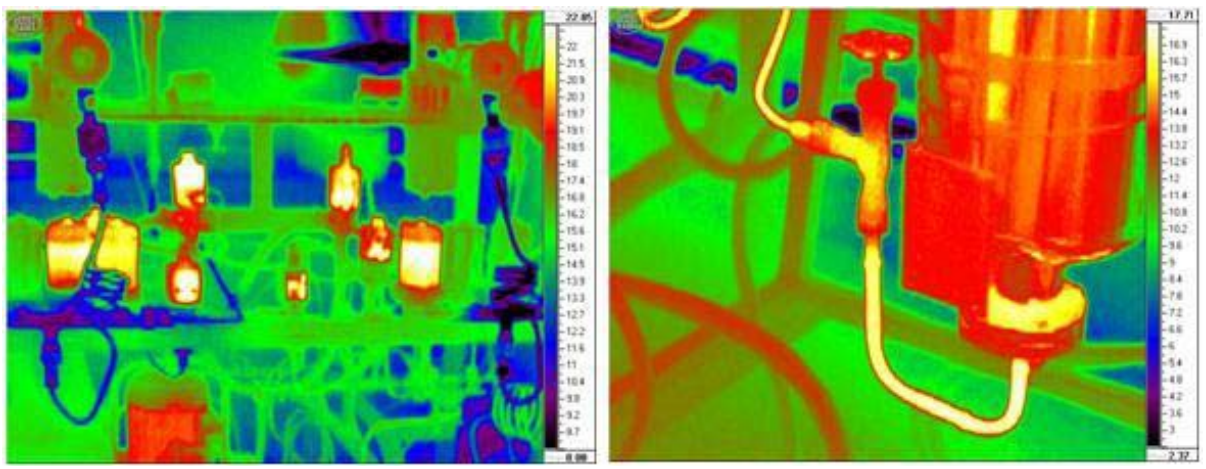


Рисунок 2 - Термограммы процесса заправки индивидуальных термостабилизаторов.

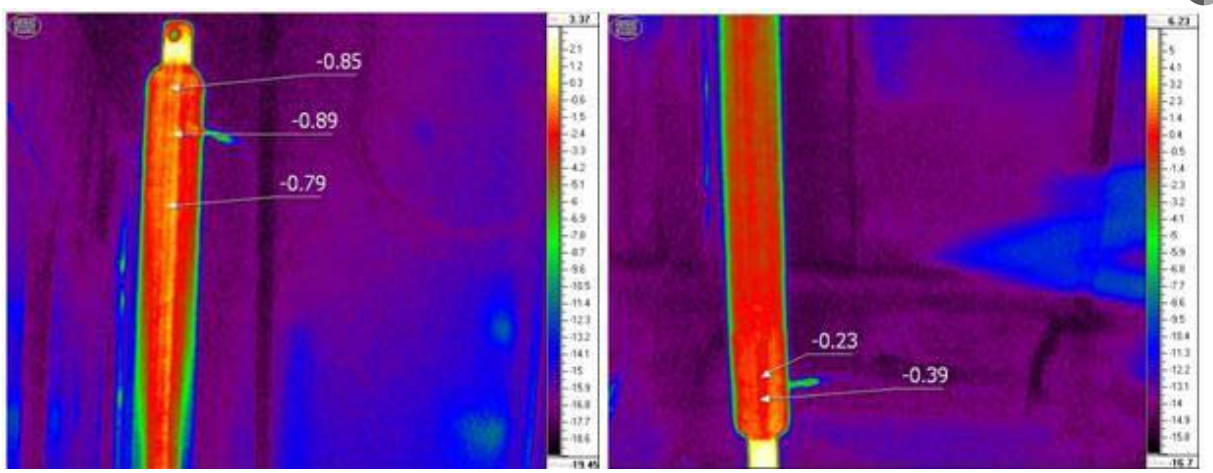


Рисунок 3 – Термограммы верхней (слева) и нижней (справа) конденсаторной части ТК 32/12 А.

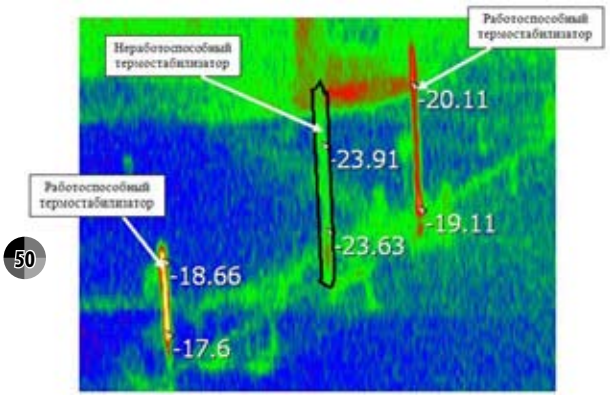


Рисунок 10 – Термограмма термостабилизаторов на испытательном полигоне НИО, температура воздуха минус 24ºС

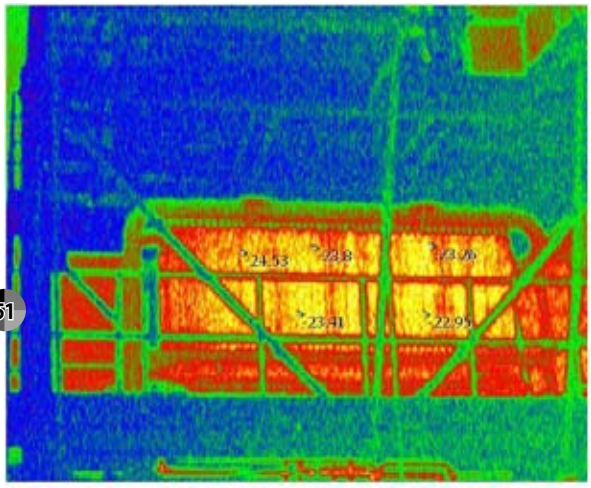


Рисунок 12 – Термограмма распределения температур на блоке конденсации системы ТОВ-25, температура воздуха минус 29ºС

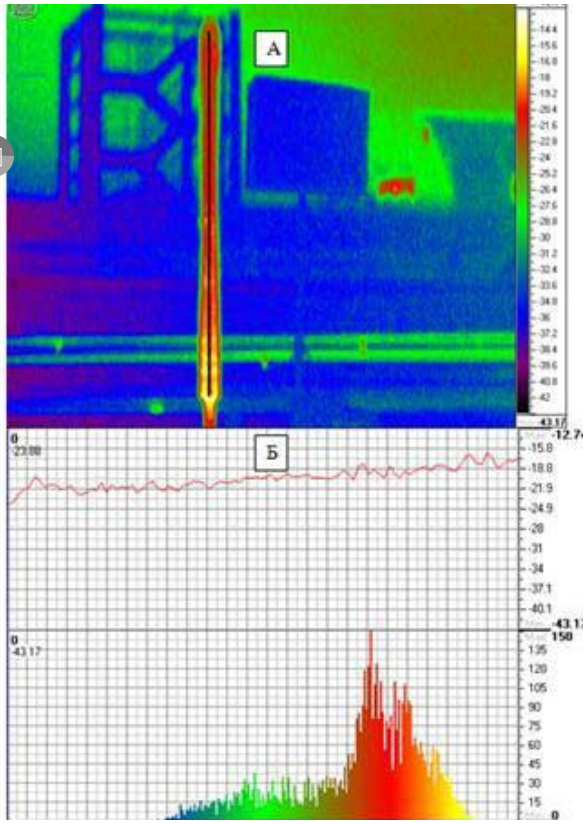


Рисунок 13 –Термопрофиль и гистограмма между точками А и Б. ТК 32/10 А на полигоне НИО в п. Матмасы г. Тюмень.

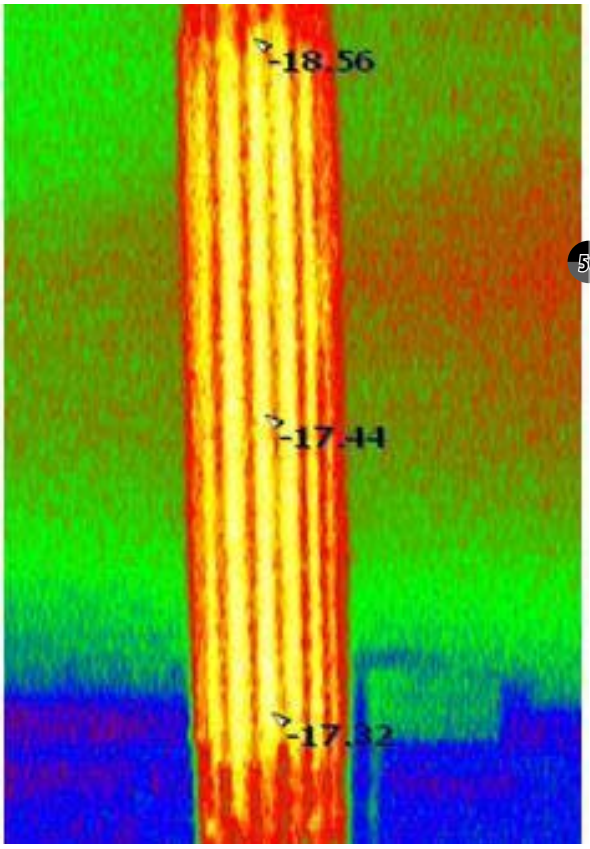


Рисунок 11 – Термограмма распределения температур по длине конденсатора на СОУ-100, температура воздуха минус 29ºС

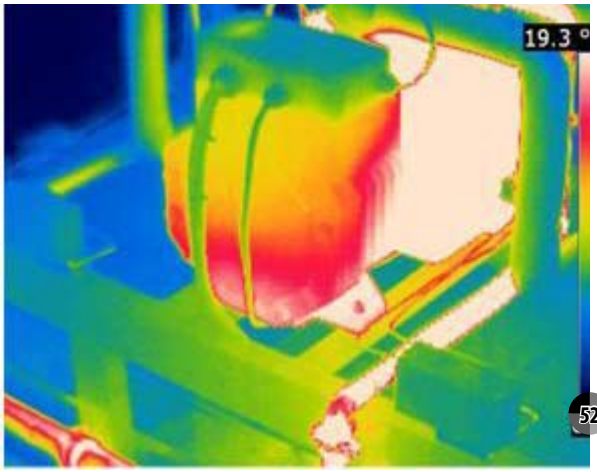


Рисунок 14 – Термограмма и фотография холодильной машины Bitzer

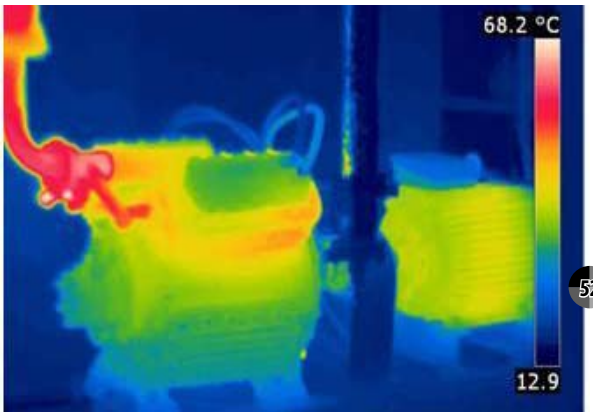


Рисунок 15 – Термограмма компрессорно-конденсаторного агрегата ПМ-40

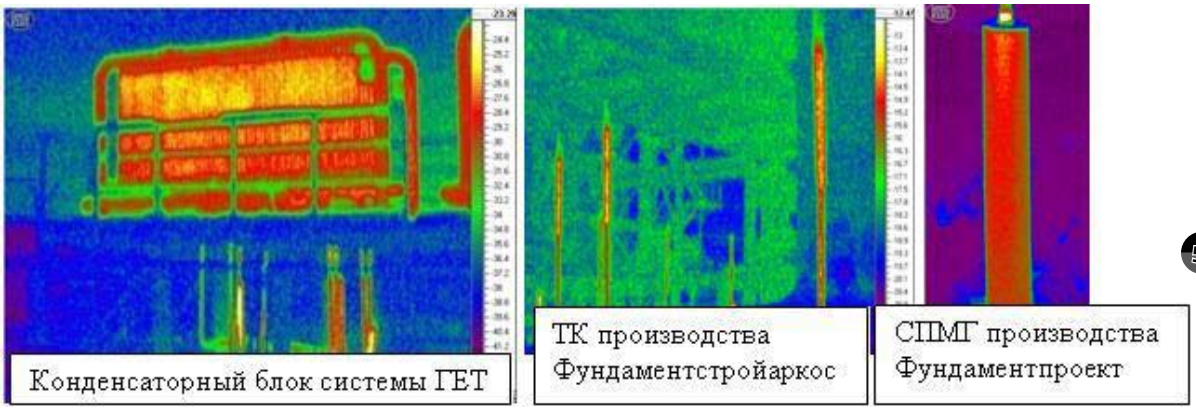


Рисунок 17 – Термограммы, полученные при проведении тепловизионной диагностики на Ванкорском месторождении

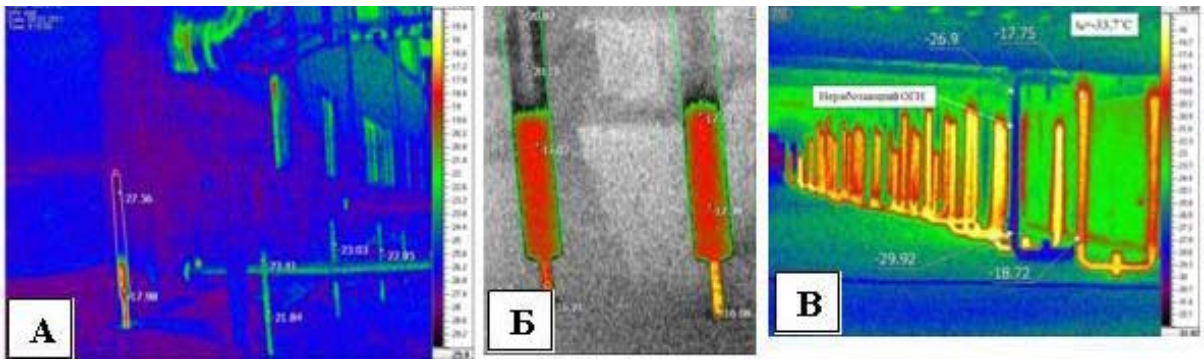


Рисунок 18 - Термограммы частично работающих термостабилизаторов А – ТК Фундаментстройаркос; Б- СПМГ Фундаментпроект; В – ОГН Фундаментпроект.

