

**Л.Н. Хрусталев**

---

**ИННОВАЦИОННЫЕ  
СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И КОНСТРУКЦИИ В ОБЛАСТИ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ  
ГРУНТОВ**

**Монография**

**RU**  
**Science**  
RU-SCIENCE.COM

Москва  
2019

**УДК 71**  
**ББК 85.118**  
**X95**

**Рецензенты:**

- Е.С. Ашпиз**, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Российского университета транспорта (МИИТ), д-р техн. наук,  
**И.А. Комаров**, профессор кафедры «Геокриология» геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д-р геол.-минерал. наук

**Хрусталеv, Лев Николаевич.**

**X95**

Инновационные строительные технологии и конструкции в области распространения многолетнемерзлых грунтов : монография / Л.Н. Хрусталеv. — Москва : РУСАЙНС, 2019. — 152 с.

**ISBN 978-5-4365-3889-1**

В этой книге читатель найдет описание многих изобретений, разработанных в последние годы. Некоторые из этих изобретений, как, например, строительство зданий по способу стабилизации кровли многолетнемерзлых грунтов, широко известны, нашли отражение в нормативной литературе и внедрены в производство с много миллиардным экономическим эффектом; другие пока остаются на стадии идеи и ждут своих энтузиастов, чтобы получить путевку в жизнь. Все они направлены на решение актуальных проблем строительства в области распространения многолетнемерзлых пород (криолитозоне), где сосредоточен широкий спектр полезных ископаемых, и их практическая реализация безусловно явится новым шагом технического прогресса при хозяйственном освоении Арктики и прилегающей к ней районов с уникальным природным явлением – многолетнемерзлыми грунтами.

***Ключевые слова:** строительные технологии, многолетнемерзлые грунты, строительство зданий, криолитозона, освоение Арктики.*

**УДК 71**  
**ББК 85.118**

**ISBN 978-5-4365-3889-1**

© Хрусталеv Л.Н., 2019  
© ООО «РУСАЙНС», 2019

**Reviewers:**

- E.S. Ashpiz**, head of the department “Railroad track and Infrastructure” of the Russian University of transport, doctor of engineering sciences,  
**I.A. Komarov**, professor of the department of geocryology of the geological faculty of Lomonosov Moscow state University, doctor of geological and mineralogical sciences

**Khrustalev, Lev Nikolaevich.**

Innovative construction technologies and structures in the area of permafrost soils : monograph / L.N. Khrustalev. — Moscow : RuScience, 2019. — 152 p.

**ISBN 978-5-4365-3889-1**

In this book, the reader will find a description of many inventions developed in recent years. Some of these inventions, such as, construction of buildings on the method of stabilization of the roof of permafrost soils are widely known. They were reflected in the regulatory literature and introduced into production with a multibillion economic effect; others are still at the stage of ideas and waiting for enthusiasts to get a start in life. All of them are aimed at solving urgent problems of construction in the area of distribution of permafrostrocks (cryolitozone), where a wide range of mineral resources are concentrated, and their practical realization will certainly be a new step in the technical progress in the economic development of the Arctic and its surrounding areas with a unique natural phenomenon – permafrost soils..

***Key words:** construction technologies, permafrost soils, building construction, permafrost zone, Arctic exploration*

**ISBN 978-5-4365-3889-1**

© Khrustalev L.N., 2019  
© LLC «RuScience», 2019

# Содержание

|  |            |
|--|------------|
| <b>Предисловие .....</b>   | <b>6</b>   |
| <b>Глава 1. Характеристика криолитозоны.....</b>   | <b>8</b>   |
| 1.1 Распространение многолетнемерзлых грунтов в криолитозоне.....  | 8          |
| 1.2 Подземные воды криолитозоны .....  | 10         |
| 1.3 Мерзлотно-геологические процессы в криолитозоне.....   | 11         |
| 1.4 Характеристика континентального шельфа арктических морей<br>России. ....   | 17         |
| <b>Глава 2. Использование естественного и искусственного холода<br/>для обеспечения надежности оснований инженерных сооружений .....</b> | <b>20</b>  |
| 2.1 Технологии охлаждения, замораживания грунта .....  | 20         |
| 2.2 Расчет охлаждения и замораживания грунта .....   | 34         |
| <b>Глава 3. Стабилизация мерзлотных условий в основании зданий<br/>и сооружений.....</b>   | <b>42</b>  |
| 3.1 Стабилизация мерзлотных условий<br>с помощью охлаждающего контура .....  | 42         |
| 3.4 Расчет способов стабилизации .....   | 54         |
| <b>Глава 4. Использование тепловых насосов<br/>в строительных конструкциях .....</b>   | <b>83</b>  |
| 4.1 Принцип работы теплового насоса .....  | 83         |
| 4.2 Поверхностный фундамент, совмещенный с ТН.....   | 86         |
| 4.3 Использование тепловых насосов<br>в конструкции нефтяных резервуаров .....   | 91         |
| 4.4 Расчет теплового насоса.....   | 93         |
| <b>Глава 5. Использование льда для строительства стационарных<br/>буровых платформ на шельфе арктических морей.....</b>                  | <b>103</b> |
| 5.1 Шельф арктических морей – кладовая углеводородов, ледостойкие<br>стационарные платформы для бурения на нефть и газ.....              | 103        |
| 5.2 Ледогрунтовый остров .....   | 107        |
| 5.3 Ледяной остров .....   | 110        |
| 5.4 Тепловой и механический расчет островов.....   | 115        |
| <b>Глава 6. Добычная скважина, не оказывающая тепловое влияние<br/>на вмещающую среду .....</b>  | <b>130</b> |
| 6.1 Конструкция скважины .....   | 131        |
| 6.2 Расчет зеротера .....  | 134        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Глава 7. Геокриологические барьеры</b>  |            |
| <b>для хранения радиоактивных отходов.....</b>   | <b>139</b> |
| 7.1 Мерзлый грунт – идеальная среда для хранения радиоактивных отходов.....                                  | 139        |
| 7.2 Существующая конструкция хранилища РАО .....   | 141        |
| 7.3 Предлагаемая конструкция хранилищ РАО в саркофаге из мерзлого грунта .....                               | 142        |
| 7.4 Результаты математического моделирования теплового взаимодействия хранилища РАО с вмещающей средой ..... | 143        |
| 7.5 Расчет геокриологических барьеров .....  | 146        |
| <b>Литература .....</b>  | <b>148</b> |

# Предисловие

Многолетнемерзлые грунты занимают обширную территорию нашей страны, которая называется криолитозоной. Площадь криолитозоны превышает 11 млн км<sup>2</sup>. Здесь производится около 20% ВПП России и 22% общероссийского экспорта. В регионе добывается около 90% никеля и кобальта, 60% меди, 96% платиноидов, 100% барита и апатитового концентрата. В криолитозоне сосредоточены богатейшие нефтегазовые месторождения, расположенные как на суше, так и на континентальном шельфе. Разработка этих месторождений, геологические запасы которых достигают 100 млрд. тонн условного топлива, будет осуществляться, по крайней мере, до конца нынешнего столетия. Там же находятся крупнейшие в мире города, построенные на мерзлых толщах, – Воркута, Надым, Уренгой, Ямбург, Норильск, Якутск, Магадан и др. с населением 100–200 тыс. жителей. В настоящее время этот регион интенсивно осваивается, несмотря на крайне суровые природные условия. Освоение сопряжено с большими трудностями и часто приводит к экологическим нарушениям природной обстановки (тепловому загрязнению геологической среды), следствием которых является деградация многолетнемерзлых толщ. Деградация вызывает потерю несущей способности оснований инженерных сооружений и массовые деформации последних. Как нигде здесь требуются экологически чистые строительные технологии и конструкции, отличающиеся высокой сборностью и надежностью.

Отчасти эти технологии и конструкции были созданы, и их описание помещено в настоящей книге. Они отличаются от известных отсутствием теплового загрязнения геологической среды, повышением надежности оснований инженерных сооружений, существенным ростом производительности труда, снижением энергетических затрат и себестоимости работ. Только учтенный экономический эффект от внедрения некоторых из них в производство в сегодняшних ценах составил более 6 млрд. руб. Тем из них, которые пока еще остаются на стадии проектной проработки или только идеи, прогнозируется не меньший экономический результат, если они будут использованы на практике.

Популяризации этих технологий и конструкций посвящается настоящая книга. Она состоит из 7 глав, в которых дается описание ряда изобретений, в том числе разработанных автором или под руководством автора во время его 26 летней научной работы на Севере в северном отделении научно-исследовательского института оснований

и подземных сооружений им М.Н. Герсеванова и 34 летней научно-педагогической работы в МГУ им М.В. Ломоносова. Все эти изобретения направлены на решение актуальных проблем строительства в криолитозоне, региона с уникальным природным явлением - многолетнемерзлыми грунтами, которые требуют к себе особо уважительного отношения при их хозяйственном освоении, в силу своих специфических свойств и протекающих в них процессов. Незнание этих особенностей криолитозоны при первых шагах хозяйственного освоения региона приводило к большим материальным потерям. Поэтому первая глава книги посвящается этим особенностям, а последующие главы – способам приспособления к ним с минимальными экономическими и трудовыми потерями.

# Глава 1. Характеристика криолитозоны

## 1.1 Распространение многолетнемерзлых грунтов в криолитозоне

Под криолитозоной понимается обширная территория суши и шельфа арктических и антарктических морей, занимаемая горными породами, находящимися при отрицательной температуре и содержащими в своем составе лед. В России многолетнемерзлые породы (в инженерной практике они называются грунтами) занимают около 65% территории и значительную акваторию шельфа арктических морей, площадь которых пока еще нам не известна. По характеру распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) по площади можно выделить пять областей [Ершов, 2002]:

- сплошного распространения ММГ, к ним относятся области, где мерзлые грунты занимают более 95% площади, температура мерзлых пород в этих областях ниже минус  $3^{\circ}\text{C}$  ;
- преимущественно сплошного распространения ММГ, к ним относятся области, где мерзлые грунты занимают 90- 95% площади, температура мерзлых грунтов в этих областях минус  $0,5-3^{\circ}\text{C}$  ;
- прерывистого распространения ММГ, к ним относятся области, где мерзлые грунты занимают 75-90 % площади, температура мерзлых грунтов в этих областях минус  $0,2-2^{\circ}\text{C}$  ;
- массивно островного распространения ММГ, к ним относятся области, где мерзлые грунты занимают более 25-75 % площади, температура мерзлых грунтов в этих областях минус  $0,2-2^{\circ}\text{C}$  ;
- островного и редко островного распространения ММГ, к ним относятся области, где мерзлые грунты занимают менее 25 % площади, температура мерзлых грунтов в этих областях выше минус  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

Границы между областями очень размыты и переход одной области в другую происходит на большой площади. В целом распространение мерзлых толщ подчиняется широтной и высотной зональности, а именно, их количество возрастает и температура понижается с юга на север и снизу вверх. Начиная с первых появлений мерзлых грунтов, при движении с юга на север или с подъемом в гору области расположены в следующем порядке: - островного и редко островного распространения – массивно островного распространения - прерывистого распространения - преимущественно сплошного распространения - сплошного распространения.



При этой общей закономерности возможны зональные отличия, обусловленные местными условиями теплообмена в системе литосфера – атмосфера. Наибольшей пестротой характеризуется территория, прилегающая к южной границе многолетнемерзлых грунтов. Сама южная граница выражена не четко и ее отображение на карте является весьма условным. Вначале мерзлые породы обнаруживаются только в пределах участков верховых болот, сложенных оторфованными суглинками и супесями, а также на торфяных буграх пучения, затем они появляются на участках густых темнохвойных лесов, затеняющих почву летом и задерживающих снег на кронах зимой, уменьшая его количество на дневной поверхности. В предгорьях мерзлые грунты впервые обнаруживаются на затененных склонах с чехлом суглинисто-щебенистых образований, затем - на участках крупно глыбовых курумов и крутых затененных склонах, лишенных снега. Далее они встречаются повсюду, хотя даже в самых суровых климатических условиях ММГ не распространены повсеместно. В криолитозоне мерзлые породы могут отсутствовать на участках речных долин, в том числе под наиболее прогреваемыми солнцем горными склонами и водоразделами, в местах концентрированной разгрузки подземных вод или на площадках их инфильтрационного питания, под частью современных ледников, вулканическими жерлами, над внутри земными аномалиями, связанными с окислительными реакциями, вулканическими процессами и т.п.