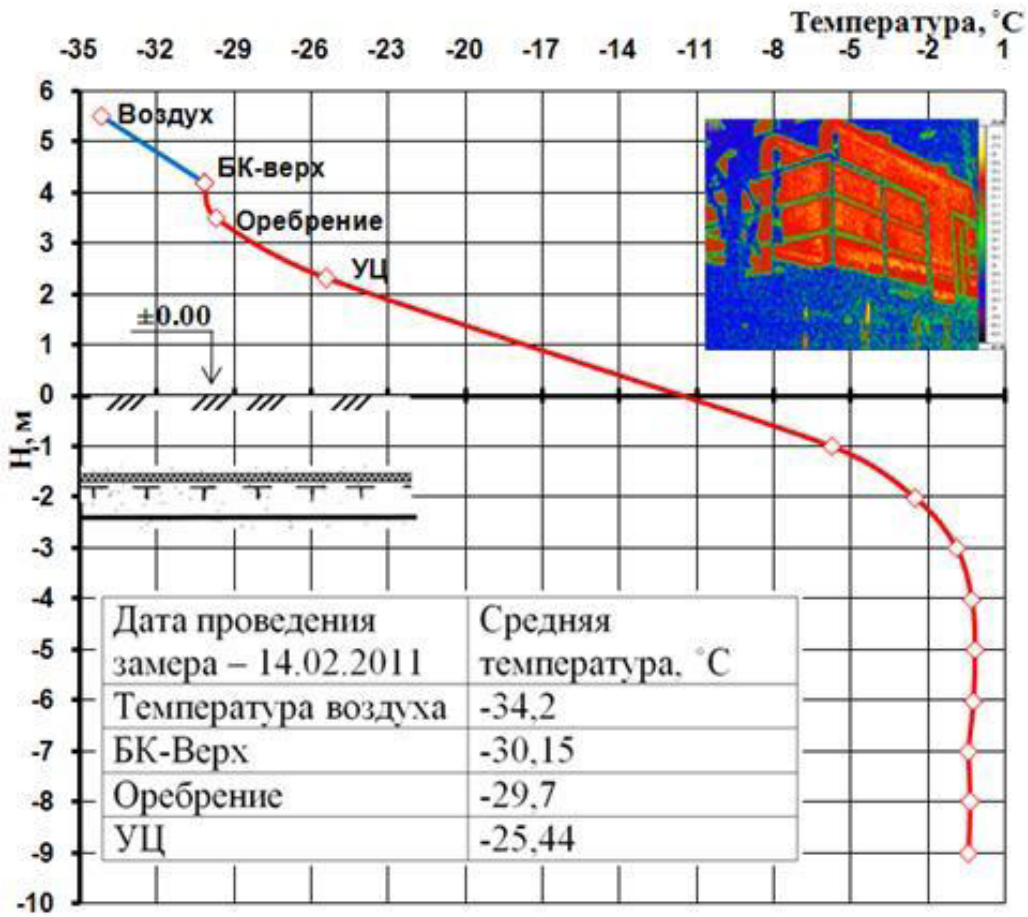
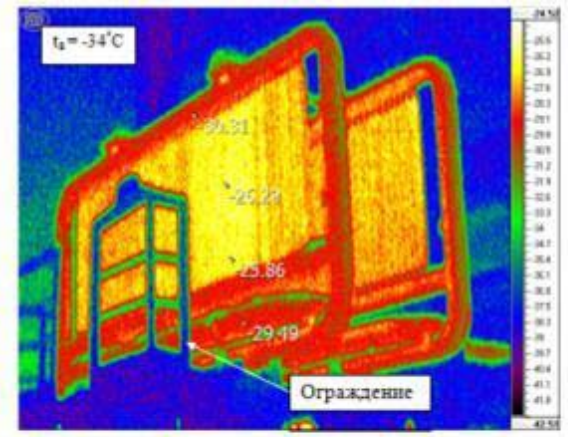
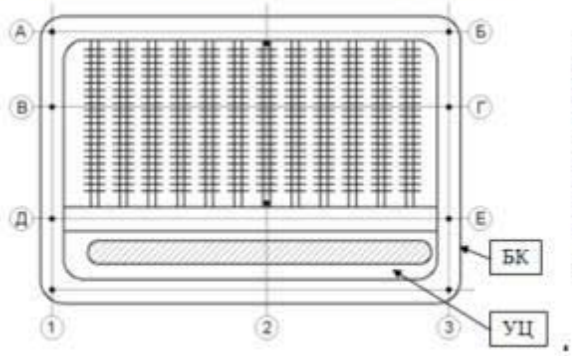


Рисунок 19 - График распределения температур в системе Грунт-ГЕТ-Воздух (ЦПС. РВС 2000 Т-4310 А). Обследовано 2 системы. Рабочих – 2







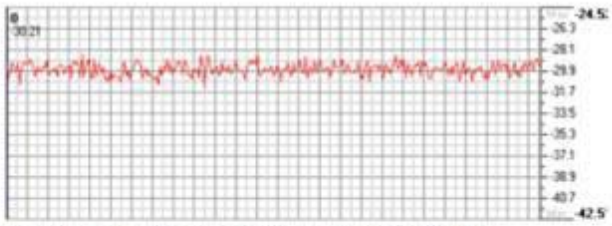
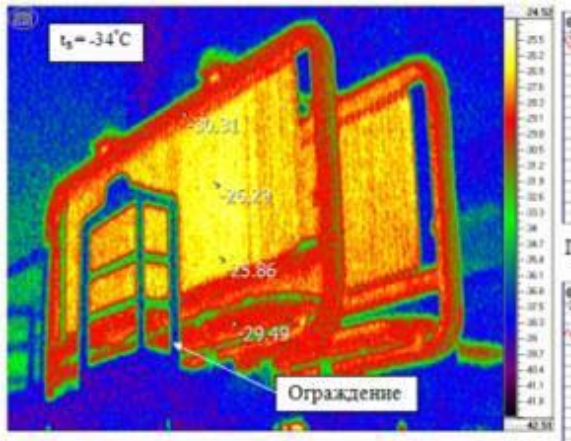


График распределения температур на БК по оси А-Б

Рисунок 20 – Полная тепловая карта блока конденсации (начало)



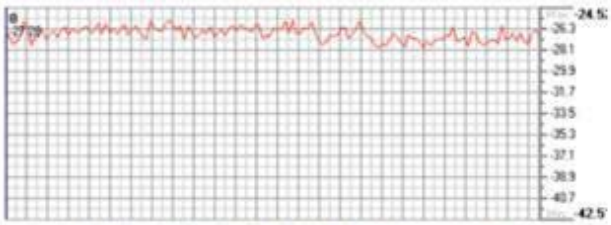


График распределения температур на БК по оси В-Г

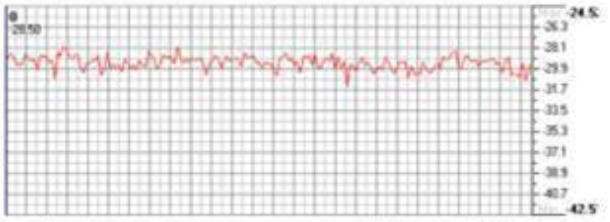
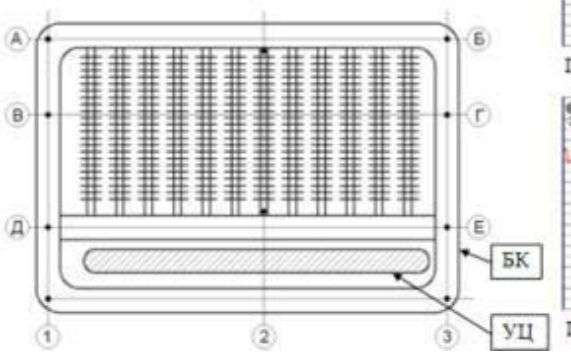


График распределения температур на БК по оси Д-Е



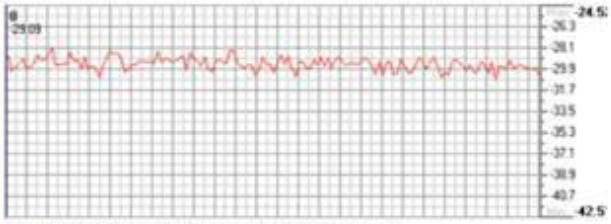
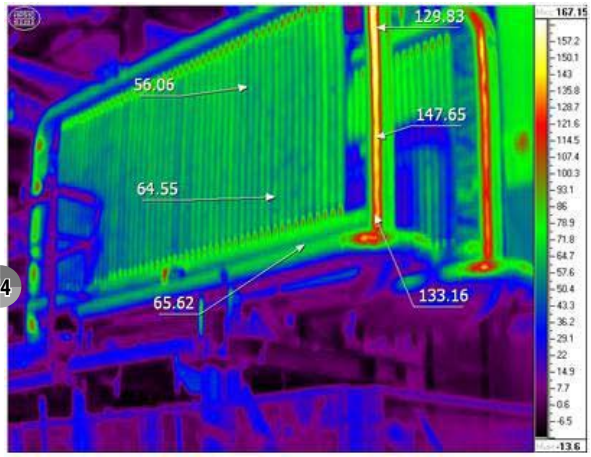


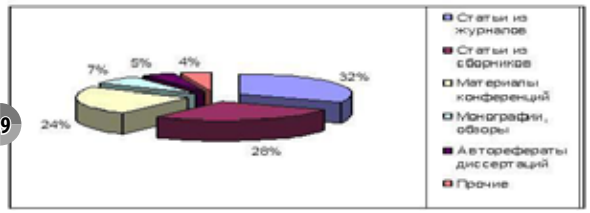
График распределения температур на УЦ

Рисунок 21 – Полная тепловая карта блока конденсации (продолжение)



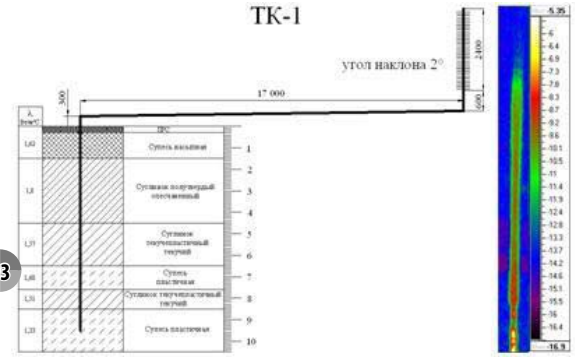
54

Рисунок 24 - Конденсаторный блок системы ГЕТ на УПСВ-Юг. Высокие значения температуры блока на термограмме обусловлены тепловым излучением факела, которое отражаясь от БК вносит погрешности в измерения.



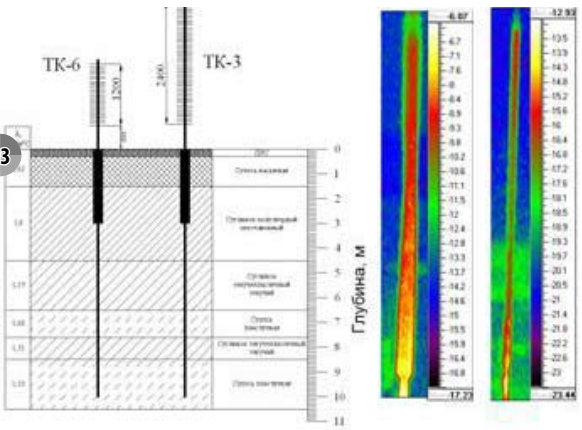
69

Рисунок 2 - Видовая структура ДП



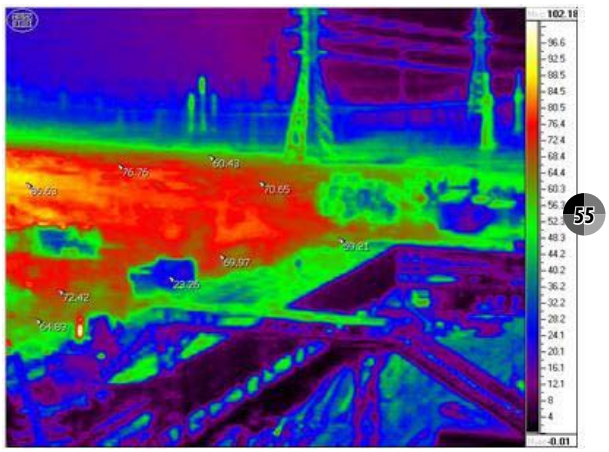
93

Рисунок 20 - Схема ТК-1 и термограмма конденсатора ТК-1.



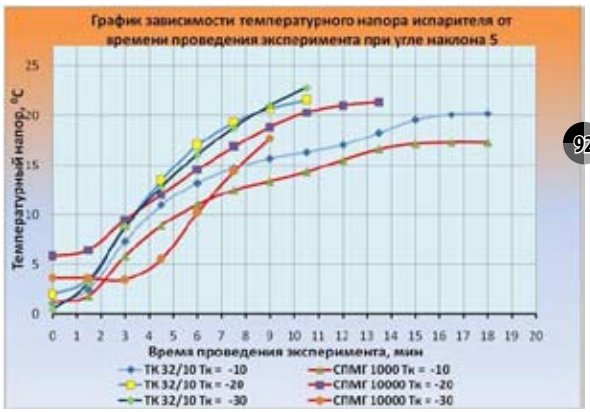
93

Рисунок 21 - Схема ТК-6, ТК-3, термограмма конденсатора ТК-6, ТК-3.



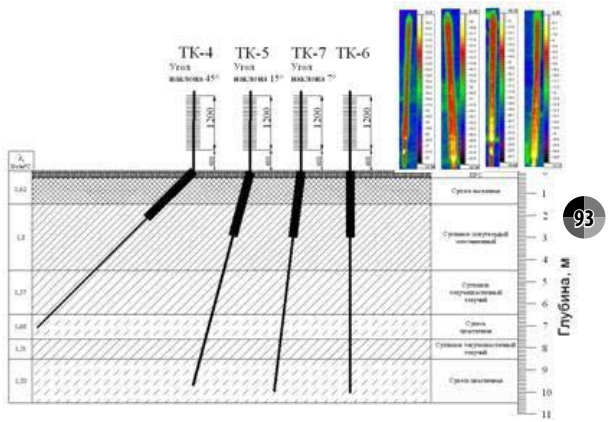
55

Рисунок 26 - Распределение температур на поверхности грунта рядом с факелом.



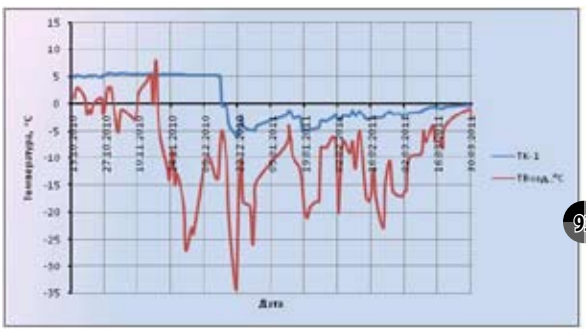
92

Рисунок 18 – График зависимости температурного напора испарителя от времени проведения эксперимента при угле наклона 5



93

Рисунок 22 - Схема установки ТК-4, ТК-5, ТК-6 и ТК-7. Термограммы конденсаторов ТК-4, ТК-5, ТК-6 и ТК-7



93

Рисунок 23 - График изменения средней температуры семиметрового слоя испарителя ТК-1 с течением времени

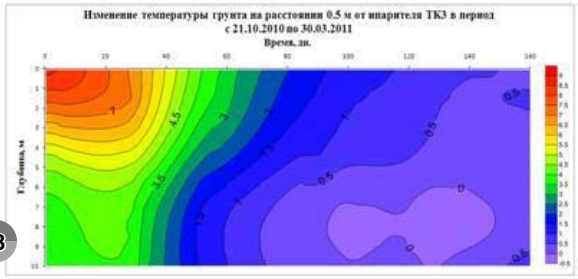


Рисунок 24 - Изоплета для ТТ на расстоянии 0,5 м от ТК-3

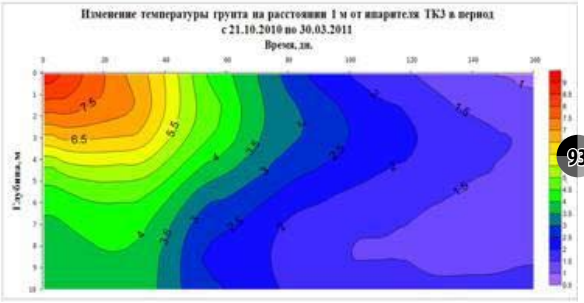


Рисунок 25 - Изоплета для ТТ на расстоянии 1,0 м от ТК-3

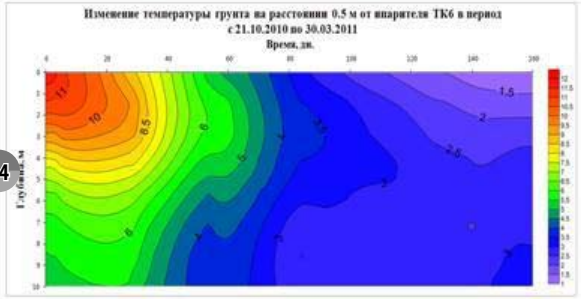


Рисунок 26 - Изоплета для ТТ на расстоянии 0,5 м от ТК-6

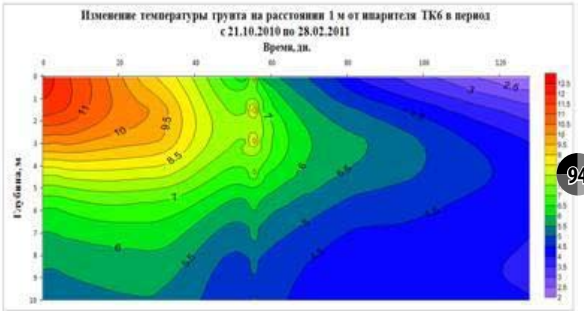


Рисунок 27 - Изоплета для ТТ на расстоянии 1,0 м от ТК-6

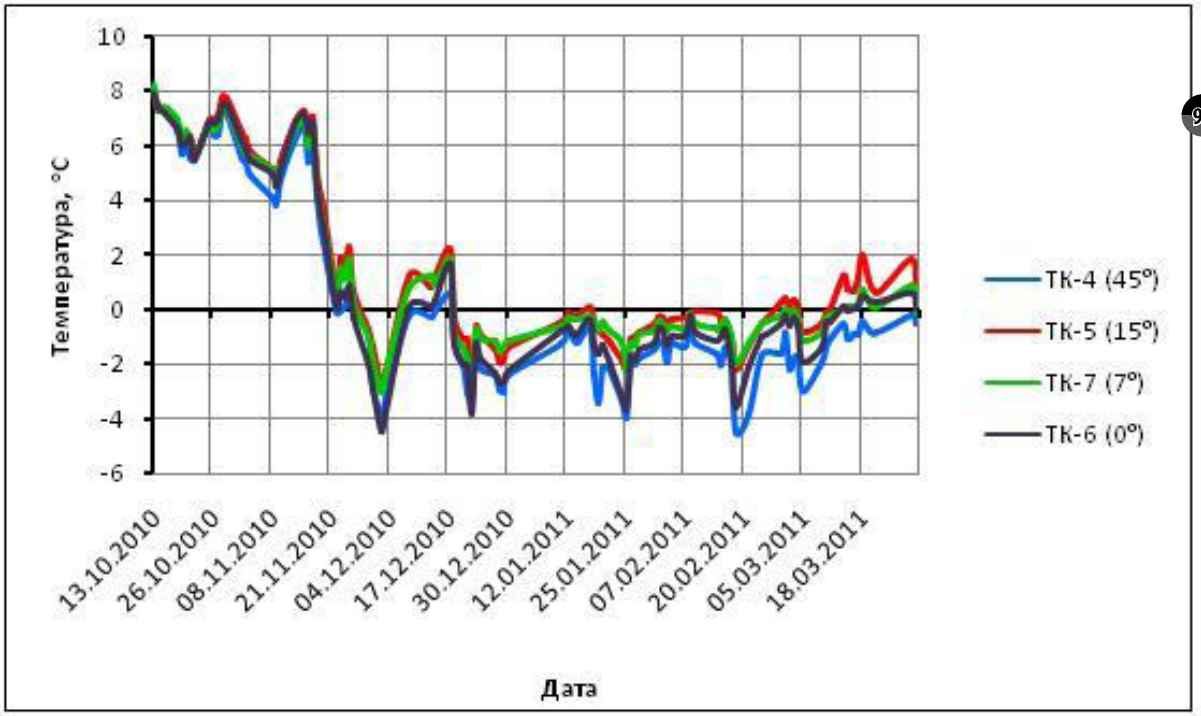


Рисунок 28 - График изменения средней температуры семиметрового слоя испарителя ТК-4, ТК-5, ТК-6 и ТК-7 с течением времени.



Рисунок 1 – Расчетная область в плане

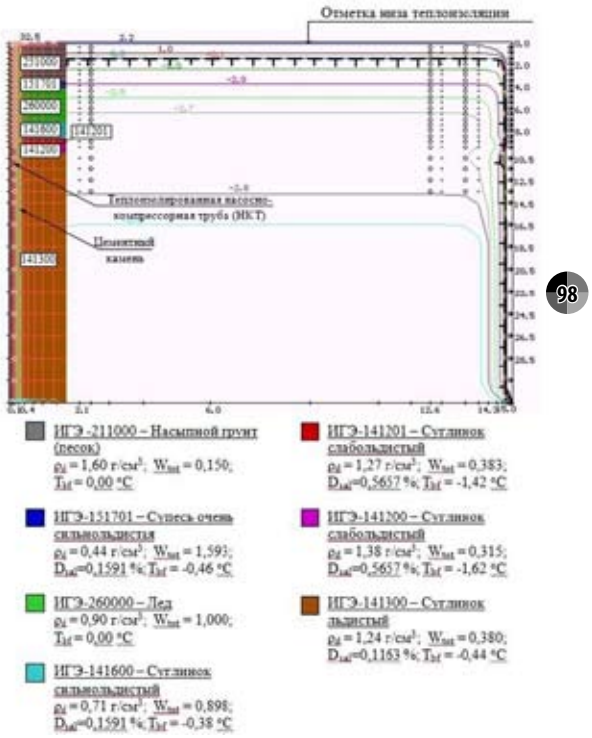


Рисунок 2 – Температура и кодировка грунта на 16 сентября, насыпь и теплоизоляционный ковер уложены на талый грунт

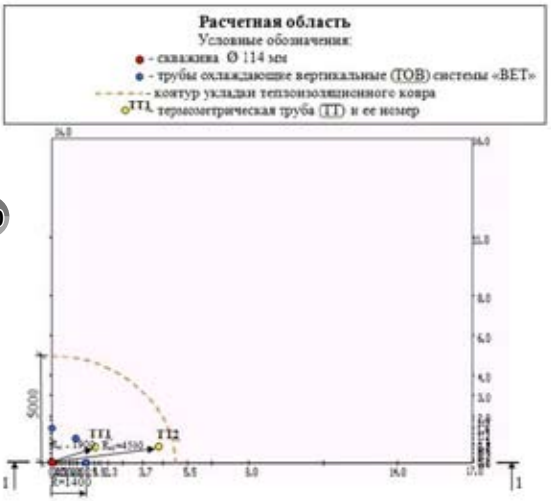


Рисунок 11 - Расчетная область в плане

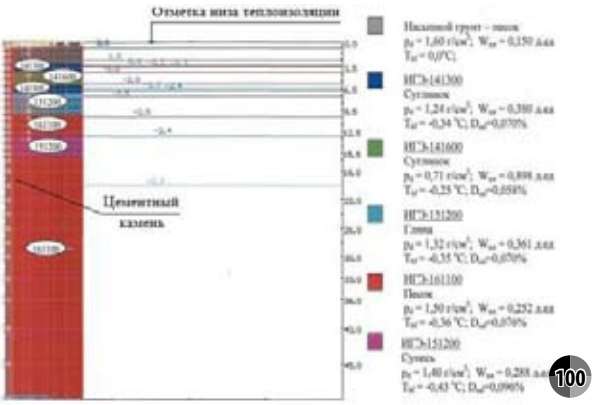


Рисунок 12 – Температура и кодировка грунта на 15 сентября

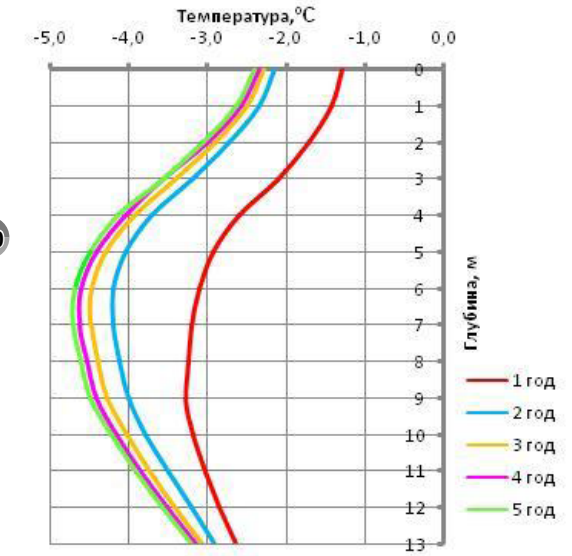


Рисунок 6 – Температура грунта по глубине в термометрической скважине 1 (ТТ1) на конец летнего периода (1 октября)

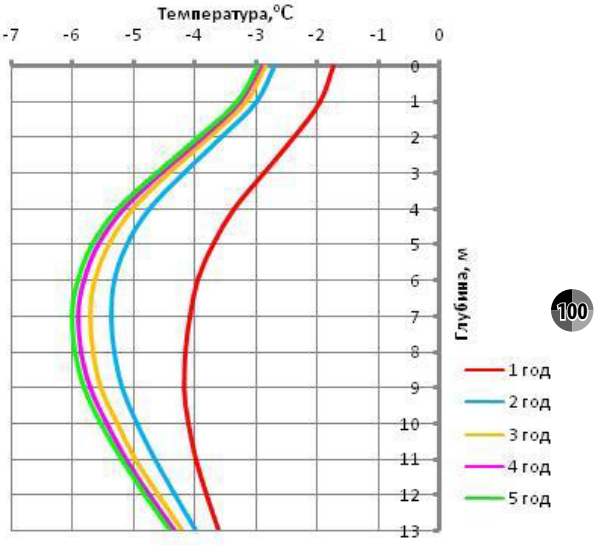


Рисунок 7 – Температура грунта по глубине в термометрической скважине 2 (ТТ2) на конец летнего периода (1 октября)

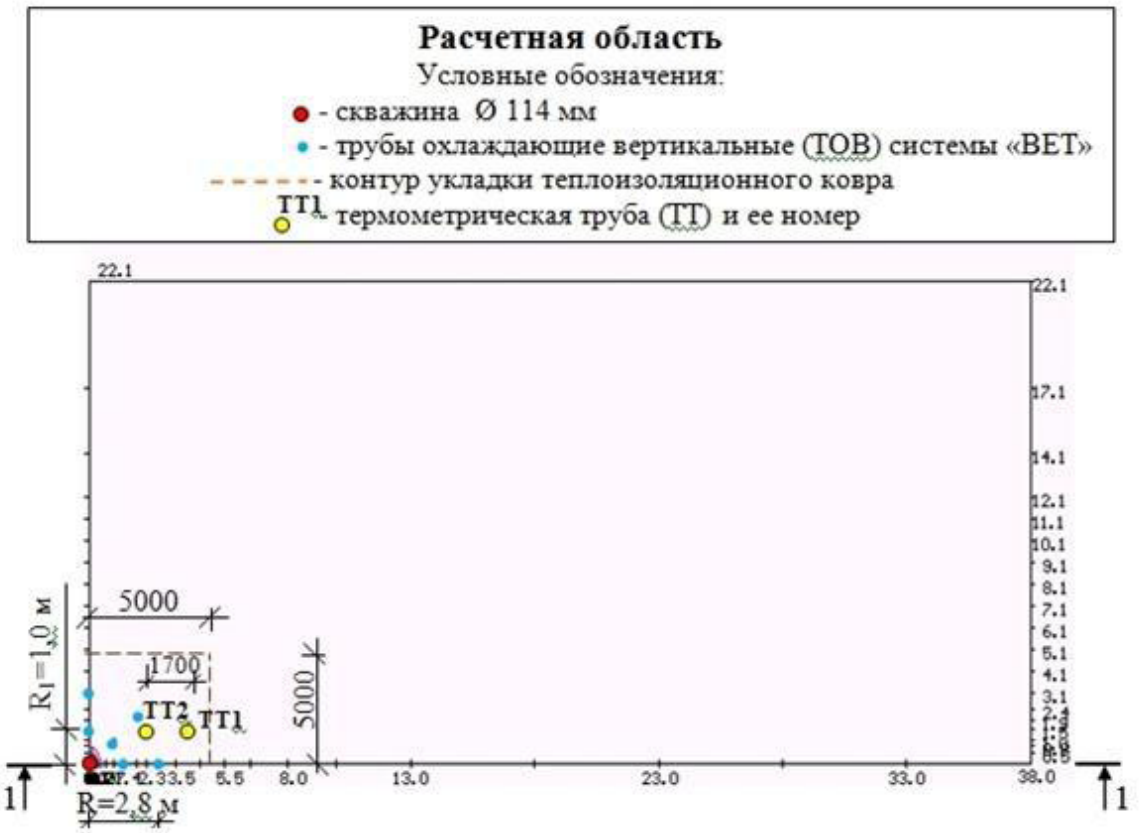


Рисунок 15 – Расчетная область в плане

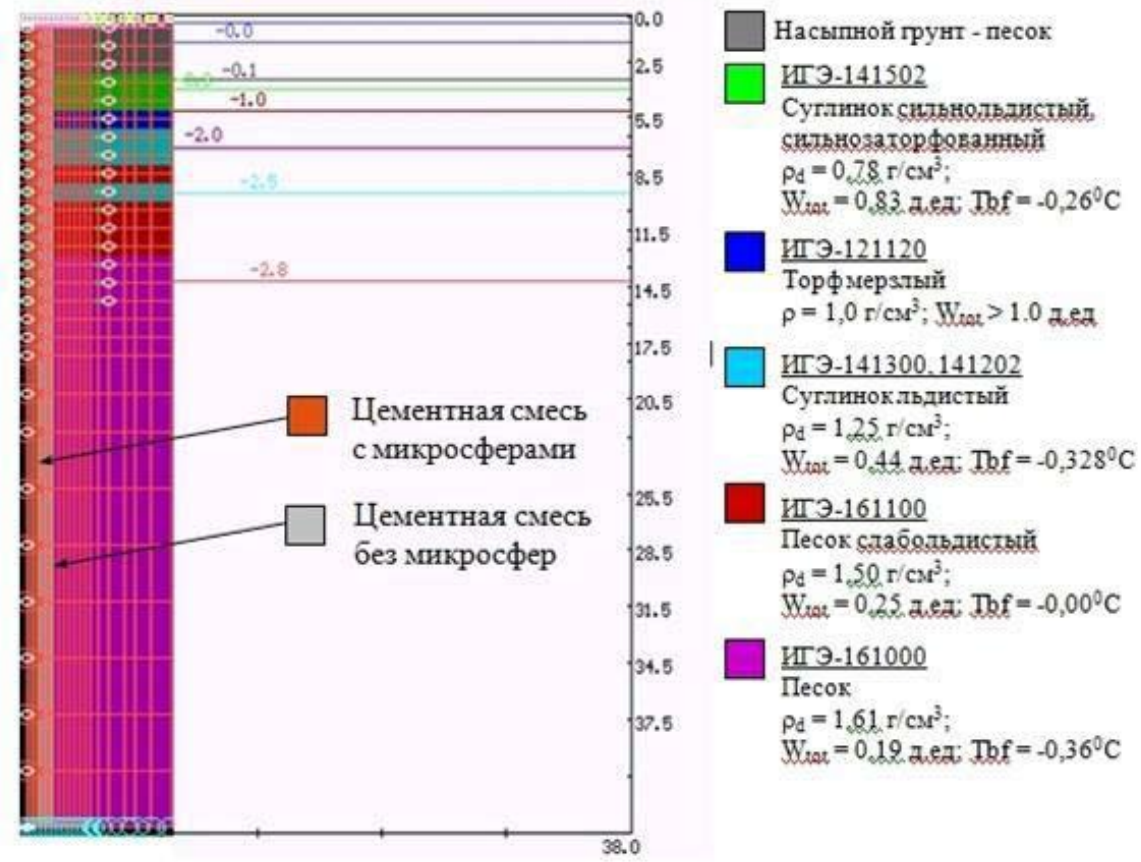
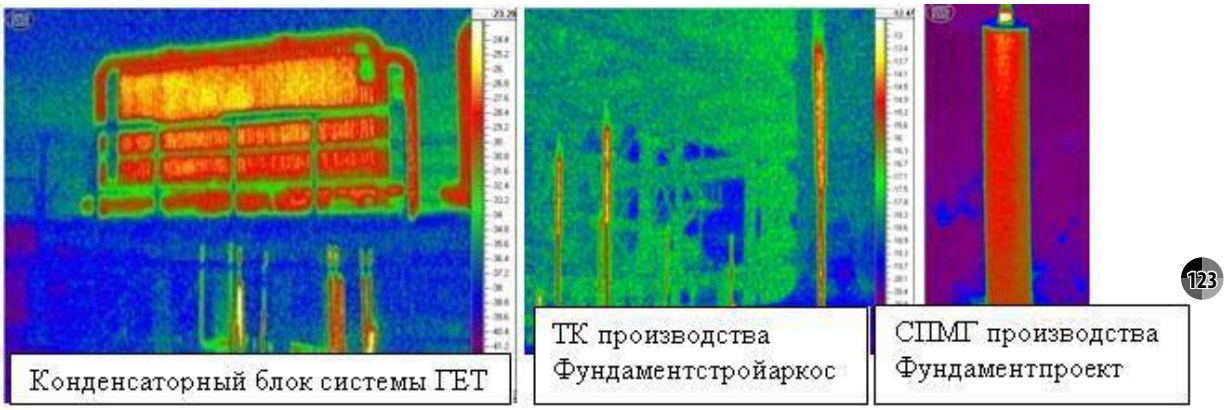