По строению мерзлых толщ по вертикали выделяют три возможных типа:

- многолетнемерзлые толщи сливающегося типа (кровля ММГ совпадает с подошвой слоя сезонного оттаивания);
- многолетнемерзлые толщи не сливающегося типа (кровля ММГ не совпадает с подошвой слоя сезонного промерзания, между ними находится талый слой);
- многолетнемерзлые толщи слоистого типа (два слоя ММГ находятся друг над другом и разделены талым прослойком, нижний слой является реликтовым, он образовался в результате древнего промерзания грунта, а верхний – современного).

В мерзлых породах часто находятся включения чистого льда, которые при оттаивании могут давать очень большие осадки дневной поверхности. Формы залегания льда самые разнообразные:

- пластовая – лед залегает слоем сравнительно одинаковой мощности (от нескольких сантиметров до десятков метров);

- линзовидная – лед имеет увеличенную в средней части площадь до нескольких десятков квадратных метров;
- жильная – лед заполняет трещины скальных и полускальных пород;
- клиновидная – лед заполняет морозобойные трещины на глубину до 20 м.;
- гнездовидная – лед заполняет отдельные полости в виде небольших включений;
- натечная – лед находится в виде отдельных глыб наземного происхождения.

В пределах массива мерзлых грунтов могут находиться талые грунты, так называемые талики, которые могут быть сквозными и несквозными. Сквозные талики, как правило, образуются под крупными реками и озерами, несквозные – под отрицательными формами рельефа. Число таликов с севера на юг возрастает, их суммарная площадь увеличивается и мерзлые грунты исчезают. Это хорошо иллюстрируется на схеме вертикального строения мерзлых толщ (рис. 1.1).

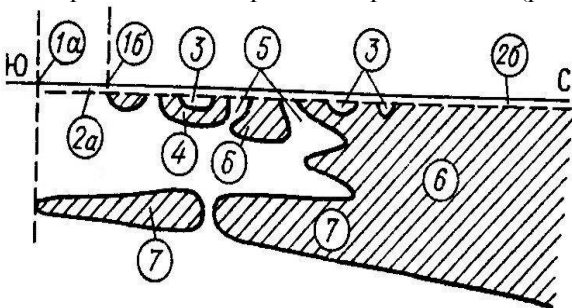


Рис 1.1 Вертикальное строение мерзлых толщ с юга на север  
 1 – южная граница реликтовых (1а) и современных (1б) многолетнемерзлых толщ; 2 – слой сезонного промерзания (2а) и протаивания (2б); 3 – несквозные талики; 4 – современные не сливающиеся мерзлые толщи

## 1.2 Подземные воды криолитозоны

Наличие в составе многолетнемерзлых грунтов талых делает многолетнемерзлые грунты проницаемыми для подземных вод. Подземные воды в криолитозоне встречаются в талых и сезонно талых слоях и подразделяются на над мерзлотные, межмерзлотные и под мерзлотные. Они могут сообщаться между собой и водоемами.

Над мерзлотные воды питаются в основном за счет атмосферных осадков. Их зеркало в основном повторяет рельеф местности и воды двигаются в сторону уклона местности, при этом кровля ММГ является для них водоупором.

Межмерзлотные воды встречаются реже. Существование их возможно, как правило, благодаря связи с над мерзлотными и под мерзлотными водами и постоянному переносу тепла водой в межмерзлотную талую зону. Возможно также наличие межмерзлотных вод в замкнутых таликах, если эти воды засолены и температура их заморозки понижена. Межмерзлотные воды имеют в основном две формы залегания: пластово-линзовое (в таликах аллювиальных отложений речных террас) и жильное (в трещиноватых скальных и полускальных породах или морозобойных трещинах).

Под мерзлотные воды распространены повсеместно. К ним относятся воды артезианских бассейнов, расположенных непосредственно под мерзлой толщей, и воды более глубоких горизонтов.. Под мерзлотные воды питаются главным образом за счет просачивания над мерзлотных и речных вод через сквозные талики и трещиноватые зоны. Обычно под мерзлотные воды обладают напором и изливаются на поверхность через естественные выходы. Иногда под мерзлотные воды, поднимаясь с больших глубин, имеют высокую температуру, что обеспечивает существование незамерзающих источников в суровом климате.

Кроме талых пород с положительной температурой в разрезе мерзлых пород встречаются талые породы с отрицательной температурой (переохлажденные породы), которые не замерзают по причине их большой засоленности. Прочность таких пород невысокая и они существенно ухудшают качество оснований. Особенно опасны находящиеся в грунте незамерзающие солевые растворы (криопэги), которые под давлением от сооружения могут мигрировать с оттаиванием прилегающих мерзлых грунтов. Криопэги широко распространены на побережье арктических морей.

### **1.3 Мерзлотно-геологические процессы в криолитозоне**

Для хозяйственного освоения криолитозоны опасными являются не только криопэги, но и мерзлотно-геологические процессы, которые широко распространены на суше. Они подразделяются на три группы:

а) мерзлотные процессы: морозобойное растрескивание, жильное льдообразование, криогенное выветривание, морозное пучение, наледообразование и термокарст;

б) склоновые процессы: солифлюкция и курумообразование;

в) процессы, обусловленные механическим воздействием на мерзлые грунты ледников, водных потоков и ветра: термоэрозия, термообразия, термоденудация.

Особенности распространения, интенсивности развития и проявления перечисленных процессов в целом определяется ландшафтно-климатическим и мерзлотно-геологическим факторам и условиям. Рассмотрим их последовательно.

Морозобойное растрескивание. Растрескивание происходит в основном по двум причинам: а) вследствие разной для отдельных слоев мерзлого грунта величины отрицательной температуры, обуславливающей неодинаковое укорочение отдельных слоев, и б) вследствие образования местных бугров пучения в результате неравномерной миграции влаги.

Жильное льдообразование. В образовавшиеся трещины, как правило, попадает вода, она замерзает и образует ледяные жилы. Ледяные жилы могут расти за счет вторичного растрескивания и заполнения трещин льдом и оттаивать с заполнением образовавшейся полости грунтовым материалом (грунтовые жилы). Жильные структуры подразделяются на четыре типа: повторно-жильные льды, изначально-грунтовые жилы, первично-песчаные жилы, псевдоморфозы по повторно-жильным льдам.

Повторно-жильные льды образуются ниже слоя сезонного оттаивания на периодически покрывающихся водой участках рельефа. Изначально-грунтовые жилы возникают в слое сезонного промерзания в условиях недостаточного увлажнения. Первично-песчаные жилы образуются главным образом в арктических и субарктических районах в условиях недостаточного увлажнения и интенсивного ветра. Зимой сильный ветер сдувает снежный покров и заполняет появляющиеся морозобойные трещины песком. Псевдоморфозы по повторно-жильным льдам возникают в результате вытаявания ледяных жил и заполнения вытаявшего пространства грунтом.

Интенсивность морозобойного растрескивания и частота появления морозобойных трещин возрастают с юга на север.

Криогенное выветривание. Процесс развивается в скальных грунтах за счет периодического замерзания и оттаивания воды в трещинах. Интенсивность процесса зависит от числа циклов промерзания-

оттаивания скального грунта, амплитуды температурных колебаний, градиента температуры в грунте и количества воды в трещинах. Увлажненные грунты больше подвержены разрушению, чем сухие. Продуктами разрушения являются: глыбы, щебень, дресва, песок и пыль.

Морозное пучение. Увеличение объема грунтов при промерзании, которое в природных условиях, вследствие неоднородности их состава, неравномерности распределения влаги и различия в условиях питания подземными водами, всегда бывает неравномерным, носит название морозного пучения грунтов. Пучение грунтов при промерзании происходит как в связи с увеличением объема содержащейся в них воды (на 9%) при переходе ее из жидкого в твердое состояние, так и вследствие замерзания новых порций воды, мигрируемой под действием молекулярных сил из соседних не промерзших областей грунта. В процессе морозной миграции, особенно в случае отсутствия подтока воды извне, возникает значительное перераспределение влаги. Минеральные прослойки при этом испытывают внутри объемную компрессию и оказываются несколько обезвоженными в результате удаления из них воды в места образования ледяных прослоек. При отсутствии подтока воды извне (замкнутая система) общая величина морозного пучения грунтов будет значительно меньше, по сравнению с увеличением их объема при возможности подтока воды извне (открытая система), когда на досягаемой глубине есть область питания водой, например, грунтовые воды или талые обводненные грунты. Как показывают наблюдения, чем медленнее происходит процесс промерзания грунтов, тем больше их пучение, так как к фронту промерзания успевают подтягиваться большие порции воды, преодолевая сопротивление трению по пути движения. По способности к пучению грунты выстраиваются в следующий убывающий ряд: пылеватые – глинистые – песчаные грунты. Причем крупнозернистые песчаные грунты не подвержены пучению совсем (за исключением случая напорного действия грунтовых вод). С понижением отрицательной температуры пучение замедляется, а затем прекращается вовсе. Так, например, в песках процесс прекращается уже при температуре минус  $0.5^{\circ}\text{C}$ , в глинах – минус  $4^{\circ}\text{C}$ .

В результате пучения происходит сортировка грунта – крупно-обломочные включения перемещаются к дневной поверхности, образуя на ней каменные поля. Если процесс промерзания идет сверху и со стороны открытых морозобойных трещин, то тиксотропные грунты выдавливаются на поверхность и образуют на ней пятна – медальоны.

Пучение может приводить к образованию гидролаколитов, туфов и бугров – могильников. Первые могут быть результатом сезонного промерзания грунтов, вторые и третьи – многолетнего. Многолетнее пучение приводит к образованию бугров пучения, которые подразделяются: на сегрегационные (миграционные), инъекционные и инъекционно-сегрегационные. Первые формируются в результате миграции внутри грунтовой влаги к фронту промерзания под влиянием градиента температуры и влаги. Ежегодный прирост их может достигать 25 см. Инъекционные бугры пучения, являющиеся результатом замерзания внедряющейся под давлением грунтовой воды, а иногда и разжиженного грунта, могут формироваться при промерзании объемов талого грунта (например, под озерных и под русловых таликов), окруженных мерзлыми породами, или в открытых системах, где подток воды обусловлен гидродинамическим напором. Они обычно приурочены к местам разгрузки напорных грунтовых вод.

Наледи. Наледями называются слоистые ледяные массивы на поверхности земли, льда или инженерных сооружений. Они возникают при замерзании излившейся на поверхность воды. Над мерзлотные воды зимой получают напор, вследствие промерзания грунта и уменьшения живого сечения потока и изливаются на поверхность (грунтовые наледи). Если промерзает речной поток, то вода, разрушая лед, изливается на его поверхность и, замерзая, образует речную наледь. Грунтовая наледь появляется на участках, где движению грунтовых вод препятствует какая-либо преграда, например, местное увеличение промерзания с поверхности (рис. 1.2, а) или залегание слабо фильтрующих грунтов. Грунтовая наледь может образовываться из-за скопления воды и возникновения бугра под почвенным слоем с последующим прорывом вод из него на поверхность (рис.1.2, б), под отсыпанным в летний период массивом грунта, шлака, золы и т.д. (рис.1.2, в), в результате устройства выемок, водоотводных канав за счет промерзания водоносного слоя под выемками. Прорыв грунтовых вод с образованием наледи имеет место в домах и других тепловыделяющих сооружениях. По размерам наледи изменяются от очень мелких (площадь  $1 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ , объем до  $1 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ ) до гигантских (площадь более  $1 \cdot 10^7 \text{ м}^2$ , объем более  $2.2 \cdot 10^7 \text{ м}^3$ ). По времени существования выделяются однолетние (полностью оттаивающие летом) и многолетние (существующие ряд лет) наледи.

Термокарст. Процесс образования просадочных и провальных форм рельефа в результате вытаивания подземных льдов или сильно льдистых грунтов называется термокарстом. Механизм процесса заключается в уплотнении грунтов после оттаивания под действием

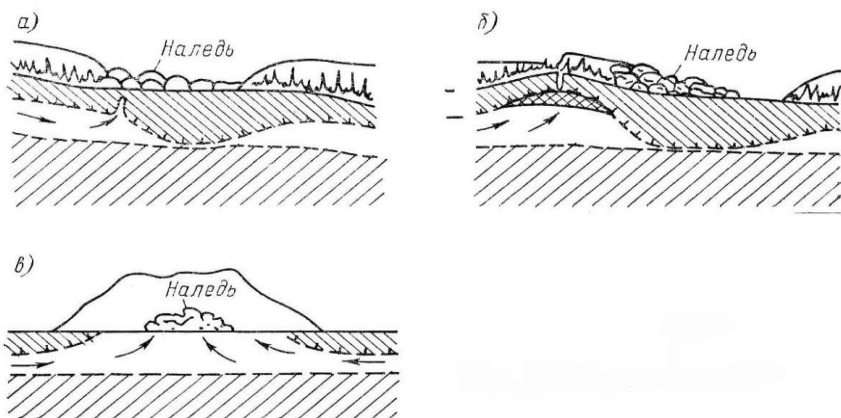


Рис. 1.2 Схема образования наледей

а – при наличии мерзлой преграды на пути движения подземных вод;  
 б – при скоплении воды и возникновении бугра под почвенным слоем;  
 в – при наличии локального теплоизолятора на поверхности грунта (шлак, зола, опилки и т.п.)