Рисунок 16 – Температура и кодировка грунта на октябрь



123

Рисунок 12– Термограммы, полученные при проведении тепловизионной диагностики на Ванкорском месторождении

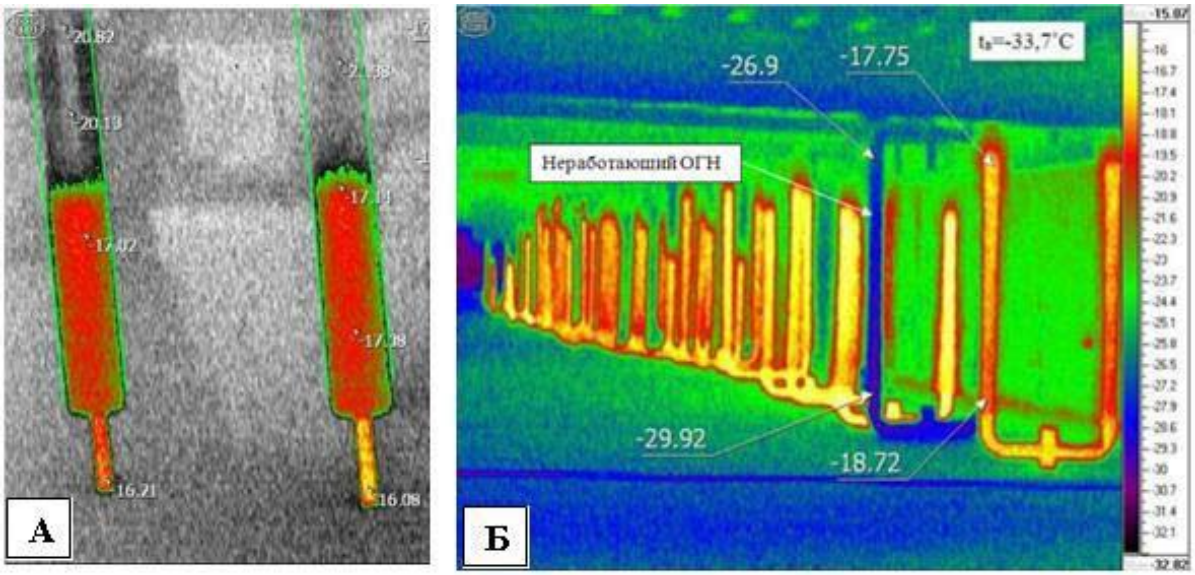
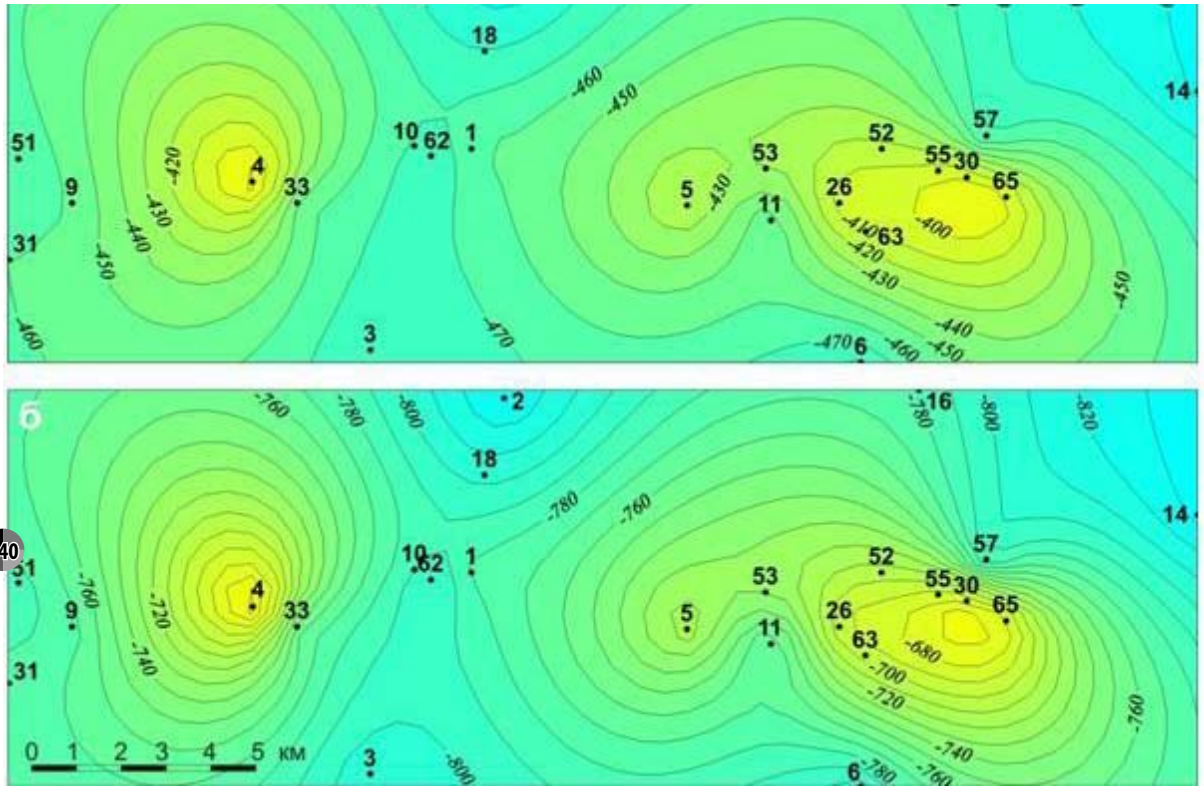


Рисунок 13 - Термограммы частично работающих термостабилизаторов А – СПМГ Фундаментпроект; Б – ОГН Фундаментпроект.



140

Рисунок 3 - Структурные схемы по подошвам ММП (а) и ЗГО (б)

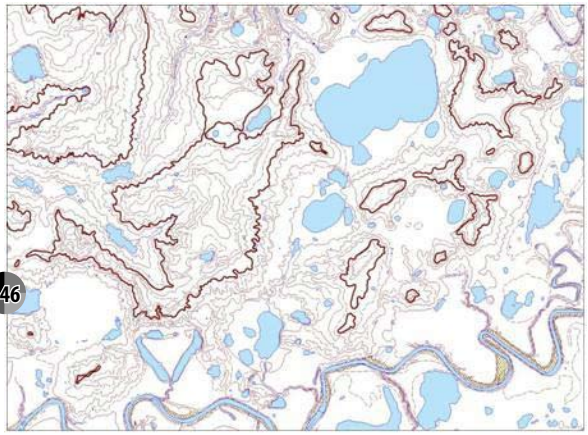


Рисунок 1 - Схема рельефа представляемого участка

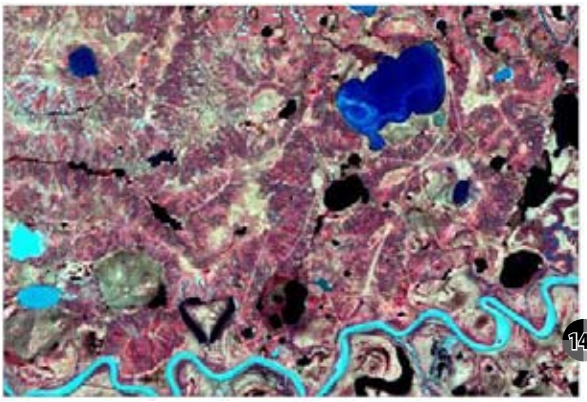


Рисунок 2 - Космический снимок территории

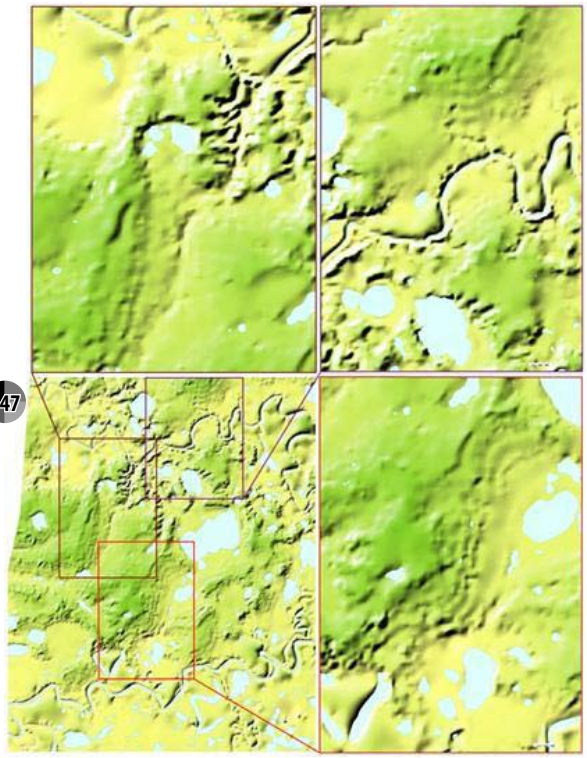


Рисунок 3 - Модель рельефа в Isoline с четким выявлением солифлюкционных террас

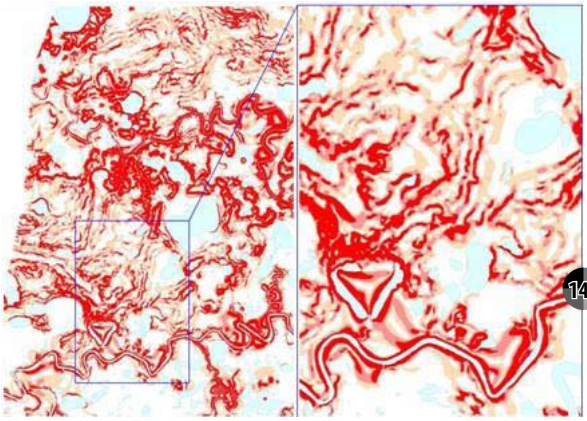


Рисунок 4 - Градиент уклона наклона в Isoline отражает уклон поверхности в градусах. Выделяются вертикальная и наклонная части солифлюкционных террас

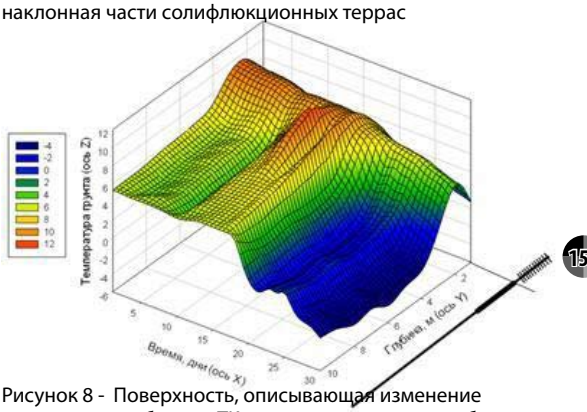


Рисунок 8 - Поверхность, описывающая изменение температуры вблизи с ТК в термоскважине по глубине с течением времени по результатам геотехнического мониторинга

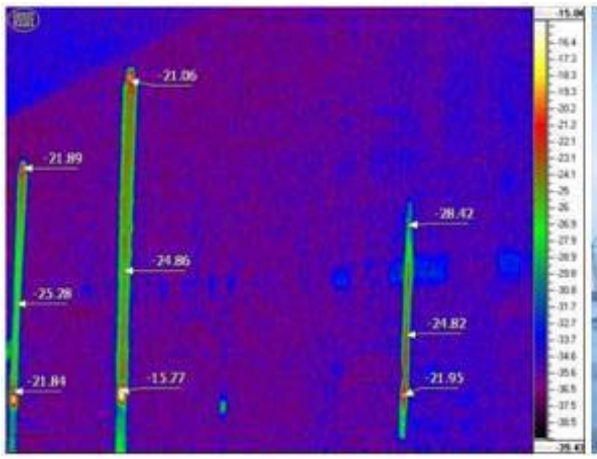
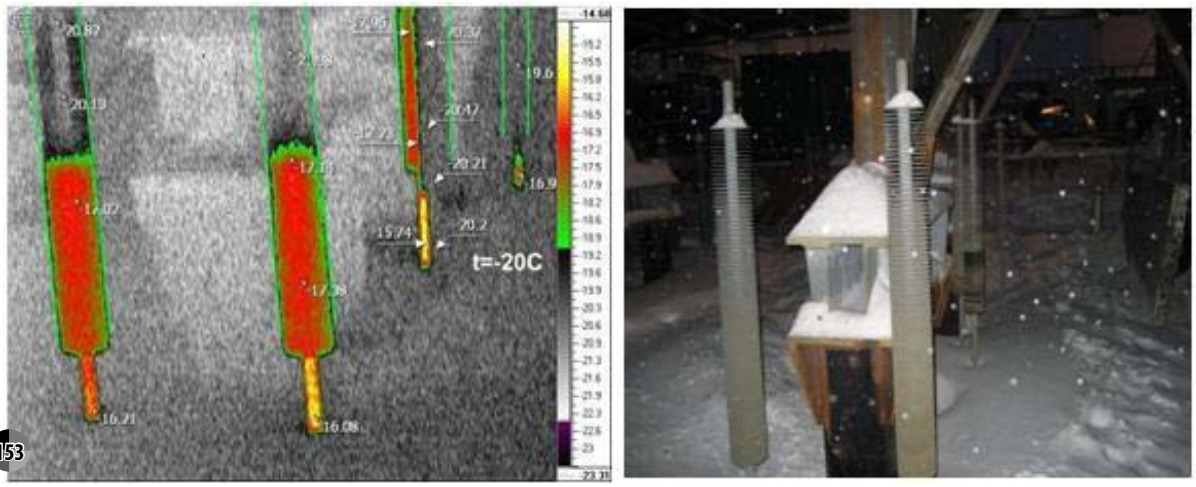


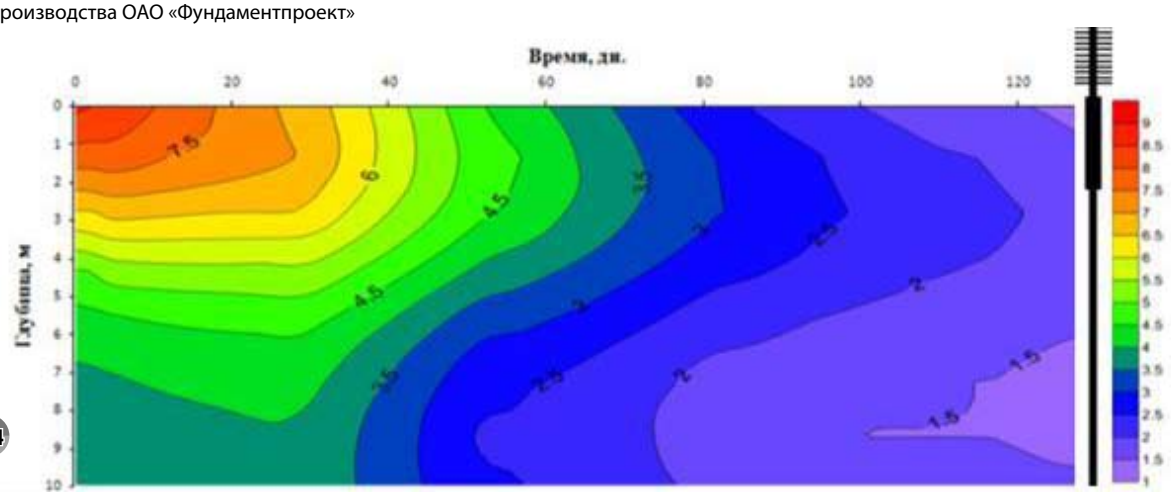


Рисунок 6 - Ванкор. Производственный корпус №2. Тепловизионные исследования термостабилизаторов производства ООО НПО «Фундаментстройаркос»