бытового давления оттаявшего слоя с отжатием воды на поверхность или в водоносный горизонт. Термокарст начинается, когда сезонное оттаивание грунта в силу многих причин (например, аномальное повышение температуры воздуха, удаление растительного покрова, скопление снега и др.) превосходит глубину залегания подземных льдов или сильно льдистых грунтов. Осадка грунтов приводит к появлению отрицательных форм рельефа, на которых в дальнейшем накапливается снег, что уменьшает зимнее промерзание грунта, оно становится меньше летнего оттаивания и процесс вступает в стадию саморазвития. Со временем термокарстовые понижения в рельефе заполняются водой и образуются термокарстовые озера глубиной 0.5-20 м. с положительной средней годовой температурой поверхности дна озера, что приводит к еще большему оттаиванию грунтов. При развитии термокарста по повторно-жильным льдам на дренированных участках образуются положительные формы рельефа (байджерахи и бугристые полигоны) за счет оттаивания ледяных жил и опускания поверхности над ледяными жилами.

Солифлюкция. Процесс вязкопластического движения оттаявшего грунта деятельного слоя по склону под действием гравитационных сил называется солифлюкцией. Движение происходит, когда сила сдвига, зависящая от крутизны склона, оказывается больше сил сцепления в массиве оттаявшего грунта, включая дерновый покров, и сил трения по контакту с мерзлым грунтом.

В процессе солифлюкции происходит снос, транзит и аккумуляция грунта. Различают два вида солифлюкции: медленную, которая отличается сравнительно равномерным по площади смещением грунта с небольшими скоростями (2-10 см/год), и быструю (сплывы грунта), которая сопровождается нарушением внутренних связей в грунте, а также разрывом дернового покрова. При этом скорость смещения грунта может достигать 1м/ч.

Курумообразование. Процесс медленного перемещения вниз по склону крупнообломочного материала за счет его морозного выпучивания называется процессом курумообразования. В комплекс механизмов движения курумов входят также соскальзывание обломков скальных грунтов по льду, вязкопластическая деформация мелкозема, движение материала под действием гидродинамического напора и суффозия (вынос мелких частиц грунта фильтрующей через него водой). Курумы образуют каменные потоки, нагорные террасы, заполняют узкие ложбины, слагают обширные каменные поля. Скорость транспортировки материала обычно составляет сантиметры в год и в значительной степени определяется крутизной склона, степенью его увлажненности, содержанием в крупнообломочных грунтах мелкозема и льда.

Термоабразия. Разрушение многолетнемерзлых берегов морей, озер, водохранилищ в результате совместного механического и теплового воздействия на них гидросферы называется термоабразией. Скорость отступления подверженных термоабразии берегов колеблется от долей метра до нескольких метров в год и зависит от льдистости грунтов, температуры воды и высоты и длины волны. В большинстве случаев процессу разрушения и сноса материала предшествует процесс его оттаивания (хотя возможно и разрушение мерзлого грунта). Причем оттаивание происходит по линейному закону, поскольку оттаявший слой уносится волной и не оказывает термического сопротивления оттаиванию последующего слоя.

Термоэрозия. Процесс размыва постоянными и временными водотоками оттаивающих грунтов называется термоэрозией. Здесь наблюдается та же картина, что и в предыдущем случае, вначале ММГ оттаивают, затем размываются и уносятся водным потоком. Интенсив-



ность развития термоэрозии определяется соотношением скоростей оттаивания и размыва. Последние зависят от многих причин, которые мы уже отмечали, когда говорили о термоабразии. По сути это очень похожие процессы и отличаются только тем, что при термоабразии разрушение и перенос материала осуществляется за счет энергии волны, а при термоэрозии – за счет энергии струи. Развитие термоэрозии чаще всего начинается с нарушения почвенно-растительного покрова и стока поверхностных вод. По мере развития процесса появляются промоины, которые затем могут трансформироваться в овраги. На ранних стадиях процесса скорость роста промоин в длину достигает 20, а иногда и 150 м. в год.

**Термоденудация.** Разрушение многолетнемерзлых берегов морей, озер, водохранилищ в результате совместного механического и теплового воздействия на них атмосферы называется термоденудацией. Процесс схож с процессами термоабразии и термоэрозии, отличие заключается лишь в том, что разрушение и перенос материала здесь осуществляется за счет энергии ветра. Термоденудация по скорости разрушения опережает термоабразию. Поэтому надводная часть берега, как правило, разрушается быстрее подводной. Это обстоятельство следует учитывать при возведении гидротехнических сооружений на континентальном шельфе арктических морей.

## **1.4 Характеристика континентального шельфа арктических морей России.**

Под континентальным шельфом арктических морей России понимается прибрежная зона Баренцева, Белого, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского моря, простирающаяся от береговой линии до материкового склона. Дно этих морей – подводное продолжение платформенных структур суши и представляет зону с глубиной моря менее 200 м. У берегов Сибири ширина шельфа достигает 900 км, у берегов Северной Америки она уменьшается до 100 км. Площадь всего арктического шельфа 8.359 млн. км<sup>2</sup>. Морфометрические характеристики арктических морей России представлены в табл. 1.1. Главное отличие арктического шельфа от остальных – наличие льда, надводного и подводного. Последний сосредоточен ниже дна моря в толще грунтовых отложений, которые принято называть многолетнемерзлыми грунтами (ММГ). Перекрываемые морской водой сформировавшиеся ММГ начали деградировать.

**Морфометрические характеристики арктических морей России**

| Море                   | Площадь,<br>кв.км | Объем,<br>куб. км | Глубина<br>средняя, м | Глубина<br>максим.<br>м |
|------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| Баренцева              | 1424              | 316               | 222                   | 600                     |
| Белое                  | 90                | 6                 | 67                    | 350                     |
| Карское                | 883               | 98                | 111                   | 600                     |
| Лаптевых               | 662               | 353               | 533                   | 3385                    |
| Восточно-<br>Сибирское | 913               | 49                | 54                    | 915                     |
| Чукотское              | 595               | 42                | 71                    | 1256                    |

К настоящему времени в результате деградации в западном секторе Арктики сохранились лишь мерзлые грунты островного и массивно островного распространения, в восточном – прерывистого распространения. Мощность ММГ изменяется от десятков до сотен метров. У берегов она максимальна и убывает в сторону моря до нуля. При этом ее кровля расположена непосредственно под дном моря или на некоторой от него глубине, порядка 10-20 м [Дмитренко и др., 2001].

Большая часть водной поверхности Арктики в течение всего года покрыта надводными (плавучими) однолетними и многолетними льдами. Толщина однолетних льдов равна 0.8 – 1.8 м, многолетних – 3 м и более. Сплошность ледяных полей нарушают трещины, полыньи и торосы. Последние, образуемые при столкновении ледяных полей во время их дрейфа, обычно имеют высоту 4 – 5 м, в отдельных случаях – до 12 – 15 м. Встречаются айсберги и ледяные острова (оторвавшиеся участки шельфовых ледников).

Ледовитость российских арктических морей представлена в табл. 1.2. Наличие льда создает большие проблемы при хозяйственном освоении криолитозоны. Эти проблемы связаны со специфическими свойствами льда, зависящими от его температуры. С повышением температуры прочность льда уменьшается, а его деформация увеличивается. При положительных температурах лед превращается в воду и теряет

Таблица 1.2

**Средняя многолетняя ледовитость российских арктических морей (площадь, занятая льдом в % от площади моря)**

| Море                   | Месяц |     |     |     |     |    |    |    |    |    |     |     |
|------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|
|                        | 1     | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11  | 12  |
| Баренцево              | 49    | 57  | 61  | 63  | 56  | 43 | 24 | 12 | 9  | 16 | 27  | 40  |
| Карское                | 100   | 100 | 100 | 100 | 100 | 92 | 80 | 52 | 32 | 68 | 100 | 100 |
| Лаптевых               | 100   | 100 | 100 | 100 | 100 | 89 | 78 | 52 | 36 | 95 | 100 | 100 |
| Восточно-<br>Сибирское | 100   | 100 | 100 | 100 | 100 | 97 | 94 | 86 | 67 | 95 | 100 | 100 |
| Чукотское              | 100   | 100 | 100 | 100 | 99  | 90 | 82 | 75 | 71 | 98 | 100 | 100 |

прочность. Насыщенные водой оттаявшие грунты также становятся значительно слабее аналогичных талых грунтов и дают существенные осадки, с чем необходимо считаться при использовании льда в качестве оснований или вмещающей среды инженерных сооружений.

Повышение температуры процесс трудно прогнозируемый, особенно в связи с глобальным потеплением климата. Последнее связано с накоплением в атмосфере парниковых газов, главными из которых являются окись углерода и метан, причем метан вызывает парниковый эффект в 40 раз сильнее окиси углерода. Он выделяется из многочисленных на севере болот при их оттаивании. В связи с этим процесс климатического потепления в Арктике может стать неуправляемым (больше метана, выше температура воздуха и большее оттаивание; больше оттаивание – больше метана и т.д.). Причем началом этого процесса является хозяйственная деятельность человека, сопряженная с использованием большого количества энергии. Оттаивание льда и ММГ приводит не только к потере несущей способности оснований инженерных сооружений, но и всей геоморфологии территории. Борьба с этим негативным процессом является первой проблемой на пути освоения криолитозоны. Вторая проблема – борьба с негативными проявлениями мерзлотно-геологических процессов, которые в большинстве своем при повышении температуры воздуха активизируются. И, наконец, третья проблема - морской лед и борьба с ним.

Надводный лед, дрейфуя под действием ветра и течений оказывает давление на гидротехнические сооружения, превосходящее штормовые давления волн при ураганных ветрах. По данным измерений давления льда достигают 2880 кПа, для сравнения давления волн – 144 кПа, ветра – 2 кПа. Известны случаи переворота буровых стационарных платформ из-за навалов льда.

Подводный лед формирует особые свойства породы, зависящие от ее температуры и засоленности, многократно увеличивающие сложности использования пород в качестве оснований гидротехнических сооружений.

Описанные ниже новые технологии и новые конструкции сооружений и их элементов призваны решить эти проблемы или во всяком случае снизить их негативный эффект.

# **Глава 2. Использование естественного и искусственного холода для обеспечения надежности оснований инженерных сооружений**

## **2.1 Технологии охлаждения, замораживания грунта**

Технологии использование естественного и искусственного холода в прикладных целях известны давно. Они позволяют активно бороться с тепловым загрязнением геологической среды. В последние годы их количество значительно расширилось, однако основа технологий осталась прежней, а именно это естественное охлаждение за счет низких зимних температур атмосферного воздуха и искусственное охлаждение за счет использования холодильных машин и тепловых насосов.

*Использование естественного охлаждения.* Различают открытые и закрытые охлаждающие установки. В открытых установках зимний атмосферный воздух непосредственно прокачивается через установку, помещенную в грунт, и отбирает из него тепло. В закрытых установках воздух охлаждает только размещенную над землей поверхность установки, а охлаждение грунта осуществляется хладагентом, помещенным внутри установки, жидкостным или парожидкостным. Теплосъем одного кв.м помещенной в грунт поверхности открытой установки обычно составляет 130 - 140 Вт. Она состоит из двух коаксиальных труб (рис. 2.1, а). Во внешнюю трубу за счет разрежения, создаваемого вентилятором, поступает холодный зимний воздух, который отсасывается через внутреннюю трубу. Система вентилирования рассчитывается таким образом, чтобы скорость движения воздуха в кольцевом пространстве между трубами была не менее 2 - 5 м/сек. Впервые воздушные замораживающие колонки были применены в 1939 г. для восстановления мерзлого состояния грунтов под домом связи в Магадане.

В последние годы при охлаждении пластично мерзлого грунта часто вместо внешней трубы установки используется сама буровая скважина (рис. 2.1, б). Для этого на выровненную поверхность грунта устанавливается деревянный щит со скрепленной с ним трубой диаметром 120-200 мм и всасывающим патрубком. Скорость воздуха в трубе принимается 10-12 м/сек, а в кольцевом пространстве между ней и стенкой скважины не менее 2-5 м/сек. Такая скорость обеспечивает вынос пылеватых частиц, попадающих в воздушный поток со стенок

скважины из-за сублимации связывающего грунт льда, а также снега, попадающего в воздуховод во время метелей.

Центральная труба установки или труба, опускаемая в скважину, с

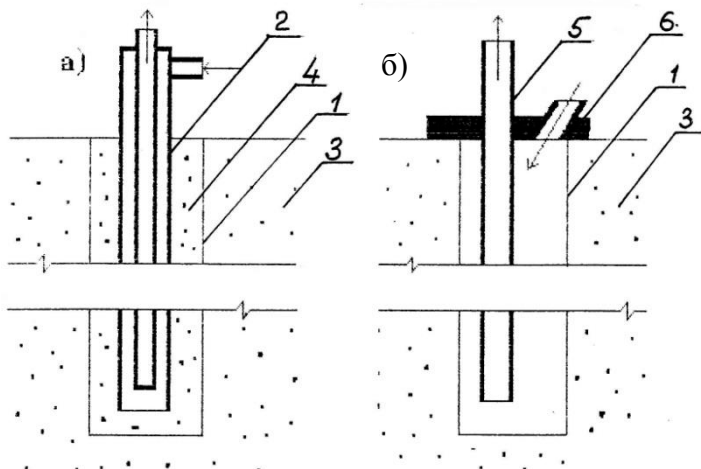


Рис 2.1 Охлаждение и замораживание грунтов воздушными установками.

а – колонками; б – трубами.

1 – скважина; 2 – колонка; 3 – грунт; 4 – песчаная засыпка; 5 – отсасывающая труба; 6 – входной патрубок с крышкой.

помощью гибкого шланга подключается к воздуховоду, ведущему к общему вентилятору или непосредственно к индивидуальному вентилятору, расположенному рядом со скважиной. Вентиляторы подключаются так, чтобы охлаждающая система работала на разрежение.

Для вентиляции рекомендуются вентиляторы местного проветривания марки ВМ-5 (горные). Эти вентиляторы объединяются с электродвигателем в один агрегат, расположенный на салазках, что позволяет легко осуществлять их перемещение по строительной площадке. Производительность вентилятора ВМ-5 равна 5000-10000 м<sup>3</sup>/час при напоре до 150 мм вод. столба. Один вентилятор обычно обслуживает 10 - 12 скважин.

Для индивидуального проветривания рекомендуются вентиляторы марки ПВУ-1 с производительностью 600 м<sup>3</sup>/час при напоре 100-

150 мм вод. столба. Потребляемая электрическая мощность вентилятора 1 кВт, вес (вместе с электродвигателем) - 50 кг.

Недостатком рассматриваемого способа охлаждения являются необходимость применения достаточно мощных вентиляторов, специального электрооборудования, необходимость присутствия постоянного обслуживающего персонала и довольно большое потребление электроэнергии. Кроме того, поскольку установка является открытой, то при понижении температуры воздуха на внутренние поверхности труб выпадает конденсат, который, замерзая, образует слой льда на стенках трубы, уменьшающий ее проходное сечение. Со временем слой увеличивается и трансформируется в ледяную пробку, выводящую вентиляционную систему из строя. По этой причине на одной из дамб, построенных на Европейском Севере, вышли из строя почти все замораживающие колонки (более 500 штук), несмотря на то, что их диаметр составлял 0.5 м. Некоторые специалисты считают, что из-за указанного явления в районах с частыми оттепелями применение воздушных установок вообще исключается.

Закрытые установки (термосифоны) подразделяются на жидкостные и парожидкостные. Они работают за счет низких температур атмосферного воздуха в зимнее время и не требуют энергетических затрат в процессе эксплуатации. В простейшем варианте термосифоны представляют собой герметическую трубу, заполненную хладагентом и одним концом, погруженную в скважину (рис. 2.2 и 2.3).

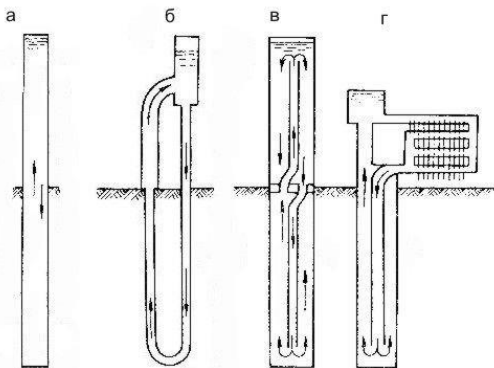


Рис. 2.2 Охлаждение, замораживание грунта жидкостными термосифонами. а – однотрубная установка; б – двухтрубная установка Гапеева; в – установка со струеразделительной вставкой фирмы «Термо-Дайнемик»;

г – установка с радиатором Института мерзлотоведения С.О. РАН.

В жидкостных термосифонах в качестве хладагента используется керосин и фреон 30 в парожидкостных - аммиак, фреон 12, фреон 22 и пропан – бутан. По холодопроизводительности первые уступают вторым. Теплосъем с одного кв. м. погруженной в грунт трубы жидкостного термосифона обычно составляет 40 - 60 Вт, парожидкостного - 80-115 Вт. Эффективность работы термосифонов зависит также от отношения поверхности надземного теплообменника к поверхности подземного. Обычно оно принимается от 1.0 до 1.5. Дальнейшее развитие поверхности надземной части существенного эффекта не дает, но значительно увеличивает материалоемкость конструкции.

Охлаждение стенок жидкостного термосифона осуществляется за счет конвекции хладагента в зимнее время в результате разной температуры и, соответственно, разной плотности хладагента в верхней и нижней частях трубы. Жидкостные термосифоны разработаны С.И. Гапеевым в 1969 г. Сегодня они выполняются в виде одно- и двухтрубных конструкций (рис. 2.2, а, б). Термосифоны из двух труб, хотя и несколько сложнее в конструктивном отношении, но значительно эффективнее по своей холодопроизводительности, которая в 1.5-2 раза больше по сравнению с холодопроизводительностью однетрубной установки. Существенный недостаток двухтрубной конструкции – потребность скважин большого диаметра. В связи с чем американской фирмой «Термо-Дайнемик» внесены некоторые изменения в конструкцию однетрубной установки, позволяющие сделать ее конкурентоспособной с двухтрубной. А именно, были устроены внутренние струеразделительные вставки в виде диафрагм и коаксиальных труб (рис. 2.2, в). Их применение позволило отказаться от внешнего расположения труб относительно друг друга в грунте и уменьшить диаметр скважин для их установки. Представляют интерес предложенные Институтом мерзлотоведения С.О. РАН жидкостные термосифоны с наружным теплообменником в виде системы оребренных труб (радиатором), которые развивают поверхность надземного теплообменника (рис. 2.2, г). Данная конструкция позволяет наружные теплообменники от нескольких замораживающих колонок компоновать в одном общем блоке. Глубина охлаждения, замораживания грунтов жидкостными термосифонами обычно составляет 6-8 м. Хотя известен положительный опыт охлаждения грунтов в гидротехническом строительстве и до 25 м. Для приведения в действие жидкостного термосифона требуется разность температур между атмосферным воздухом и грунтом минус 3-4 °С.

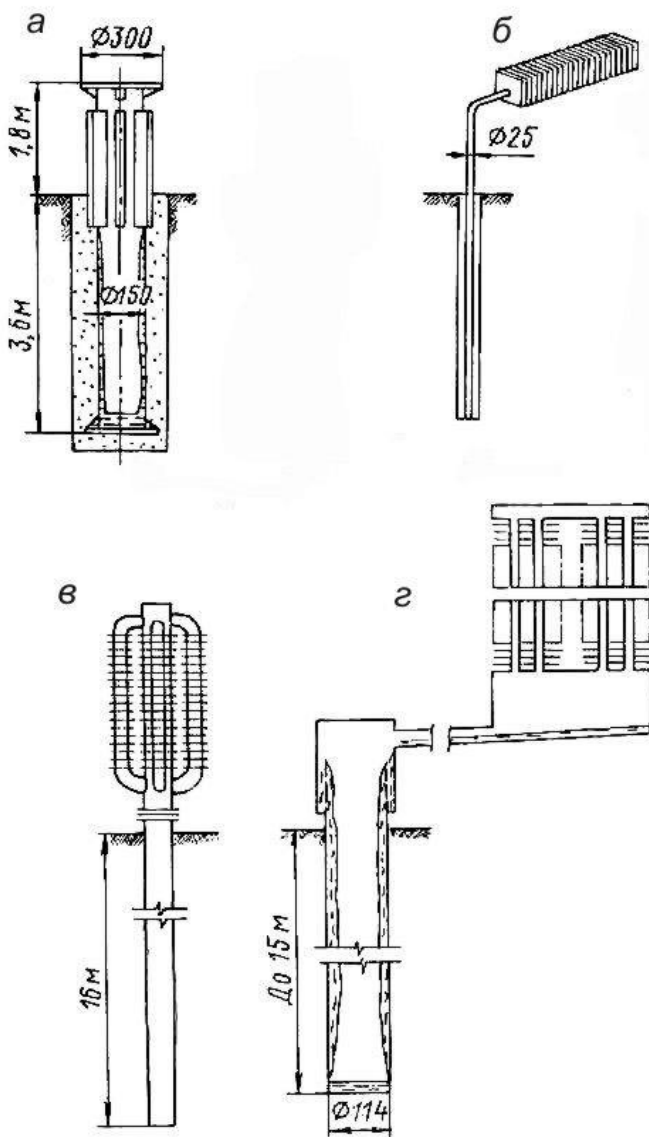


Рис.2.3 Охлаждение , замораживание грунтов парожидкостными термосифонами.

а – термосвая Лонга; б – криоанкер фирмы «Макдонелл-Дуглас»; в – установка ЛТИХПа; г – установка С.О. НИИОСПа.



Парожидкостные термосифоны по физическим процессам теплопередачи занимают особое место.

Их главное отличие от жидкостных термосифонов состоит в том, что конвекция хладагента в них происходит с фазовыми превращениями, сопровождающимися большим поглощением тепла из грунта и передачей его в атмосферу. В зимнее время жидкий хладагент, находящийся у дна подземной части установки, испаряется и в виде пара поднимается в верхнюю надземную часть установки, где под действием низких отрицательных температур атмосферного воздуха конденсируется и тонкой пленкой стекает по внутренней стенке замораживающей колонки ко дну ее подземной части, где вновь испаряется. Цикл испарение – конденсация продолжается непрерывно, пока температура подземной части (испарителя) будет выше температуры надземной части (конденсатора). Если температура испарителя станет ниже температуры конденсатора, то конденсации паров хладагента не происходит и цикл прерывается, термосифон запирается. Это имеет место в летнее время, а также во время зимних оттепелей. По траектории движения жидкого и парообразного хладагента парожидкостные термосифоны подразделяются на противоточные (жидкость и пар двигаются в противоположных направлениях) и прямоточные (жидкость и пар двигаются в одном направлении).

Первый парожидкостный противоточный термосифон, предложенный американским инженером Лонгом в 1965 г., представлял собой стальную герметичную трубу, заполненную пропаном, и выполнял роль фундамента (рис. 2.3, а). Недостатком такой конструкции является необходимость строго вертикального расположения трубы для обеспечения равномерного растекания жидкой пленки хладагента по ее внутренней поверхности. Термосифон конструкции фирмы «Макдонелл-Дуглас» (криоанкер) имеет спиральную насечку по внутренней поверхности трубы, что допускает отклонение от вертикали на угол до  $25^{\circ}$  без существенного снижения эффективности (рис. 2.3, б). В качестве хладагента в криоанкере используется аммиак.

Конструкция гравитационно-капиллярного термосифона допускает отклонение от вертикали на  $90^{\circ}$  [Ашпиз и др., 2014]. Этот термосифон состоит из двух участков – участка конденсации и участка испарения. Участок конденсации расположен вертикально над землей и имеет внешнее ребрение с целью увеличения поверхности охлаждения, участок испарения – под землей наклонно или вертикально. На всей внутренней поверхности участка испарения имеется капиллярный слой в виде металлической сетки или спекшегося металлического порошка из материала с высоким коэффициентом теплопроводности (рис. 2.4).

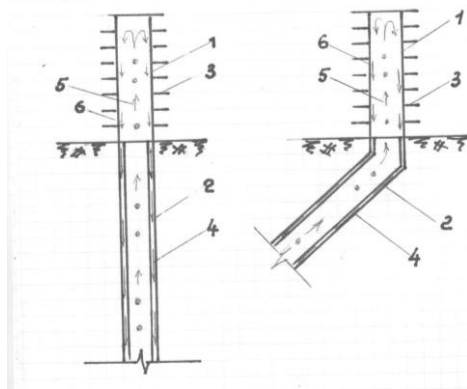


Рис. 2.4 Конструкция гравитационно-капиллярного термосифона.  
 1 – конденсатор; 2 –испаритель; 3 – оребрение конденсатора;  
 4 – капиллярный слой; 5 – пар; 6 – жидкость.