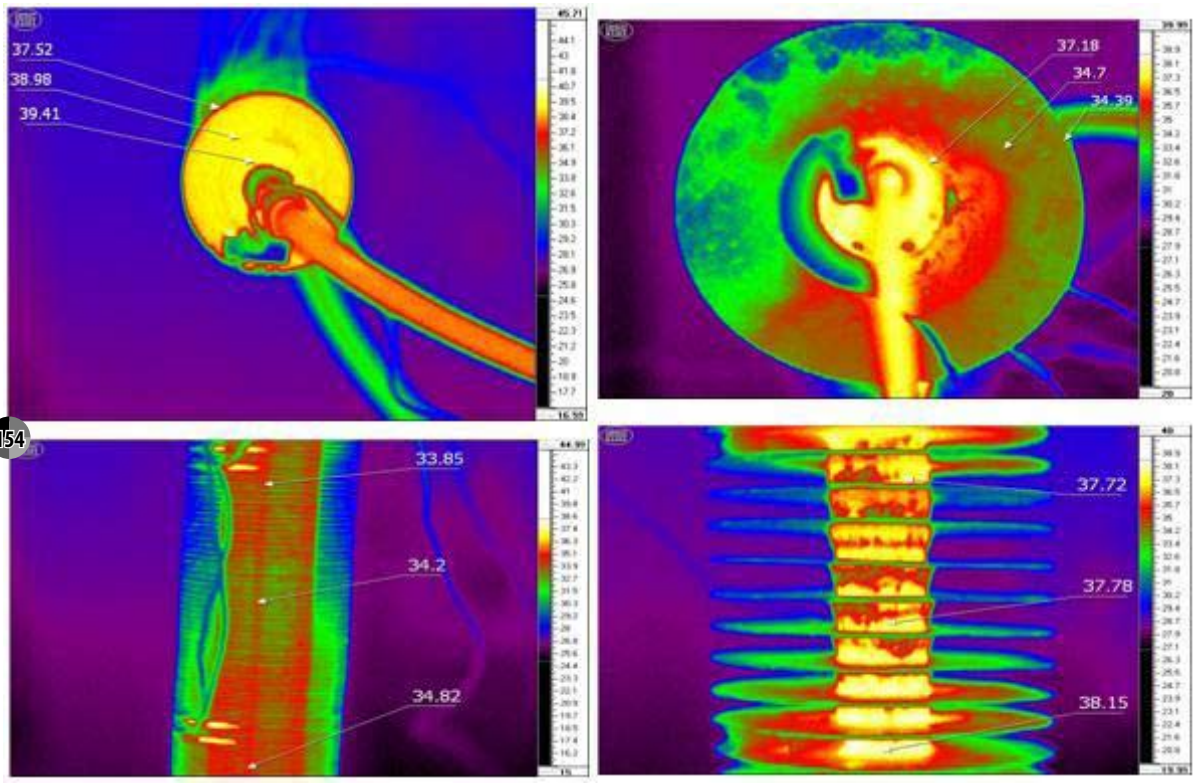
153

Рисунок 7 - Ванкор. Поз. 66. 1 Парк химических реагентов №1. Тепловизионные исследования термостабилизаторов производства ОАО «Фундаментпроект»



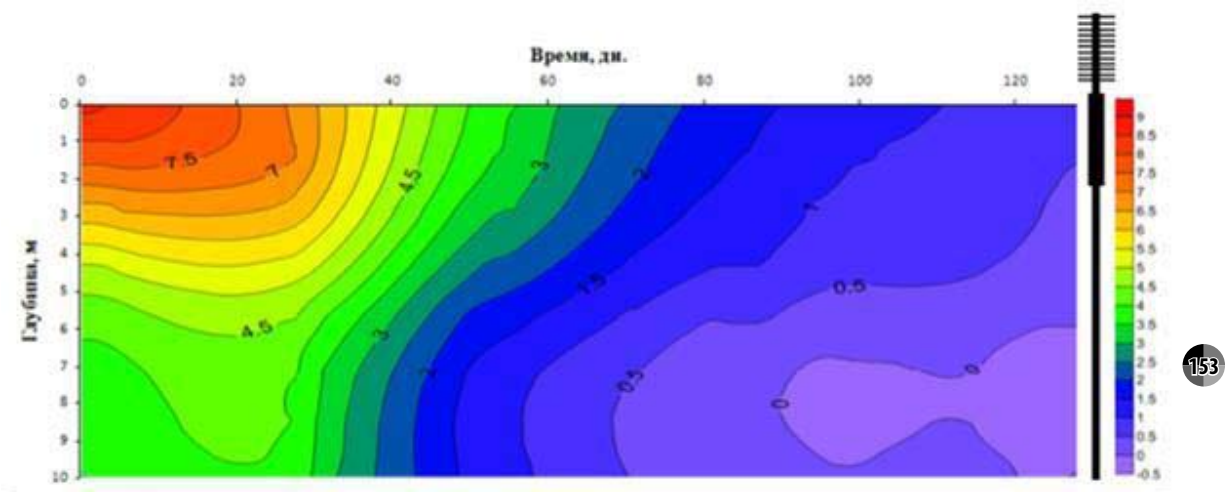
154

Рисунок 10 – Изменение температуры грунта на расстоянии 1 м. от испарителя ТК-3 в период с 21.10.2010 по 28.02.2011 по результатам геотехнического мониторинга



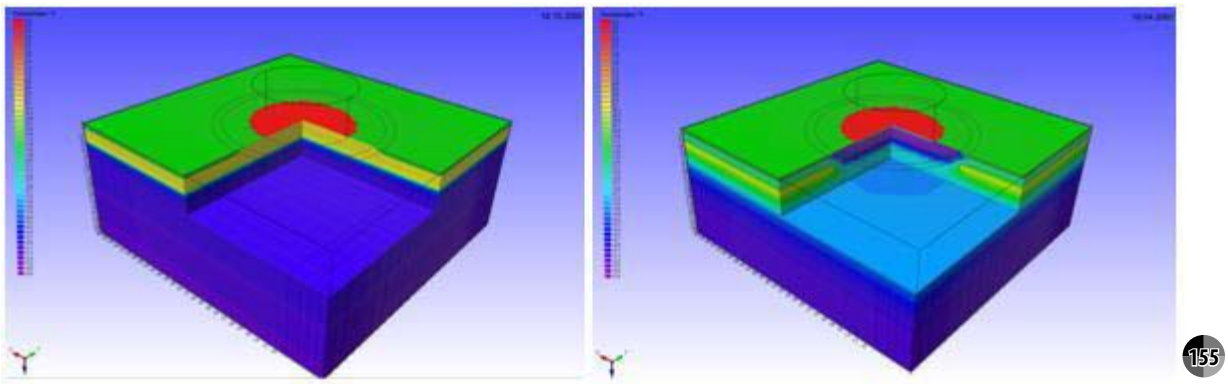
154

Рисунок 11 - Экспериментальное исследование конденсаторов термостабилизаторов различных производителей с использованием тепловизора



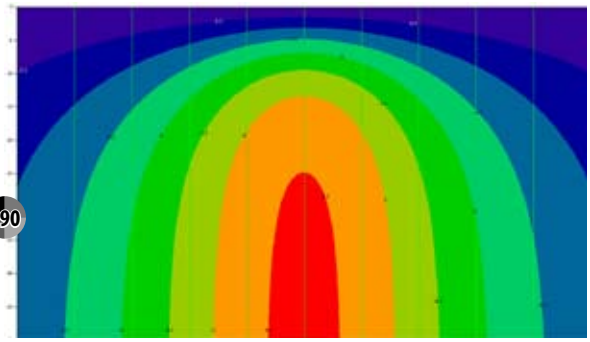
153

Рисунок 9 – Изменение температуры грунта на расстоянии 0,5 м. от испарителя ТК-3 в период с 21.10.2010 по 28.02.2011 по результатам геотехнического мониторинга



155

Рисунок 13 - Динамика изменения температурного поля грунта основания РВС-50000 в процессе численного моделирования.



190

Рисунок 4 - Температурное поле в зоне действия двух скважин. Время – 30 лет Линии уровня в вертикальном сечении, проходящем перпендикулярно середине отрезка, соединяющего устья двух скважин.

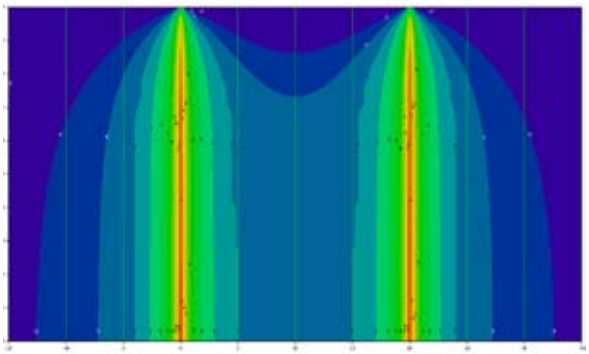


Рисунок 2 - Температурное поле в зоне действия двух скважин. Время с момента пуска в эксплуатацию - 30 лет. Линии уровня в сечении проходящем через обе скважины. Зона таяния соответствует изотерме Т=0.

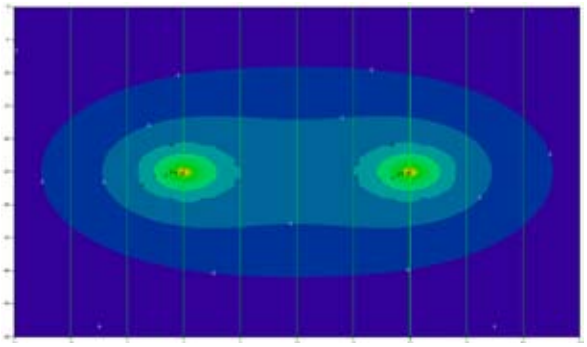
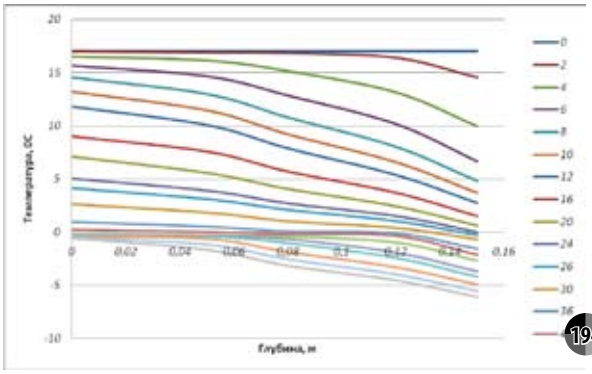


Рисунок 3 - Температурное поле в зоне действия двух скважин. Время – 30 лет Линии уровня в горизонтальном сечении, проходящем на грубине 50 метров перпендикулярно оси скважин.



194

Рисунок 10 - Зависимости температуры от глубины заложения датчика для разных моментов времени

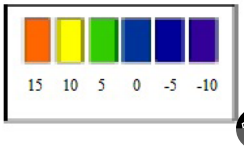


Рисунок 11 - Шкала температур.

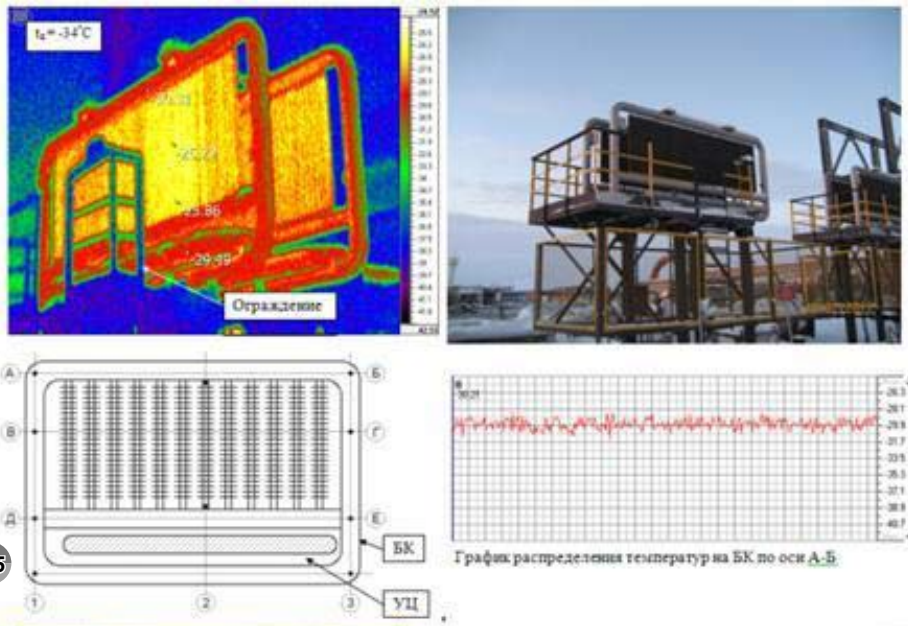


График распределения температур на БК по оси А-Б

График распределения температур на БК по оси В-Г

График распределения температур на БК по оси Д-Е

График распределения температур на УЦ

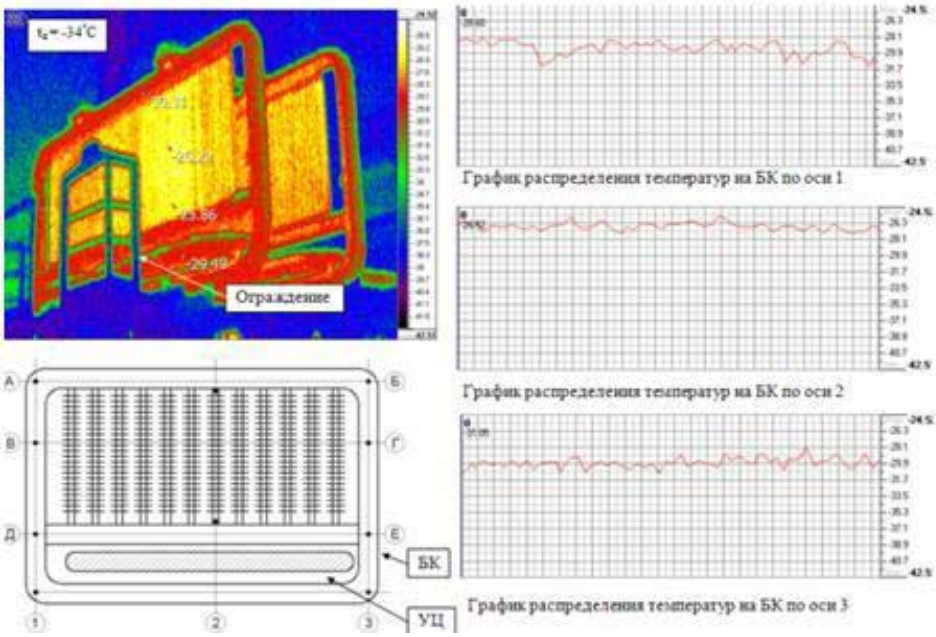


График распределения температур на БК по оси 1

График распределения температур на БК по оси 2

График распределения температур на БК по оси 3

Рисунок 12 - Полная тепловая карта блока конденсации

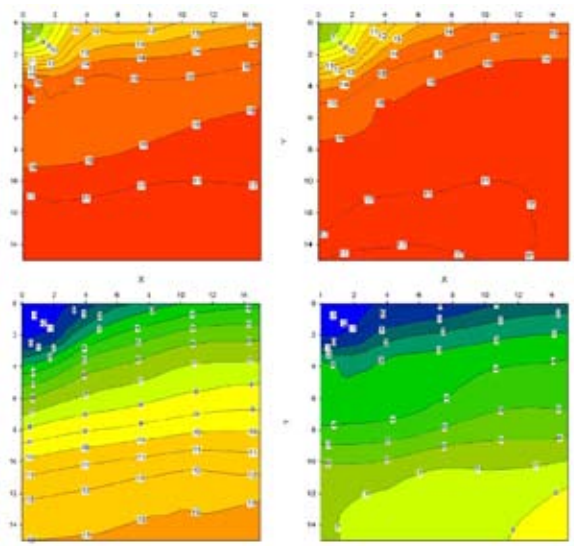


Рисунок 12 - Температурные поля для глины (слева) и песка (справа) вначале эксперимента и через 10 часов.