Устройство работает следующим образом. Зимой, когда температура участка испарения выше температуры участка конденсации, хладагент в участке испарения испаряется и в виде пара поступает в участок конденсации, где под действием естественного холода превращается в конденсат и под действием гравитационных сил по внутренней стенке трубы участка конденсации стекает вниз в участок испарения. В участке испарения конденсат перехватывается капиллярным слоем и равномерно распределяется по всей внутренней поверхности участка испарения и под действием гравитационных и капиллярных сил перемещается к низу. По мере движения конденсата по капиллярному слою конденсат превращается в пар, который поступает в участок конденсации, где вновь конденсируется и таким образом круг замыкается. На парообразование затрачивается большое количество тепла, которое изымается из грунта. По мере наклона участка испарения к горизонту влияние гравитационных сил уменьшается, однако капиллярные силы остаются неизменными, что позволяет располагать участок испарения под углом  $90^{\circ}$  к вертикали. Это одно из важных преимуществ предлагаемого устройства по сравнению с известными.

Летом или зимой в оттепель указанный процесс прекращается, поскольку температура участка конденсации становится выше температуры участка испарения и по своему функциональному действию участки термосифона меняются местами, а связь между ними отсутствует, ибо гравитационные силы снизу – вверх не работают. Термосифон самопроизвольно запирается.

В нашей стране детальное изучение парожидкостных противоточных термосифонов проводилось Ленинградским технологическим институтом холодильной промышленности (ЛТИХП), Северным отделением научно-исследовательского института оснований и подземных сооружений (С.О. НИИОСП), институтом по проектированию фундаментов (Фундаментпроект) и некоторыми другими. Первые натурные испытания парожидкостного термосифона были выполнены в 1967 – 1970 г.г. на полигоне института Ленморниипроект.

В настоящее время разработано значительное число конструктивных решений по парожидкостным термосифонам. Так, например, ЛТИХП предложил конструкцию с многотрубным надземным теплообменником (рис. 2.3, в). В С.О. НИИОСП разработан термосифон с отдельным размещением испарителя и конденсатора (рис. 2.3, г), что позволяет использовать его в стесненных условиях, например, в низких подпольях зданий, где габариты помещения не позволяют разместить конденсатор. В этом случае он выносится за пределы здания. Основными конструктивными элементами этого термосифона являются испаритель (подземный теплообменник), конденсатор (надземный теплообменник), соединительные линии, устройство для равномерного распределения конденсата по стенке испарителя и запорно - зарядная арматура. Для развития поверхности конденсатора применены серийно выпускаемые отопительные конвекторы типа "КП", "Комфорт", "Прогресс", "Аккорд". Глубина замораживания, охлаждения грунта парожидкостными термосифонами обычно составляет 15 м. и только за редким исключением ее превышает.

Прямоточный термосифон изобретен Г.М. Долгих [Долгих и др., 2011]. Его принципиальная схема показана на рис. 2.5. Он состоит из испарителя, расположенного горизонтально под землей, конденсатора и накопителя, расположенных вертикально на определенной высоте над землей, и гидравлического затвора, расположенного под накопителем. Часть накопителя заполнена жидким хладагентом.

Работает термосифон следующим образом. Зимой хладагент в испарителе превращается в пар, который двигается только в сторону конденсатора, ибо обратному движению пара препятствует гидравлический затвор. Освободившийся объем заполняется жидким хладагентом, поступающий из накопителя под действием гидравлического напора. По мере движения жидкого хладагента он испаряется и к конденсатору поступает в виде пара, где конденсируется и стекает в испаритель. Цикл завершается. Таким образом жидкий и парообразный хладагент двигаются в одном направлении и имеют постоянную температуру, равную температуре парообразования. Соотношение

объемов, занимаемых жидкостью и паром в испарителе, по мере движения меняется. В начале испарителя весь объем занимает жидкость, в конце – пар. Летом и зимой в оттепель конденсации пара не происходит и система самопроизвольно запирается. Прямоточное движение хладагента существенно уменьшает внутреннее гидродинамическое сопротивление термосифона, что в сочетании с напором позволяет довести длину подземного теплообменника (испарителя) до 800 м. Большая длина испарителя требует развитого конденсатора, который изготавливается в виде нескольких радиаторов, собранных в один блок. К конденсаторному блоку подключается от одного до пяти испарителей. Система прямоточных термосифонов позволяет охлаждать большие по ширине площади застройки.

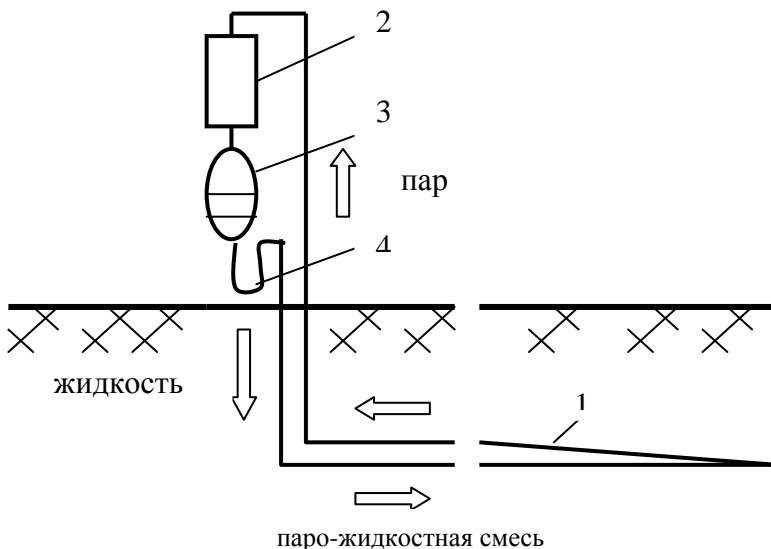


Рис. 2.5 Схема работы горизонтального, прямоточного, напорного, парожидкостного термосифона (система ГЕТ).

1 - испаритель; 2 – конденсатор; 3 – накопитель; 4 – гидравлический затвор.

Что касается инерции парожидкостных термосифонов, то этот вопрос сегодня только исследуется и единственно, что пока можно утверждать, что она ниже, чем у жидкостных термосифонов, т.е. для

приведения парожидкостных термосифонов в действие требуется разность температур между атмосферным воздухом и грунтом не более минус 3-4 °С.

Большим недостатком термосифонов является сезонность их действия. Летом полученный зимой охлаждающий эффект часто исчезает и температура грунта возвращается к исходному значению. В последние годы появилась идея создать аккумулятор холода зимой, который использовать летом для поддержания достигнутого зимой температурного режима грунта. В качестве аккумулятора может служить лед, оттаивающий при отрицательной температуре. Емкость, заполненная таким льдом, называется зеротером. Предлагается разместить зеротер в нижней части конденсатора термосифона и его теплоизолировать [Ашпиз и др., 2014]. Конструкция такого термосифона показана на рис. 2.6.

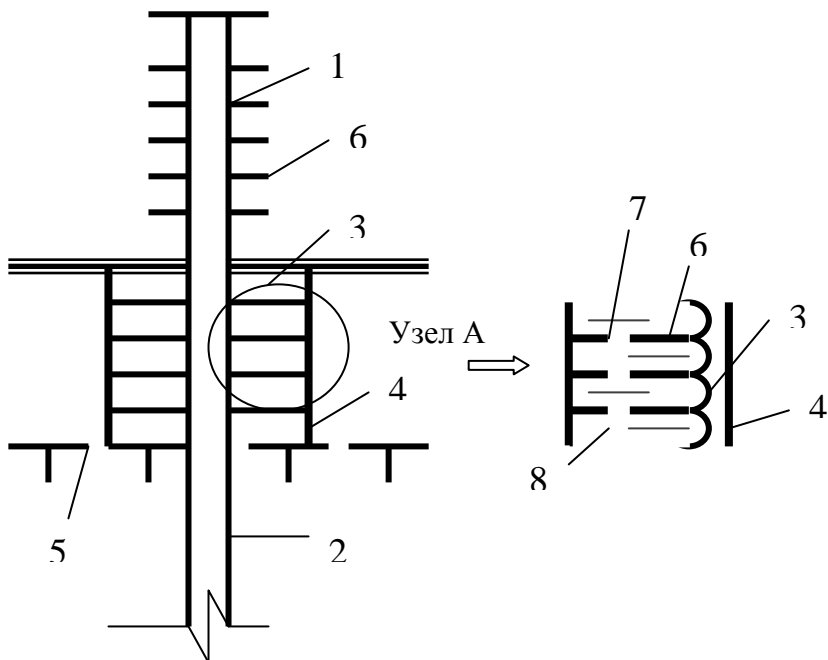


Рис. 2.6 Противоточный термосифон круглогодичного действия.

1 – конденсатор; 2 – испаритель; 3 – эластичная емкость с жидкостью, замерзающей при температуре ниже 0°С (зеротер); 4 – теплоизолированная жесткая оболочка зеротера; 5 – подошва слоя сезонного оттаивания грунта; 6 – оребрение; 7 – отверстия в оребрении; 8 – жидкость, замерзающая при температуре существенно ниже 0°С.

Термосифон установлен коаксиально емкости из эластичного материала с аккумулирующим холод веществом (зеротер), заключенной в жесткую оболочку, покрытую теплоизолятором.

Конденсатор термосифона с внешней стороны снабжен горизонтальным круговым оребрением и расположен вертикально над поверхностью земли. Испаритель – ниже поверхности земли, вертикально или наклонно.

Оребрение конденсатора внутри зеротера выполнено с отверстиями для прохода аккумулирующего холод вещества.

Работает устройство следующим образом. С наступлением зимы, когда температура конденсатора становится ниже температуры испарителя, происходит охлаждение грунта и аккумулирование холода в зеротере за счет замораживания находящейся в ней жидкости.

При этом часть конденсатора, расположенного в зеротере, работает в режиме испарителя. За счет аккумуляции холода в зеротере термосифон продолжает работать и летом, ибо температура конденсатора, расположенного в зеротере, остается ниже температуры испарителя до тех пор, пока происходит таяние льда, образованного в зеротере зимой. При этом верхняя часть конденсатора, расположенного на воздухе, автоматически отключается.

Объем жидкости в зеротере выбирают таким образом, чтобы количество холода, аккумулированного в нем, компенсировало бы потери тепла грунтом летом.

Таким образом, в течение всего года в термосифоне присутствует положительный температурный градиент, который стимулирует его работу и в зимнее и в летнее время, и не дает температуре многолетнемерзлого грунта стать выше температуры фазового перехода аккумулирующей холод жидкости. При этом при промерзании-оттаивании аккумулирующая холод жидкость не должна расслаиваться, чему отвечают водные растворы диэтиленгликоля, которые выбираются для заполнения зеротера.

*Использование искусственного охлаждения.* Наиболее экономным решением является предложенный институтом «Фундаментпроект» термосифон с электрической насадкой [Абросимов и др., 2010]. Насадка крепится на конденсаторе и его охлаждает за счет эффекта Пельтье, позволяющий получать охлаждающий эффект при прохождении электрического тока через полупроводниковый модуль. Полупроводниковые модули имеют мощность от 1 до 50 ватт и создают температурный перепад охлаждения около  $7.0^{\circ}\text{C}$ . Модуль подключен к источнику энергоснабжения и работает круглогодично (рис. 2.7).

Другим способом охлаждения является использование аммиачно-рассольной установки, стационарной и подвижной. Установка состоит из двух контуров. Аммиачный контур (охладитель) находится внутри холодильной машины, рассольный – проходит через испаритель холодильной машины и через охлаждающие колонки, помещенные в грунте (рис.2.8). Охлаждение, замораживание грунта осуществляется за счет прокачки через колонки с помощью насоса охлажденного в холодильной машине до температуры минус 20 - 40 °С рассола. Необходимый расход рассола и общая холодопроизводительность установки устанавливаются расчетом. По общей холодопроизводительности подбирается холодильная машина (табл.2.1). Теплосъем с одного кВт. м. колонки при этом способе охлаждения составляет 250-500 Вт.