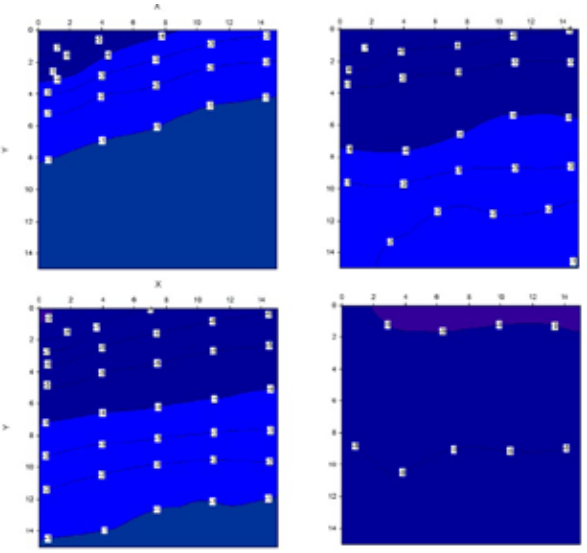


Рисунок 13 - Температурные поля для глины (слева) и песка (справа) через 50 и 80 часов.

195



Рисунок 14 - Вертикальное смещение трубопровода.

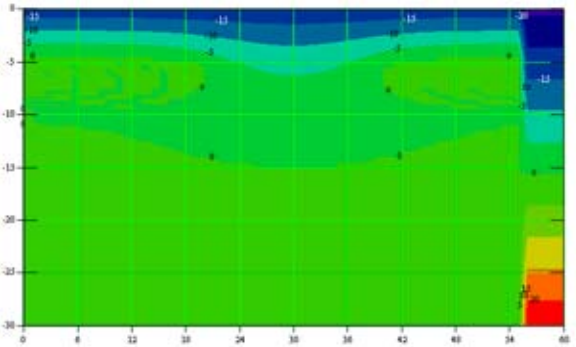


Рисунок 2 - Температурное поле вокруг одиночного трубопровода с отрицательной температурой теплоносителя через 26 месяцев после пуска в эксплуатацию/. Температура поверхности Тр= -26 град

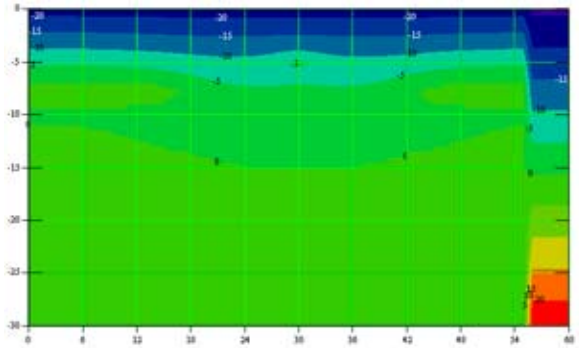


Рисунок 3 - Температурное поле вокруг одиночного трубопровода с отрицательной температурой теплоносителя через 27 месяцев после пуска в эксплуатацию/. Температура поверхности Тр= -22град

214

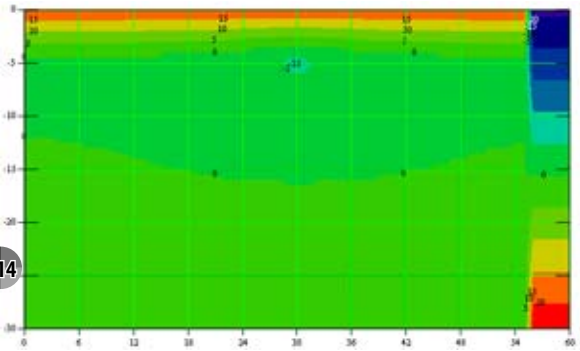


Рисунок 4 - Температурное поле вокруг одиночного трубопровода с отрицательной температурой теплоносителя через 32 месяцев после пуска в эксплуатацию/. Температура поверхности Тр= 20град

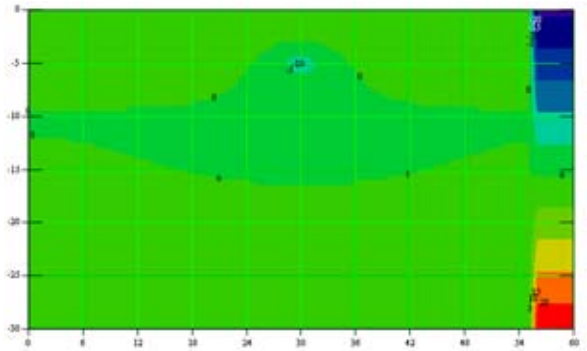


Рисунок 5 - Температурное поле вокруг одиночного трубопровода с отрицательной температурой теплоносителя через 36 месяцев после пуска в эксплуатацию/. Температура поверхности Тр=1,5рад

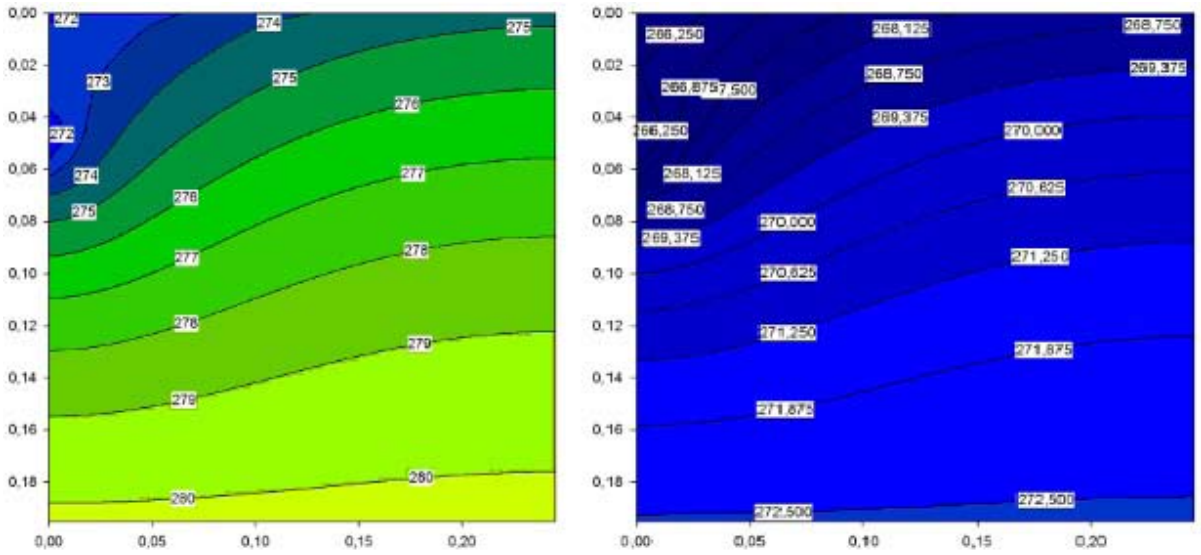


Рисунок 4 - Температурные поля в грунте, рассчитанные по программе. Температуры в грунте через 20 часов (слева) и через 60 часов (справа).

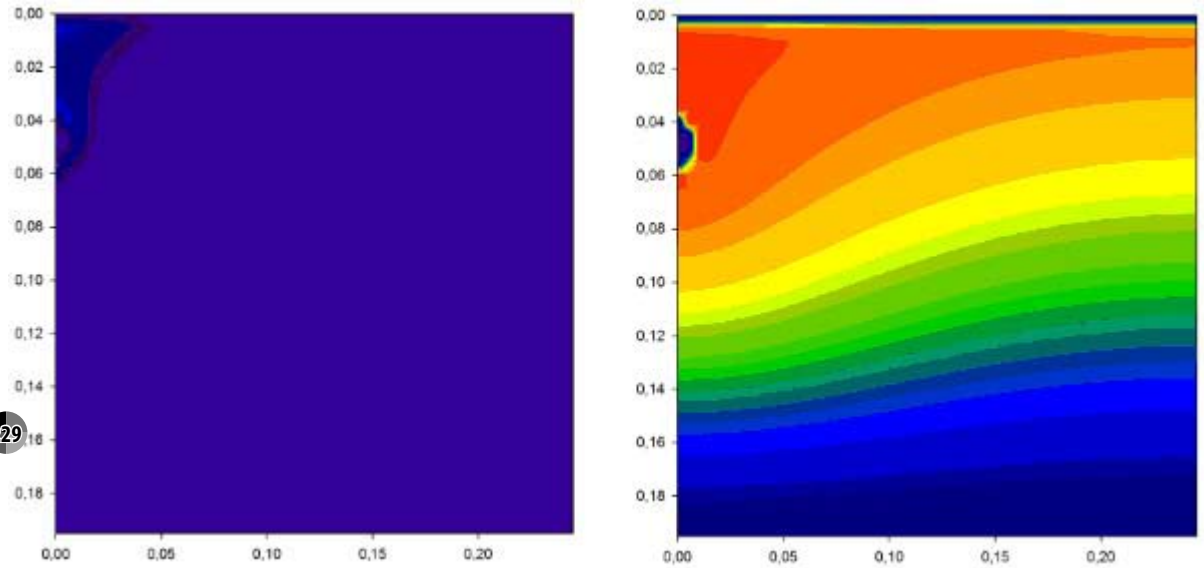
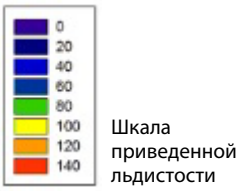


Рисунок 5 - Поля льдистости в грунте, рассчитанные по программе. Содержание льда в грунте через 20 часов (слева) и через 60 часов (справа).



Приложение 2

Геотехнические наблюдения по ТС-8 расположенной в проветриваемом подполье инженерного сооружения площадью 40Х12 без обустройства СПМГ

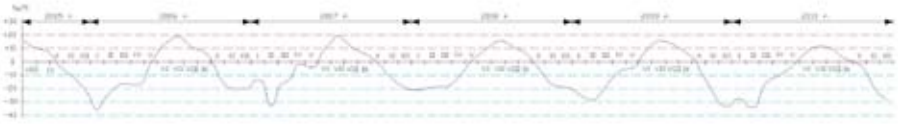
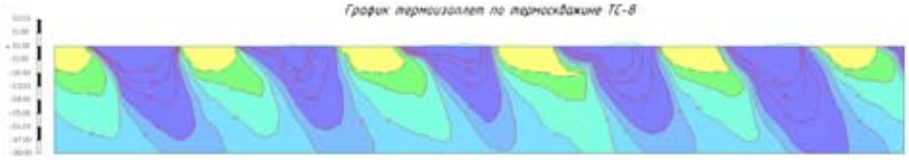
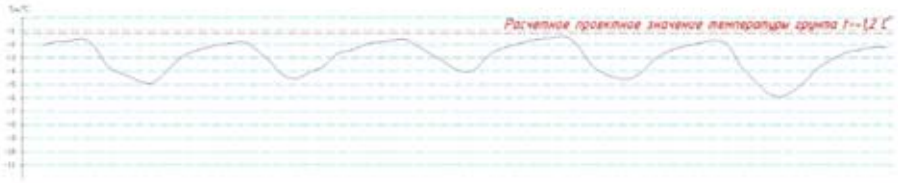


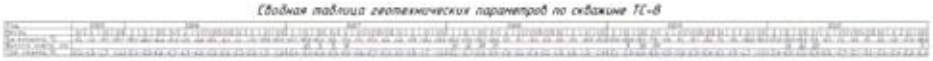
График термоизоплет по термоскважине ТС-8



Динамика среднего значения температуры грунтов оснований в интервале глубин от 2 м до 10 м



Сводная таблица геотехнических параметров по скважине ТС-8



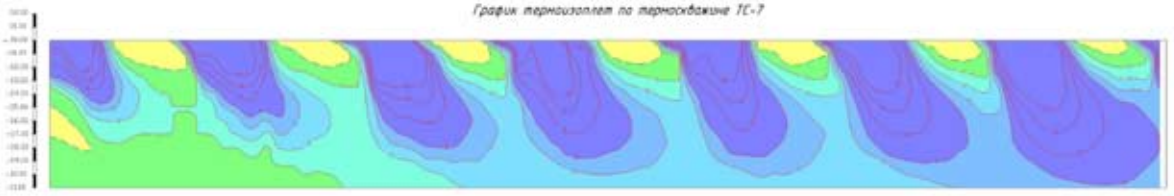
Приложение 1

Геотехнические наблюдения по ТС-7 расположенной в проветриваемом подполье инженерного сооружения площадью 16Х86 с обустройством СПМГ

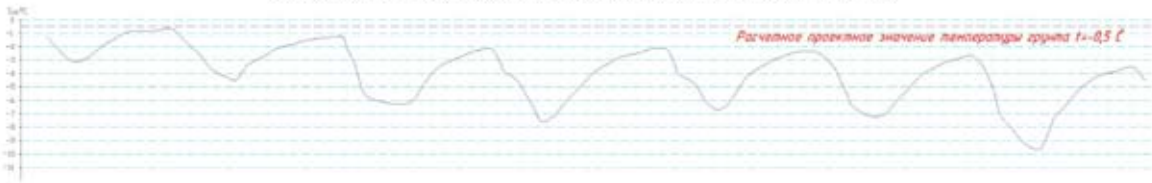
Среднемесячная температура воздуха



График термоизоплет по термоскважине ТС-7



Динамика среднего значения температуры грунтов основанмй в интервале глубин от 2 м до 10 м



Сводная таблица геотехнических параметров по скважине ТС-7



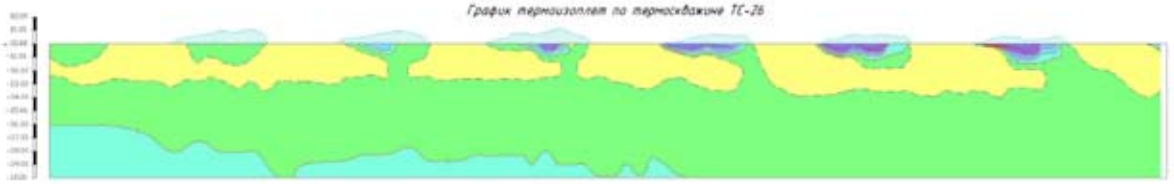
Приложение 3

Геотехнические наблюдения по ТС-26 расположенной в основании технологической эстакады на участке с формированием снежного покрова, без обустройства СПМГ

Среднемесячная температура воздуха



График термоизоплет по термоскважине ТС-26



Динамика среднего значения температуры грунтов оснований в интервале глубин от 2 м до 10 м



Сводная таблица геотехнических параметров по скважине ТС-26



Приложение 4

Геотехнические наблюдения по ТС-30 расположенной в основании технологической эстакады на участке с формированием снежного покрова, без обустройства СПМГ, На расстоянии в 1,5 метра от зачищаемого проезда

Среднемесячная температура воздуха

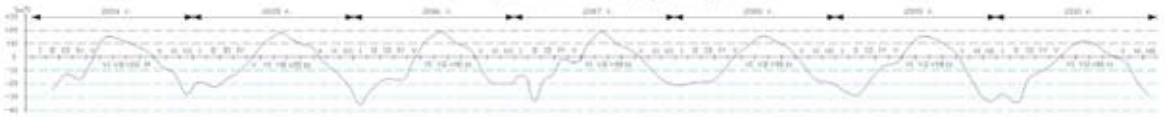
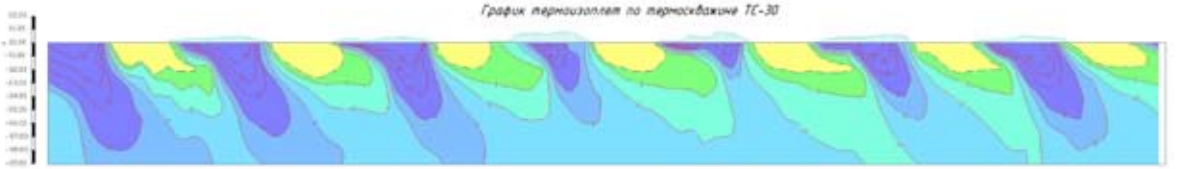
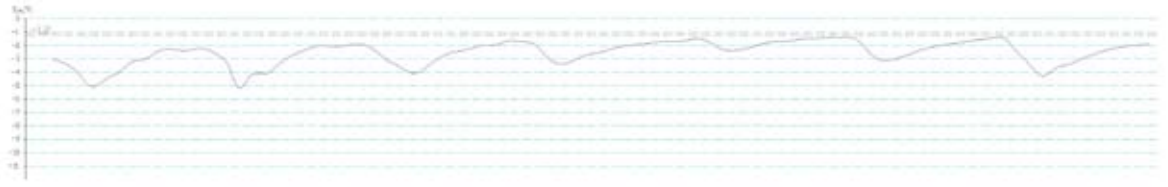


График термоизоплет по термоскважине ТС-30



Динамика среднего значения температуры грунтов оснований в интервале глубин от 2 м до 10 м



Сводная таблица геотехнических параметров по скважине ТС-30



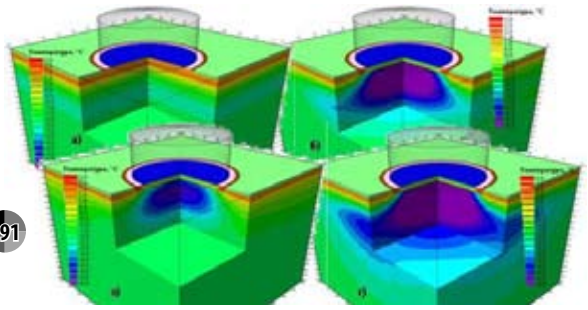


Рисунок 7 - Расчетное температурное поле грунтов в основании резервуаров с устройством теплоизоляционного экрана из пеноплекса мощностью 250 мм под основанием и использовании охлаждающей системы «мульти ГЕТ ТСГ Протвино» а) начало эксплуатации; б) на 1 октября после 1 года эксплуатации; в) на 1 октября после 2 года эксплуатации; г) на 1 октября после 5 года эксплуатации

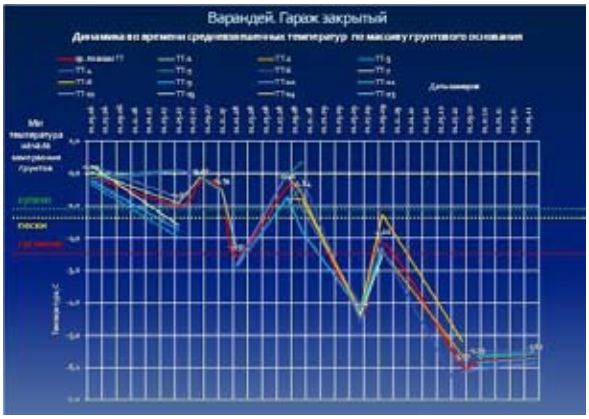


Рисунок 3 – Графики средневзвешенных температур по массиву грунтового основания

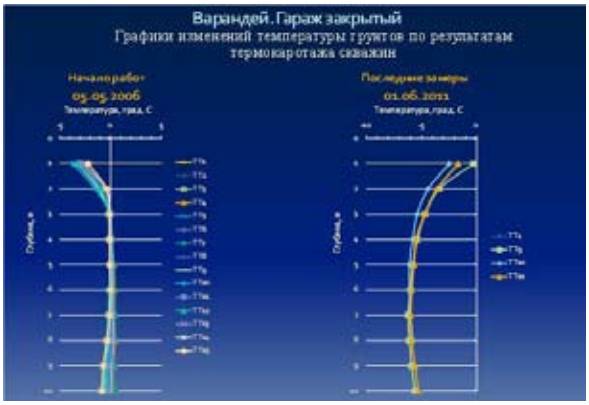


Рисунок 4 – Графики изменений температуры грунтов по результатам термокаротажа скважин

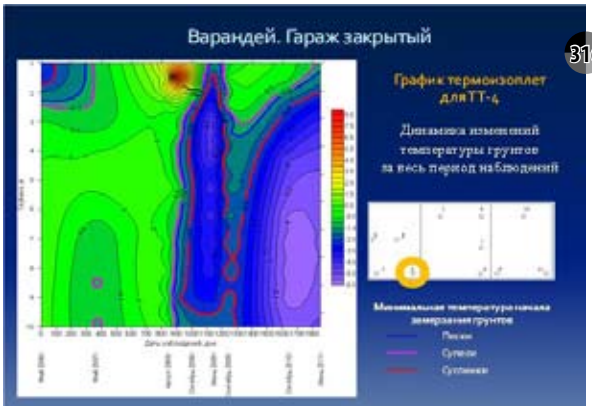


Рисунок 5 – График термоизоплет для скважины ТТ-4

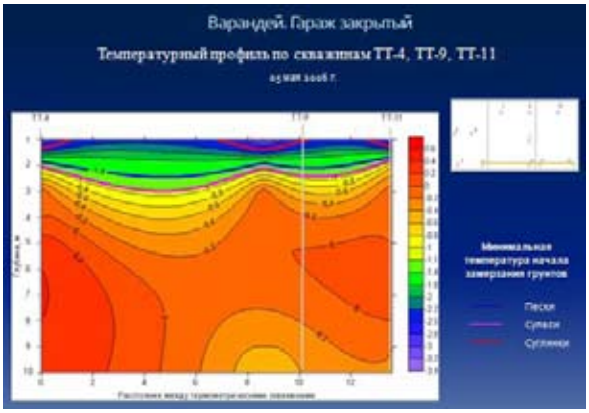


Рисунок 6 – Температурный профиль по скважинам ТТ-4, ТТ-9, ТТ-11 (на 05.05.2006г.)

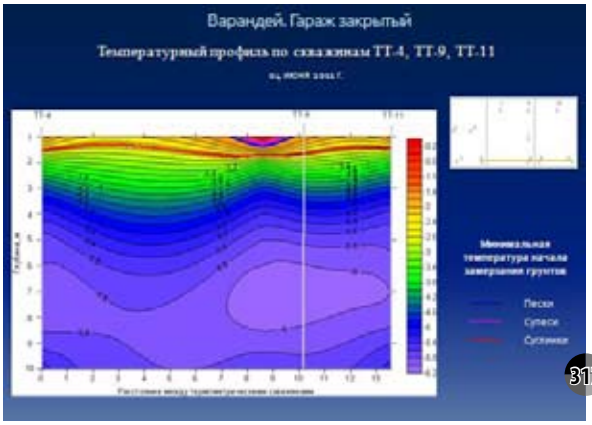


Рисунок 7 – Температурный профиль по скважинам ТТ-4, ТТ-9, ТТ-11 (на 04.06.2011г.)

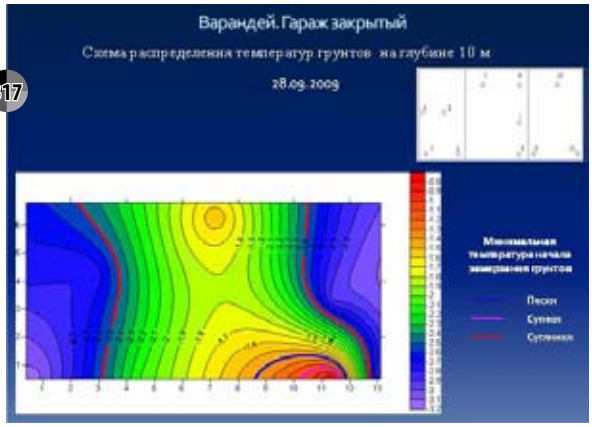


Рисунок 8 - Схема пространственного распределения температур грунтов на глубине 10м

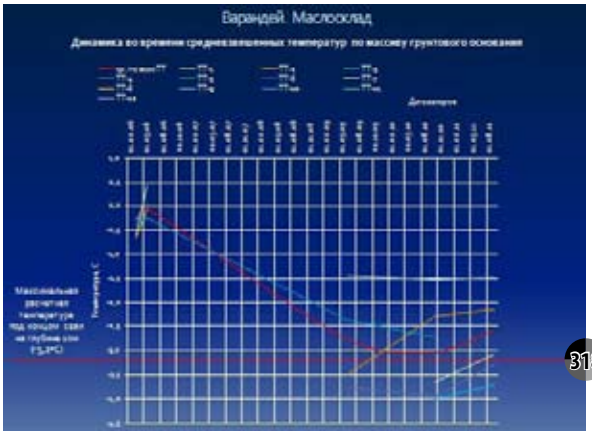


Рисунок 9 – Графики средневзвешенных температур по массиву грунтового основания

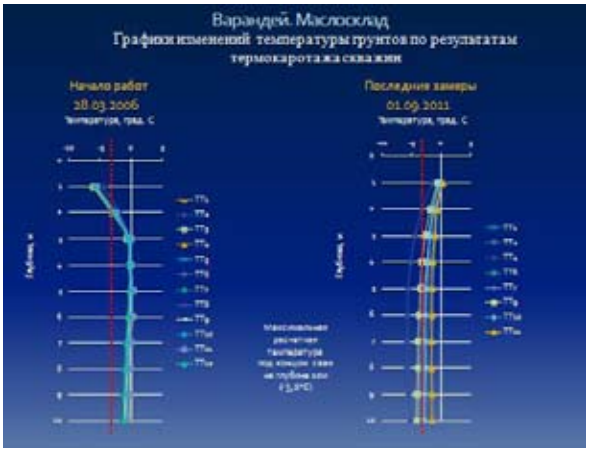


Рисунок 10 – Графики изменений температуры грунтов по результатам термокаротажа скважин

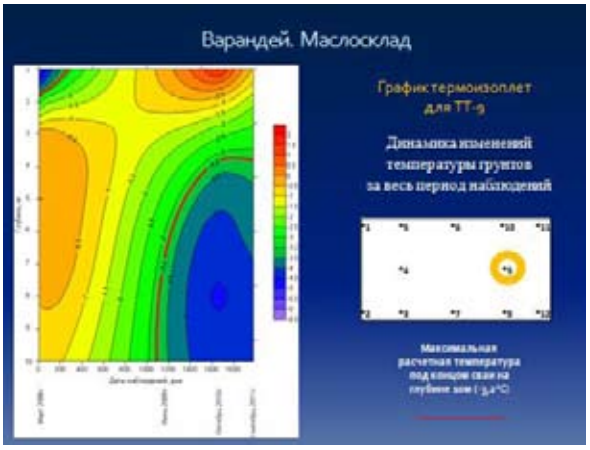


Рисунок 11 – График термоизоплет для скважины ТТ-9

317

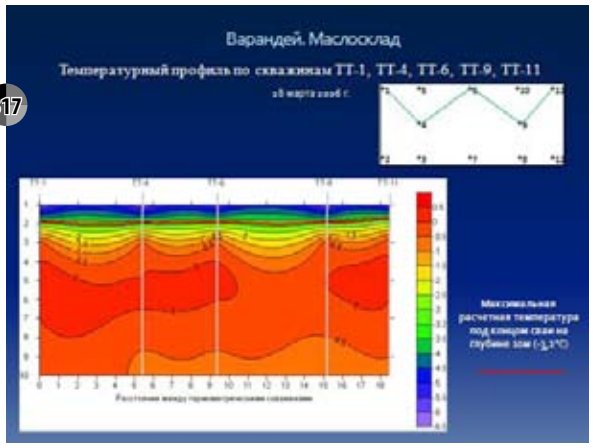
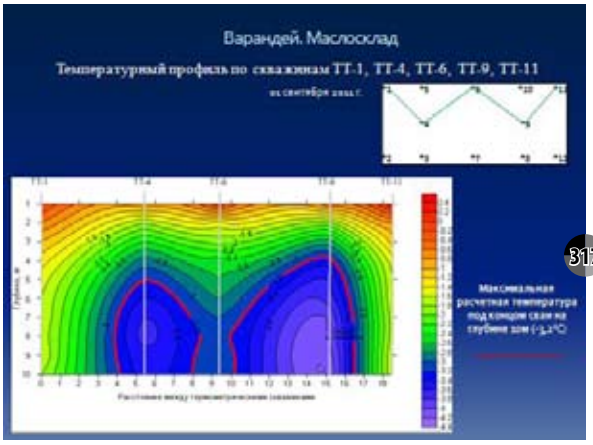


Рисунок 12 – Температурный профиль по скважинам ТТ-1, ТТ-4, ТТ-6, ТТ-9, ТТ-11 (на 28.05.2006г.)



317

Рисунок 13 – Температурный профиль по скважинам ТТ-1, ТТ-4, ТТ-6, ТТ-9, ТТ-11 (на 01.09.2011г.)

319

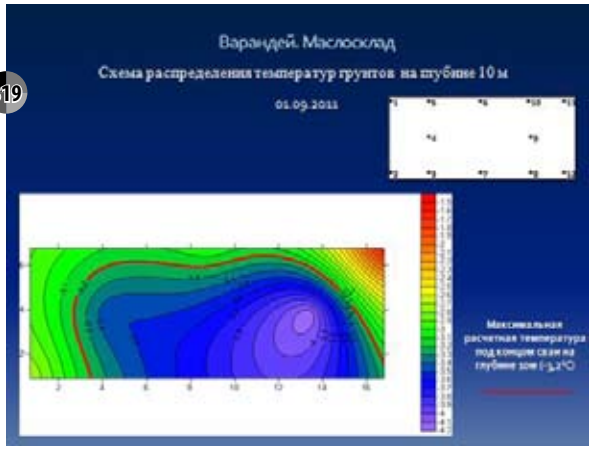
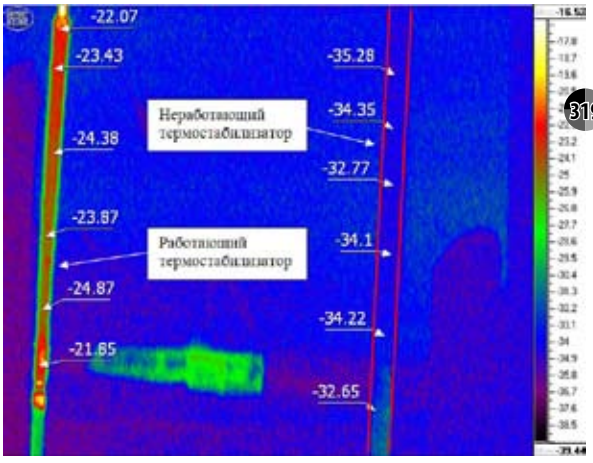


Рисунок 14 - Схема пространственного распределения температур грунтов на глубине 10м



319

Рисунок 15 - Термограммы индивидуальных «СОУ» [23]

326



Рисунок 1 – Диаграмма площадного распространения ПТК исследуемой территории по категориям литогенетической устойчивости

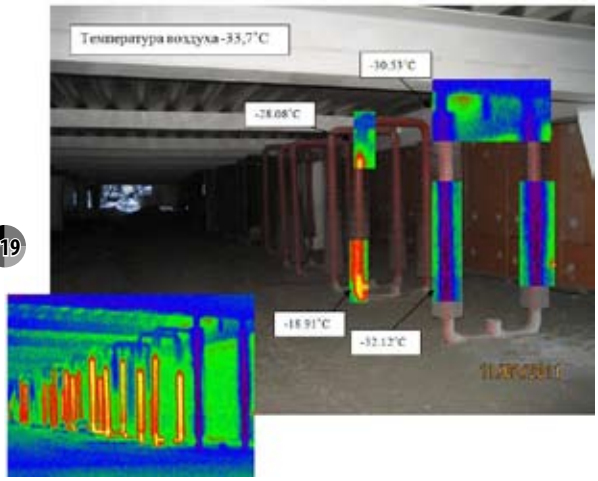


Рисунок 15 - Термограммы индивидуальных «СОУ» [23]