Рис. 2.7 Противоточный термосифон с электрической насадкой на конденсаторе (фото М.А. Минкина)

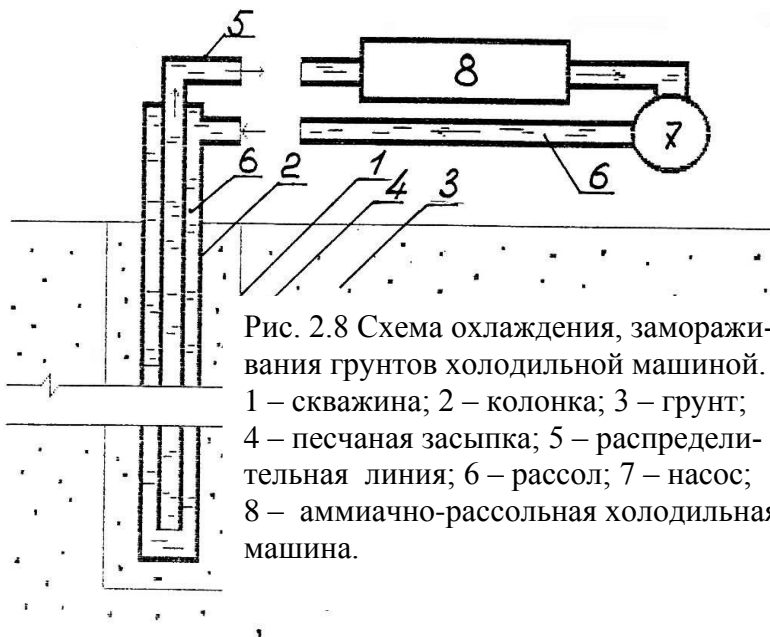


Таблица 2.1

**Основные характеристики рекомендуемых передвижных холодильных машин**

| Показатели                             | Марка машины |              |              |          |
|--|--------------|--------------|--------------|----------|
|  | АУ – 150/480 | АВ – 150/720 | АВ – 300/360 | ДАУ – 50 |
| Холодопроизводительность, кВт          | 174          | 132          | 348          | 313      |
| Максимальная глубина замораживания, м. | 27           | 36           | 54           | 48       |
| Масса машины, кг.                      | 1450         | 1350         | 4500         | 2500     |

*Охлаждающая подсыпка на поверхности грунта.* Когда требуется не допустить растепления мерзлого грунта на большой площади в результате будущего хозяйственного освоения территории, до возведения сооружений по поверхности грунта устраивается охлаждающая подсыпка, которая располагается под всей будущей застройкой или ее частью. Подсыпка обеспечивает охлаждающий эффект независимо от изменения условий теплообмена на дневной поверхности, например, в



результате снегонакопления на территории, захламливания или зачернения поверхности, проливов воды и пр.

Конструктивно охлаждающая подсыпка состоит из четырех элементов (рис. 2.9): песчаная насыпь, система горизонтальных парожидкостных термосифонов, укладываемая у подошвы насыпи, теплоизолятор, укладываемый у поверхности насыпи (последний может отсутствовать) и защитного слоя.

Мощность песчаной насыпи и толщина теплоизолятора подбираются из условия – подошва сезонного оттаивания грунтов всегда должна находиться в теле насыпи.

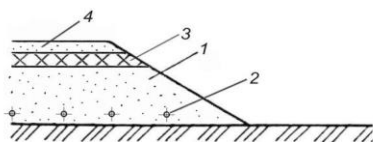


Рис. 2.9 Охлаждающая подсыпка.

1 – песчаная насыпь; 2 – охлаждающая система; 3 – теплоизолятор; 4 – защитный слой.

Система охлаждения состоит из расположенных друг возле друга с шагом 1.0 – 3.0 м. парожидкостных «горизонтальных» прямоточных термосифонов. Испарители термосифонов укладываются на слой песчаной подготовки толщиной не менее 0.1 м. ниже сезонного оттаивания насыпи на 0.1 м.

Система работает следующим образом. Зимой за счет сезонного промерзания грунта и работы термосифонов происходит промораживание песчаной насыпи и охлаждение, расположенного под ней многолетнемерзлого грунта. Летом, когда система термосифонов не работает, песчаная насыпь оттаивает, но оттаивание не захватывает многолетнемерзлый грунт, если на территории нет дополнительного источника тепла. Если он есть, то при небольшой мощности последствия его растепления основания насыпи ликвидируются зимой за счет работы термосифонов, при большой – этот источник должен быть выявлен и учтен при проектировании инженерных сооружений.

## 2.2 Расчет охлаждения и замораживания грунта

*Расчет охлаждения, замораживания грунта вокруг замораживающей колонки.* Методика этого расчета мало зависит от способа охлаждения, замораживания (воздушные колонки, термосифоны, холодильные машины) и осуществляется по номограммам, которые приводятся ниже и построены на основе приближенных аналитических формул, приведенных в учебнике [Хрусталеv, 2005]. Определение радиуса охлаждения, замораживания производится по формуле:

$$r_f = \eta_a r_p, \quad (2.1)$$

где  $r_f$  – радиус охлаждения, замораживания, м;  $r_p$  – внешний радиус замораживающей колонки, м;  $\eta_a$  – безразмерный параметр, определяемый по номограмме на рис. 2.10 в зависимости от значений безразмерных параметров  $b$ ,  $M$ ,  $H_a$ , которые, в свою очередь, определяются по формулам:

$$b = (\lambda_f / r_p) \cdot R_{in}, \quad (2.2)$$

охлаждение:

$$M = \frac{T_0 - T_f}{T_f - T_{in}}, \quad (2.3)$$

$$H_a = \frac{\lambda_f (T_0 - T_{in}) t_f}{r_p^2 L_0 \rho_{d,f} w_w}, \quad (2.4)$$

Замораживание:

$$M = \frac{\lambda_{th} (T_0 - T_{bf})}{\lambda_f (T_{bf} - T_{in})}, \quad (2.5)$$

$$H_a = \frac{\lambda_f (T_{bf} - T_{in}) t_f}{r_p^2 L_0 \rho_{d,th} w_{tot}}, \quad (2.6)$$

где  $R_{in}$  – внутреннее термическое сопротивление колонки теплообмену,  $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт}$ , определяемое для парожидкостных термосифонов по формуле (2.7), для воздушных и рассольных установок – по формуле (2.8), для жидкостных термосифонов – по формуле (2.9);  $\lambda_f$ ,  $\lambda_{th}$  – теплопроводность грунта в мерзлом и талом состояниях,  $\text{Вт} / (\text{м} \text{ } ^\circ\text{C})$ ;  $T_{bf}$  – температура начала замерзания грунта,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_f$  – максимальная температура грунта в твердомерзлом состоянии,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_0$  – начальная температура грунта у подошвы слоя с годовыми теплооборотами,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{in}$  – средняя по длине колонки температура рабочего тела в  $^\circ\text{C}$ , принимаемая для парожидкостных термосифонов равной средней за период его работы отрицательной температуре наружного воздуха ( $T_{air,t}$ ) плюс  $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ , для

жидкостных термосифонов – плюс 4 С, для воздушных установок – плюс 3 С, для рассольных установок – равной  $T_p + 1$  С ( $T_p$  – температура рассола в подающей магистрали);  $t_f$  - продолжительность охлаждения, замораживания, ч;  $L_0$  - удельная теплота фазовых превращений вода – лед в расчете на единицу массы, 93 Втч / кг;  $\rho_{d,f}$ ,  $\rho_{d,th}$  - плотность мерзлого и талого грунта в сухом состоянии, кг / м<sup>3</sup>;  $w_{tot}$  - суммарная влажность грунта;  $w_w$  - содержание незамерзшей воды при температуре  $T_0$ .

$$R_{in} = \frac{S_e}{\alpha_{out} S_c}, \quad (2.7)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in}}, \quad (2.8)$$

$$R_{in} = \frac{S_e}{\alpha_{out} S_c} + \frac{1}{\alpha_{in}}, \quad (2.9)$$

где  $\alpha_{out}$  – коэффициент теплообмена между наружным воздухом и поверхностью конденсатора парожидкостного термосифона Вт / (м<sup>2</sup> °С), определяемый по данным табл. 2.2;  $\alpha_{in}$  – коэффициент теплообмена между рабочим телом и внутренней поверхностью колонки, принимаемый для жидкого рабочего тела 116 Вт / (м<sup>2</sup> °С), для газообразного – 25 Вт / (м<sup>2</sup> °С);  $S_e$ ,  $S_c$  - площади поверхности испарителя и конденсатора термосифона, м<sup>2</sup>.

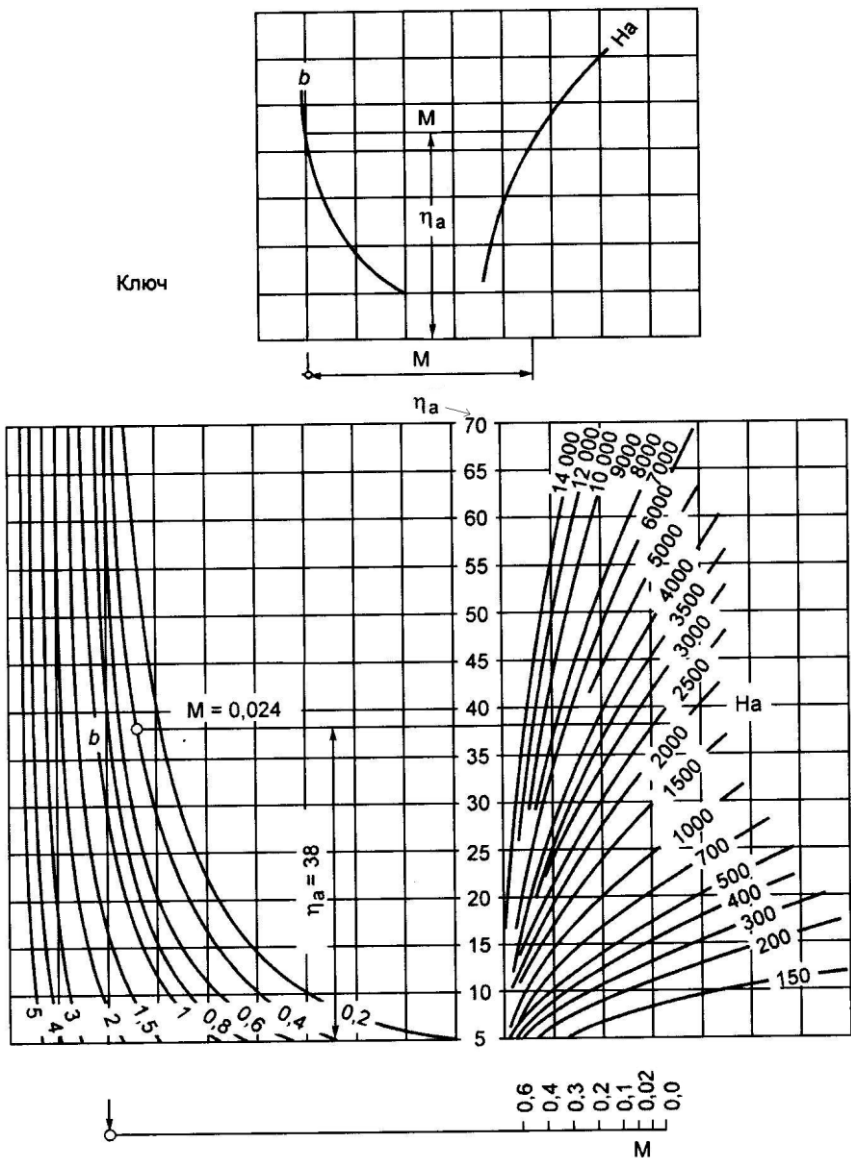


Рис. 2.10 Номограмма для расчета радиуса охлаждения и оттаивания вокруг вертикального цилиндрического стока и источника тепла.