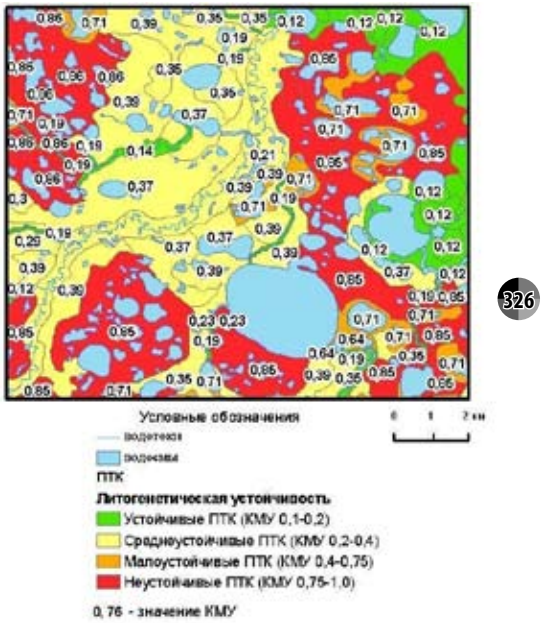
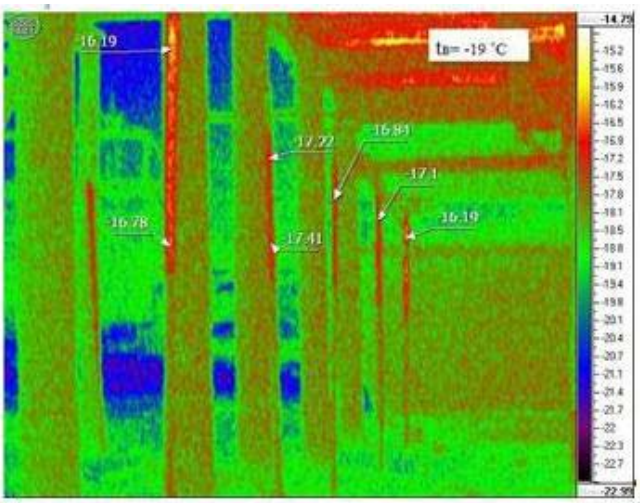


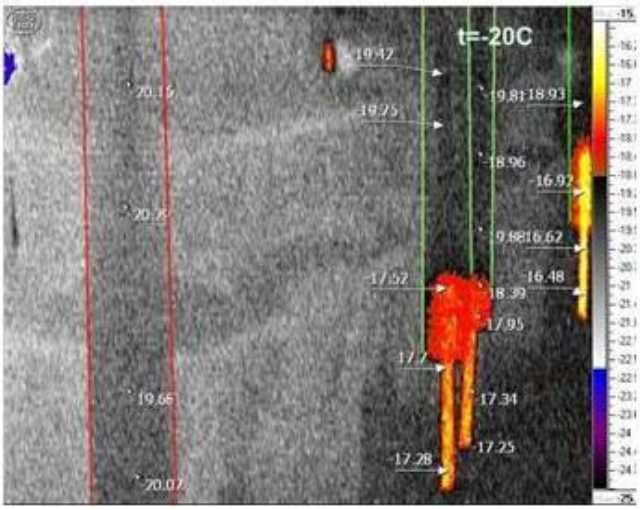
Рисунок 2 – Фрагмент карты литогенетической устойчивости ПТК исследуемой территории





ВЖК·на·850·человек·Поз.·1.3¤

¤





Парк·хим.·реагентов·№2·Поз.66/2¤

Рисунок 1 – Тепловизионная съемка на объектах ЖВК на 850 человек Поз. 1/3 и Парк хим. реагентов №2

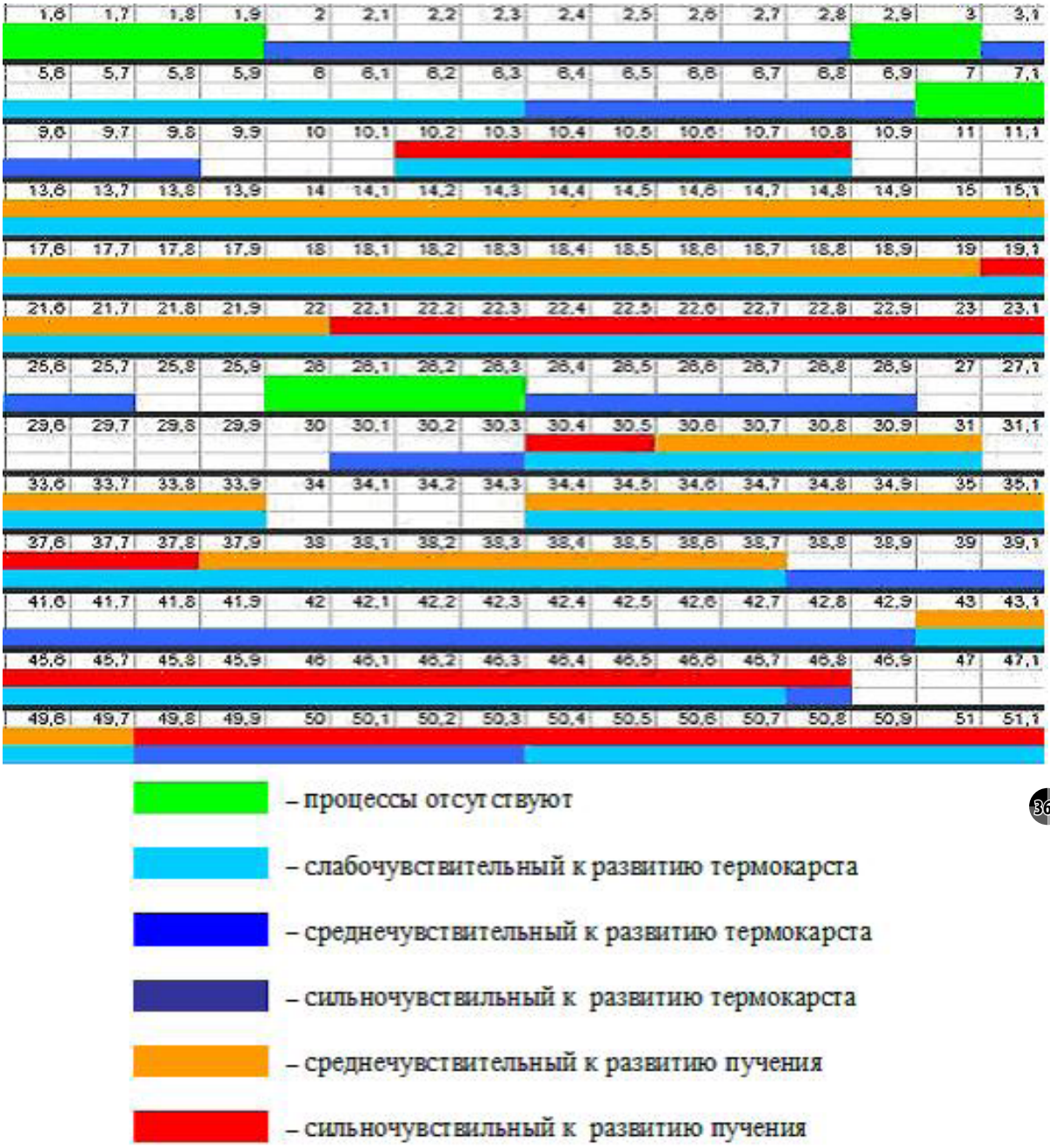


Рисунок 2 – Пример графического изображения результатов оценки риска деформаций, обусловленных развитием опасных криогенных процессов по оси трассы трубопровода

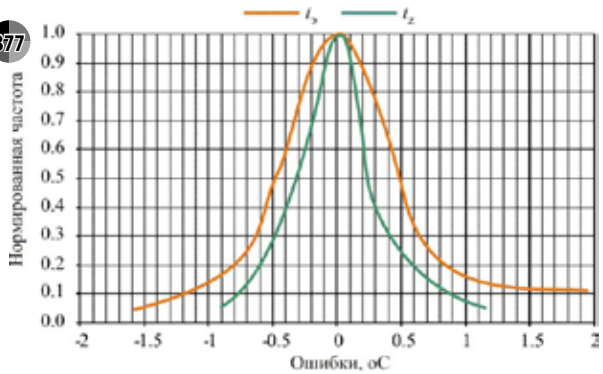


Рисунок 4 - Вариограммы ошибок вычисления характеристик температурного поля t_z и $t_э$ по моделям степенных модифицированных функций.

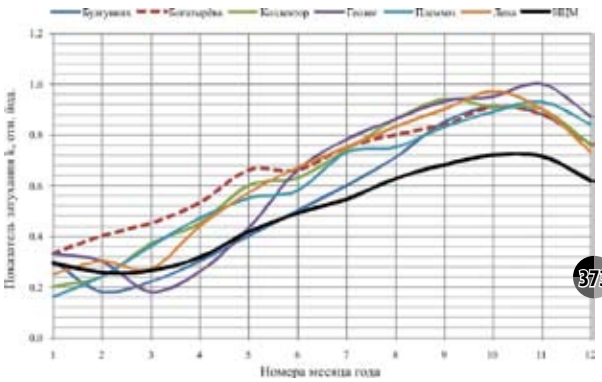


Рисунок 2 - Сезонные вариаций 2001 г. среднего показателя затухания амплитуды сигналов георадиолокации в слое мёрзлых дисперсных грунтов до глубины 10 м. Площадки мониторинга экзогенных процессов и опасных явлений в г. Якутске.

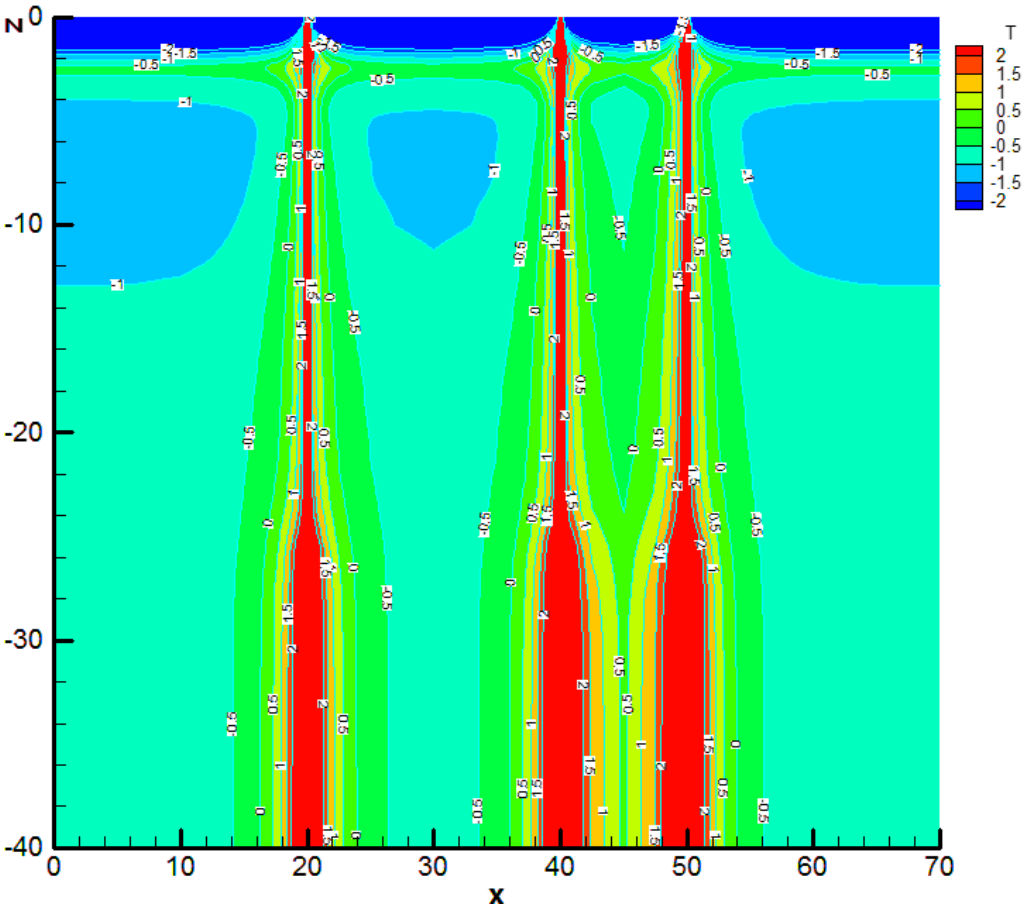


Рисунок 6 - Температурные поля от трех скважин через 5 лет после начала эксплуатации

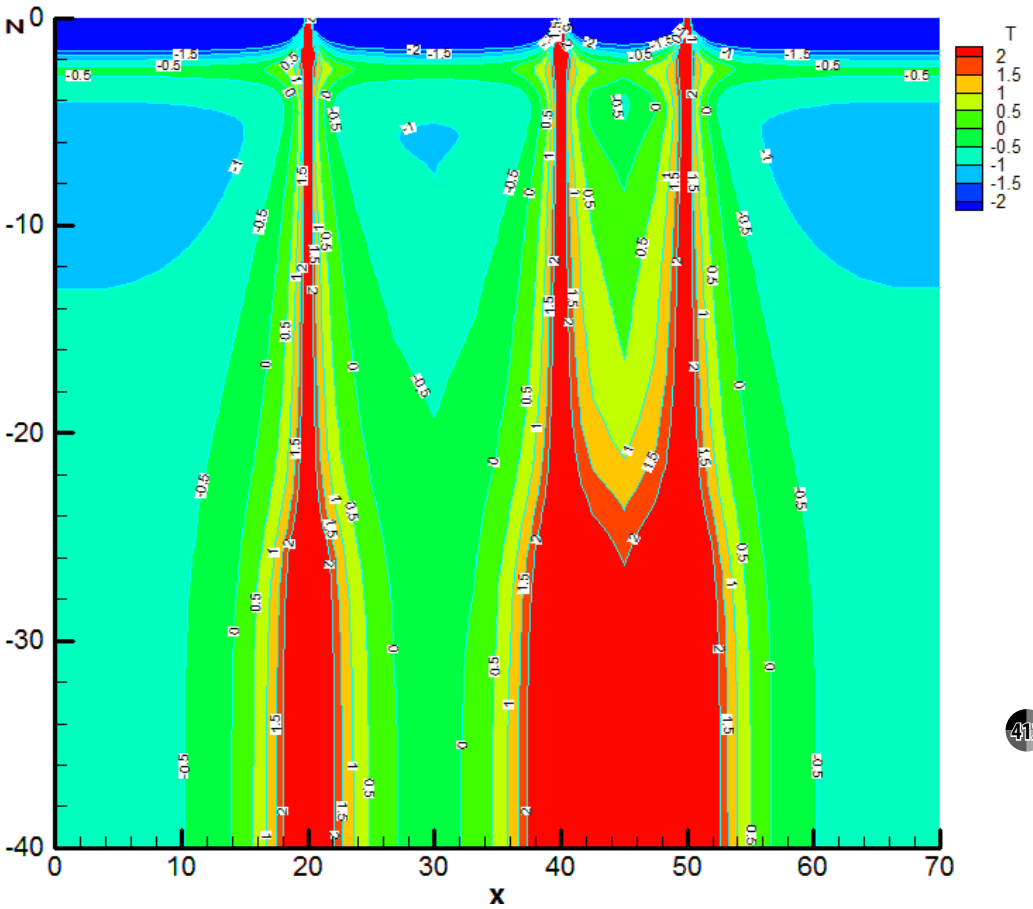


Рисунок 7 - Температурные поля от трех скважин через 15 лет после начала эксплуатации