**Значения  $\alpha_{out}$  для стальных гладких (числитель) и оребренных (знаменатель) труб конденсатора термосифона, Вт / (м<sup>2</sup>·°C).**

| Радиус<br>трубы<br>конденсатора,<br>мм. | Скорость ветра, м / с |             |             |             |             |
|---|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|   | 0                     | 2           | 4           | 6           | 8           |
| 17.0                                    | 6.9 / 8.7             | 21.0 / 24.4 | 33.0 / 37.1 | 45.0 / 48.7 | 55.0 / 59.2 |
| 22.0                                    | 6.5 / 9.2             | 20.0 / 24.4 | 31.0 / 38.3 | 42.0 / 49.9 | 51.0 / 60.3 |
| 28.5                                    | 6.0 / 11.0            | 17.0 / 30.2 | 29.0 / 47.6 | 38.0 / 61.5 | 48.0 / 74.2 |
| 36.5                                    | 5.3 / 11.2            | 16.0 / 30.2 | 27.0 / 47.6 | 36.0 / 61.5 | 44.0 / 74.2 |
| 44.5                                    | 4.9 / 10.3            | 15.0 / 26.7 | 26.0 / 41.8 | 34.0 / 54.5 | 41.0 / 65.0 |
| 54.0                                    | 4.4 / 8.2             | 15.0 / 23.2 | 24.0 / 36.0 | 31.0 / 47.6 | 38.0 / 56.8 |
| 63.5                                    | 4.1 / 11.8            | 14.0 / 33.6 | 23.0 / 53.4 | 30.0 / 68.4 | 37.0 / 83.5 |
| 73.0                                    | 3.6 / 10.6            | 14.0 / 29.0 | 22.0 / 45.2 | 29.0 / 59.2 | 36.0 / 71.9 |
| 84.0                                    | 3.4 / 10.0            | 13.0 / 25.5 | 21.0 / 39.4 | 28.0 / 52.2 | 35.0 / 62.6 |

Для воздушных и рассольных установок дополнительно определяется необходимая интенсивность подачи (расход) воздуха или рассола к колонке. Расчет осуществляется по формуле:

$$G_{a,p} = \frac{1.2 \cdot \pi \cdot r_f^2 \cdot l_p \cdot L_v}{C_{w,b} \cdot \Delta T \cdot t_f}, \quad (2.10)$$

где  $G_{a,p}$  – необходимый расход воздуха или рассола, м<sup>3</sup> / ч;  $l_p$  – длина подземной части колонки, м;  $L_v$  – количество тепла, отводимого при охлаждении (2.11) и замораживании (2.12) 1 м<sup>3</sup> грунта, Втч / м<sup>3</sup>;  $C_{w,b}$  – объемная теплоемкость рабочего тела, принимаемая для воздуха равной 0.39, для рассола – 957 Втч / (м<sup>3</sup>·°C);  $\Delta T$  – разность температуры на входе и выходе из колонки, принимаемая равной для воздуха 6 °C, для рассола 2 °C.

$$L_v = L_0 \rho_{d,f} w_w, \quad (2.11)$$

$$L_v = L_0 \rho_{d,th} w_{tot}, \quad (2.12)$$

Необходимая производительность холодильной станции в кВт вычисляется по формуле:

$$P = 0.0012 \cdot L_v \cdot V / t_f, \quad (2.13)$$

где  $V$  – объем охлаждаемого, замораживаемого грунта, м<sup>3</sup>.

*Примечание:* В случае многослойного основания все грунтовые характеристики осредняются в интервале глубин от дневной поверхности до уровня погружения замораживающей колонки. Осреднение осуществляется по формуле (2.14 а) для всех параметров и по формуле (2.14 б) для теплопроводности:

$$A = \frac{1}{\sum_{i=1}^n h_i} \sum_{i=1}^n A_i h_i, \quad (2.14 \text{ а})$$

$$A = \frac{1}{\sum_{i=1}^n h_i / A_i} \sum_{i=1}^n h_i, \quad (2.14 \text{ б})$$

где  $A$  – осредненное значение грунтовой характеристики;  $A_i$  – значение грунтовой характеристики в  $i$ -ом слое;  $h_i$  – мощность  $i$ -го слоя;  $n$  – число слоев в интервале осреднения.

*Пример расчета.*

Постановка задачи. Требуется рассчитать радиус замораживания грунта вокруг замораживающей колонки аммиачно-рассольной установки, помещенной в грунт. Грунт – песок с суммарной влажностью  $w_{tot} = 0.14$ , плотностью сухого грунта  $\rho_{d,th} = 1600 \text{ кг / м}^3$ , коэффициентами теплопроводности в мерзлом  $\lambda_f = 1.7 \text{ Вт / (м}^0\text{С)}$  и талом  $\lambda_{th} = 1.2 \text{ Вт / (м}^0\text{С)}$  состояниях и температурой начала замерзания  $T_{bf} = -0.1 \text{ }^0\text{С}$ . Начальная температура грунта у подошвы слоя с годовыми теплооборотами  $T_0 = 0.3 \text{ }^0\text{С}$ . Замораживание будет производиться аммиачно-рассольной установкой в течение  $t_f = 2000 \text{ ч.}$ , температура рассола в подающей магистрали  $T_p = -40 \text{ }^0\text{С}$ , радиус колонки  $r_p = 0.054 \text{ м}$ .

Последовательность расчета.

1) Определяем температуру рабочего тела:  $T_{in} = -40 \text{ }^0\text{С} + 1 \text{ }^0\text{С} = -39 \text{ }^0\text{С}$ .  
 2) По формуле (2.8) находим внутреннее термическое сопротивление колонки теплообмену:  $R_{in} = 1 / 116 = 0.0086 \text{ м}^2\text{ }^0\text{С / Вт}$ .

3) По формулам (2.2), (2.5) и (2.6) определяем безразмерные параметры:  $b = (1.7 / 0.054) \cdot 0.0086 = 0.27$ ;  $M = \frac{1.2 \cdot (0.3 + 0.1)}{1.7 \cdot (-0.1 + 39)} = 0.007$ ;  $H_a =$

$$\frac{1.7 \cdot (-0.1 + 39) \cdot 2000}{0.054^2 \cdot 93 \cdot 1600 \cdot 0.14} = 2177.$$

4) По номограмме на рис. 2.10 находим безразмерный радиус  $\eta_a$ . Для этого (см. ключ к номограмме) используя шкалу безразмерного параметра  $M$ , находим длину отрезка  $M$ , соответствующего его численному значению 0.007. Прикладывая левый конец отрезка  $M$  к кривой  $b = 0.28$ , перемещаем его вдоль кривой, следя за тем, чтобы отрезок перемещался параллельно основанию номограммы. Перемещение заканчиваем, когда правый конец отрезка коснется кривой  $H_a = 2177$ . Расстоя-

ние между отрезком  $M$  и основанием номограммы в масштабе шкалы  $\eta_a$  есть численное значение безразмерного радиуса  $\eta_a = 41$ .

5) По формуле (2.1) находим радиус промерзания  $r_f = 41 \cdot 0.054 = 2.21$  м.

Ответ: Радиус замораживания равен 2.21 м.

*Расчет охлаждающей подсыпки.* Под охлаждающей подсыпкой формируется температура грунта отличная от температуры грунта в естественных условиях. Эта температура (среднегодовая температура грунта на подошве слоя сезонного оттаивания, условно принимаемая равной температуре грунта у подошвы слоя с годовыми теплооборотами) вычисляется по формуле, вывод которой приводится в учебнике [Хрусталева, 2005]:

$$T_0 = [\Omega_w + (L_v / \lambda_f) \cdot \chi \cdot \xi] / t_y, \quad (2.15)$$

где  $\Omega_w$  – сумма зимних градусочасов температуры атмосферного воздуха,  $^{\circ}\text{C} \times \text{ч}$ ;  $L_v$  – количество тепла, затрачиваемое на оттаивание материала подсыпки, определяется по формуле (2.12), Вт ч /  $\text{м}^3$ ;  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности материала подсыпки в мерзлом состоянии, Вт / (м ч);  $\chi$ ,  $\xi$  – вспомогательные параметры, определяемые, соответственно, по формуле (2.16) и (2.18);  $t_y$  – продолжительность года, 8760 ч.

$$\chi = \frac{b_p}{\pi} \left( B + 0.5 \cdot \ln \frac{b_p}{\pi \cdot d_p} \right), \quad (2.16)$$

$$B = \lambda_f R_{in} / (d_p k_h), \quad (2.17)$$

где  $d_p$  – диаметр испарителя термосифона, м;  $b_p$  – расстояние между испарителями (шаг расстановки термосифонов), м;  $R_{in}$  – внутреннее термическое сопротивление термосифона, определяется по формуле (2.7),  $\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$ ;  $k_h$  – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий снижение тепловосприятия термосифона из-за горизонтального расположения испарителя, определяется по табл. 2.3.

$$\xi = 0.5 d_{th} \{ d_{th} + 2[\lambda_f (R_s + R_{is})] \} / \chi, \quad (2.18)$$

где  $d_{th}$  – глубина сезонного оттаивания песчаной насыпи, определяется по формуле (2.19), м;  $R_s$  – среднезимнее термическое сопротивление снежного покрова,  $\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$ ;  $R_{is}$  – термическое сопротивление теплоизоляции, укладываемой у поверхности подсыпки,  $\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$ .

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th} \cdot \Omega_s}{L_v} \mu^2 + (\lambda_{th} \cdot R_{is})^2} - \lambda_{th} R_{is}, \quad (2.19)$$

где  $\Omega_s$  - сумма летних градусочасов температуры атмосферного воздуха,  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{ч}$ ;  $\lambda_{th}$  – коэффициент теплопроводности материала подсыпки в талом состоянии,  $\text{Вт} / (\text{м}\cdot\text{ч})$ ;  $\mu$  - безразмерный коэффициент, учитывающий отток тепла в подстилающие подсыпку вечномерзлые грунты при ее сезонном оттаивании, определяется по формуле (2.20).

$$\mu = 1 + 0.033 T_0, \quad (2.20)$$

В завершение расчета определяется мощность песчаной насыпи охлаждающей подсыпки :

$$H_d \geq d_{th} + d_p + 0.2, \quad (2.21)$$

Таблица 2.3

Значения безразмерного коэффициент  $k_h$

| Рабочее тело | $K_h$ при термическом сопротивлении $R_{in}$<br>в $\text{м}^2\text{C} / \text{Вт}$ |      |       |       |       |
|--------------|--|------|-------|-------|-------|
|              | 0.09   | 0.04 | 0.028 | 0.017 | 0.010 |
| Аммиак       | 1.00   | 0.85 | 0.80  | 0.68  | 0.57  |
| Хладон 12    | 0.75   | 0.50 | 0.35  | 0.30  | 0.20  |

*Пример расчета.*

Постановка задачи. В районе г. Якутск планируется возвести охлаждающую подсыпку со следующими параметрами охлаждающей системы:  $d_p = 0.038$  м,  $b_p = 3.0$  м, хладагент – аммиак, конденсатор термосифонов выполнен из оребренных труб с наружным радиусом 17 мм, отношение площади поверхности конденсатора к площади поверхности испарителя равно  $S_c / S_e = 1.5$ ; по поверхности песчаной насыпи укладывается один слой пенопласта толщиной 0.06 м. и термическим сопротивлением  $R_{is} = 1.7 \text{ м}^2\text{C} / \text{Вт}$ .

Характеристики песчаной насыпи:  $L_v = 8370 \text{ Вт}\cdot\text{ч} / \text{м}^3$ ,  $\lambda_f = 1.45 \text{ Вт} / (\text{м}\cdot\text{C})$ ,

$\lambda_{th} = 1.20 \text{ Вт} / (\text{м}\cdot\text{C})$ . Климатические характеристики:  $\Omega_w = -134000 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{ч}$ ,  $\Omega_s = 44500 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{ч}$ ,  $R_s = 2 \text{ м}^2\text{C} / \text{Вт}$ , среднезимняя скорость ветра равна 2.4 м / с.

Требуется определить:  $T_0$ ,  $d_{th}$ ,  $H_d$ .

Последовательность расчета.

1) По табл. 2.2 интерполяцией находим коэффициент теплообмена  $\alpha_{out} = 26.9 \text{ Вт} / (\text{м}^2\text{C})$ . 2) По формуле (2.7) определяем внутреннее термическое сопротивление термосифона

$$R_{in} = \frac{1}{26.9 \cdot 1.5} = 0.0248 \text{ м}^2\text{C} / \text{Вт}. \quad 3) \text{ По табл.2.3 интерполяцией}$$

находим поправочный коэффициент  $k_h = 0.773$ . 4) По формуле (2.17) находим безразмерный параметр  $B =$



$\frac{1.45 \cdot 0.0248}{0.038 \cdot 0.773} = 1.224.$  5) По формуле (2.16) – параметр

$\chi = \frac{3}{\pi} (1.224 + 0.5 \cdot \ln \frac{3}{\pi \cdot 0.038}) = 2.708$  м. 6) Задаемся произвольным

значением  $T_0 = -3$  °С и по формуле (2.20) вычисляем поправочный коэффициент  $\mu = 1 + 0.033 (-3) = 0.9.$  7) По формуле (2.19) вычисляем глубину сезонного оттаивания песчаной насыпи

$d_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.2 \cdot 44500}{8370} \cdot 0.9^2 + (1.2 \cdot 1.7)^2} - 2.04 = 1.77$  м. 8) По формуле

(2.18) определяем параметр  $\xi = 0.5 \cdot 1.77 \cdot (1.77 + 2 \cdot 1.45 \cdot (2 + 1.7)) / 2.708 = 4.09$  м. 9) По формуле (2.15) вычисляем среднегодовую температуру грунта на подошве слоя сезонного оттаивания

$T_0 = (-134000 + \frac{8370}{1.45} \cdot 2.708 \cdot 4.09) / 8760 = -8.0$  °С. Поскольку вы-

численная температура оказалась ниже принятой в расчет температуры  $-3$  °С, расчет, начиная с п. 6, повторяем, добиваясь совпадения принятой в расчет и вычисленной температуры  $T_0$  (допускается различие не более  $0.5$  °С). В нашем случае это будет температура  $T_0 = -11.3$  °С; ей соответствует глубина сезонного оттаивания песчаной насыпи  $d_{th} = 1.02$  м. 10) Расчет завершаем определением по формуле (2.21) необходимой высоты песчаной насыпи  $H_d = 1.02 + 0.038 + 0.2 = 1.258$  м. Принимаем высоту насыпи равной  $1.3$  м.

Ответ:  $T_0 = -11.3$  °С;  $d_{th} = 1.02$  м;  $H_d = 1.3$  м.

## **Глава 3. Стабилизация мерзлотных условий в основании зданий и сооружений**

Главной причиной деформации зданий и сооружений в криолизоне является изменение мерзлотных условий в их основании из-за прямого и косвенного теплового воздействия инженерных сооружений на мерзлые грунты. Под прямым воздействием понимается непосредственное выделение тепла сооружениями в грунт, под косвенным – изменение условий теплообмена литосферы с атмосферой за пределами сооружения, обусловленное наличием самих сооружений (изменение инсоляции дневной поверхности, режима снежных отложений, ветрового режима и пр.), и приводящее к возрастанию составляющей теплового баланса поверхности, направленной в грунт.

Под воздействием поступающего в грунт теплового потока происходит повышение температуры ММГ, которое сопровождается потерей их прочности, и как следствие деформациям зданий и сооружений особенно существенный при оттаивании грунтов. Например, по данным Я.А. Кроника [2001], к 1992 г. в г. Якутск из 376 обследованных зданий находились в неудовлетворительном состоянии 183 здания (48.4%), в том числе 32 здания (8.5%) были в аварийном, непригодном для проживания состоянии. Число деформировавшихся зданий в крупнейших поселках и городах Севера составляло от 22% в поселке Тикси до 80% в г. Воркута, в том числе в городах: Магадан – 55%, Чита – 60%, Дудинка – 35%, Норильск – 10%, Певек – 50%; в поселках: Амдерма – 50%, Диксон – 35%. За последнее десятилетие число деформировавшихся зданий возросло: в г. Норильск до 42% , в г. Якутск до 61%, в пос. Амдерма до 90%

Отсюда следует, что стабилизация мерзлотных условий в основании зданий и сооружений является необходимым условием строительства на мерзлых грунтах. Существует несколько новых способов стабилизации, которые мы рассмотрим последовательно.

### **3.1 Стабилизация мерзлотных условий с помощью охлаждающего контура**

Охлаждающий контур представляет собой мерзлотную завесу, устанавливаемую в грунте по внешнему контуру сооружения для отвода тепла, поступающего от сооружения в мерзлый грунт. Охлаждаю-

щий контур создается расположенными в один ряд термосифонами (рис. 3.1) и имеет ширину  $E$ , которая определяется по формуле:

$$E = \sqrt{4r_f^2 - h_e^2}, \quad (3.1)$$

где  $E$  – ширина охлаждающего контура, м;  $r_f$  – радиус мерзлого грунта вокруг одиночного термосифона, м;  $h_e$  – шаг расстановки термосифонов, м.

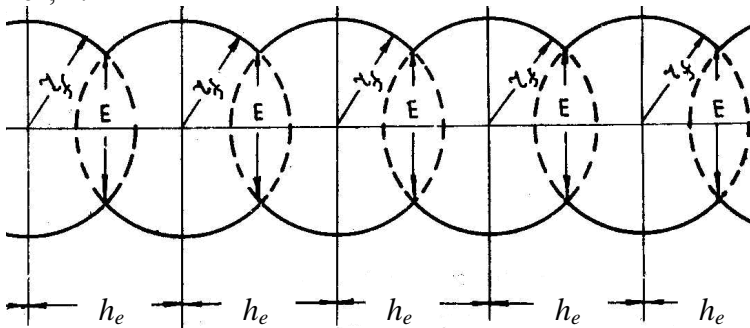


Рис. 3.1 Расстановка термосифонов в охлаждающем контуре

Параметры  $r_f$ ,  $h_e$ , а также глубина погружения термосифонов в грунт  $l_e$  и их расстояние до оси сооружения  $R_e$  назначаются расчетом, зависящим от вида сооружения и его теплового влияния на грунт

*Здание.* С помощью охлаждающего контура разработан новый способ обеспечения устойчивости зданий на участках, где слой сезонного промерзания-оттаивания не сливается с многолетнемерзлой толщей в пределах здания полностью или частично, ММГ характеризуются значительной сжимаемостью при оттаивании (более 2 см/м) и талые грунты, расположенные над многолетнемерзлыми, являются пучиноопасными [Хрусталеv, Максимов, 1979].

Способ предусматривает заложение фундаментов (как правило, столбчатых или ленточных) в талом слое, подстилаемом ММГ, и установку по внешнему контуру здания вертикальных парожидкостных термосифонов, которые заглубляют в ММГ (рис. 3.2).

Термосифоны включаются в работу в первую зиму после их установки и промораживают талый грунт вокруг здания. В результате промораживания в основании здания образуется охлаждающий контур, соответствующий нулевой изотерме стационарного температурного поля

грунта. В этом случае приток тепла к охлаждающему контуру от здания всегда будет равен оттоку тепла в атмосферу через термосифон-

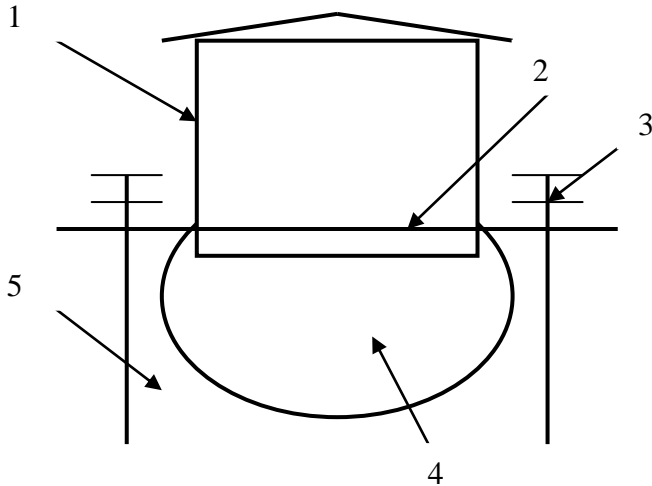


Рис. 3.2 Схематический разрез здания с охлаждающим контуром  
1 – здание; 2 – фундамент; 3 – термосифон; 4 – талый грунт; 5 – мерзлый грунт.

ны, что и обеспечивает стабилизацию начального положения верхней границы многолетнемерзлых грунтов под зданием в течение всего периода эксплуатации. Шаг расположения термосифонов и их глубина определяются расчетом в зависимости от глубины залегания кровли ММГ, ширины здания и температуры воздуха в помещениях. Следует отметить, что охлаждающий контур может быть создан не во всех случаях.

При этом способе отпадает необходимость в создании вентилируемого подполья, что открывает широкие возможности для его использования при сооружении промышленных зданий с большими нагрузками на пол первого этажа, а также заглубленных и полузаглубленных в грунт сооружений. Кроме того способ может быть использован как эффективное ремонтное мероприятие для стабилизации границы оттаивания в основании деформирующихся зданий. Начиная с 1978 г. этим способом в Воркутинском промышленном районе построено 30 гражданских и промышленных зданий, а также он использован как ремонт-

ное мероприятие на 3-х зданиях. На рис. (3.3) показано одно из зданий, построенных с охлаждающим контуром.



Рис. 3.3 Здание общежития в пос. Ворга-Шор (Воркутинский р-н), построенное с охлаждающим контуром

*Подземный трубопровод.* Охлаждающий контур с успехом может быть применен и при подземной прокладке теплового или горячего трубопровода, как средство, ограничивающее развитие ореола оттаивания вокруг трубы и, соответственно, ее деформации (рис. 3.4). При этом термосифоны устанавливаются вдоль трубопровода с двух его сторон и тепло, поступающее в грунт от трубопровода, отводится термосифонами в атмосферу, а вокруг трубопровода формируется стационарный (неизменный во времени) ореол оттаивания, размер которого можно регулировать шагом расстановки термосифонов, глубиной их погружения в грунт и расстоянием до оси трубопровода. На рис. 3.5 показана трасса подземного нефтепровода с охлаждающим контуром.

*Дорога.* Земляное полотно железных и автомобильных дорог существенно меняет условия теплообмена грунта с атмосферой. При этом верхняя поверхность земляного полотна усиливает охлаждение грунта зимой за счет искусственного удаления с ее поверхности снега, а откосы наоборот уменьшают его за счет накопления на них снега, счищае-

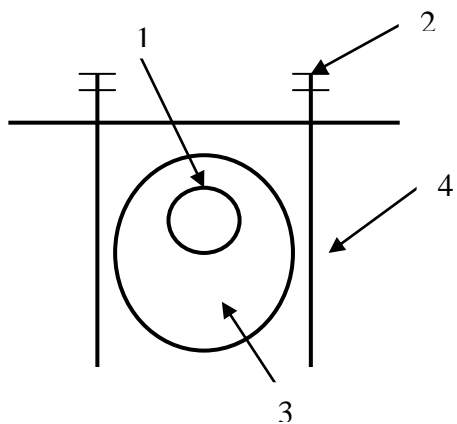


Рис. 3.4 Схематический разрез подземного трубопровода с охлаждающим контуром.  
 1 - трубопровод; 2 – термосифон; 3 – талый грунт; 4 – мерзлый грунт



Рис. 3.5 Подземная прокладка нефтепровода Ванкор – Пурпе с охлаждающим контуром из термосифонов (фото С.Н. Окунева)

мого с основной площадки железной дороги или проезжей части автомобильной дороги, и в результате ветрового снегопереноса. На откосах также увеличивается отепление грунта летом за счет лучистой энергии, приход которой возрастает из-за уменьшения отражательной способности поверхности откоса и ее наклона к горизонту.

Таким образом, влияние земляного полотна на грунты основания зависит от соотношения ширины основной площадки и длины откосов. При низких насыпях земляное полотно оказывает охлаждающее влияние на грунты основания при высоких – тепляющее. Охлаждение приводит к многолетнему промерзанию талых грунтов основания и их пучению, отопление – к многолетнему оттаиванию мерзлых грунтов и осадкам. Последствия – деформации верхнего строения пути или проезжей части. Применение на высоких насыпях охлаждающего контура позволяет стабилизировать границу оттаивания в основании земляного полотна и не допустить его деформаций сверх нормативных. На рис. 3.6 показан схематический разрез земляного полотна с охлаждающим контуром, а на рис. 3.7 – рабочий момент установки охлаждающего контура.

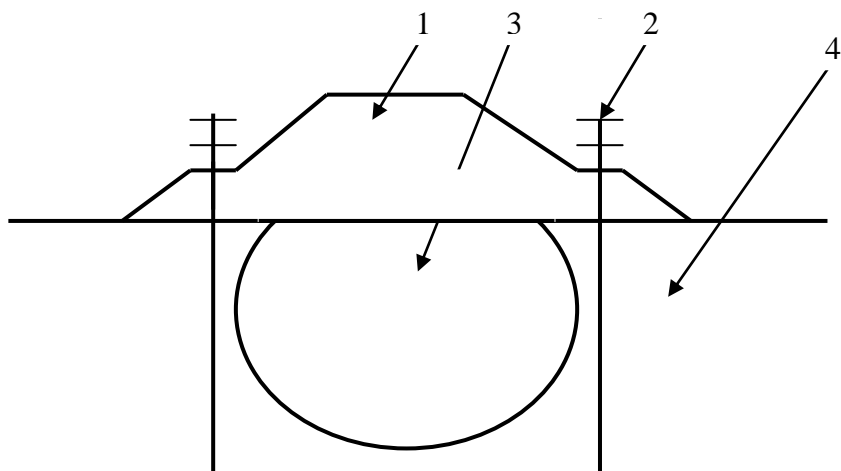


Рис. 3.6 Схематический разрез земляного полотна с охлаждающим контуром.

1 – земляное полотно; 2 – термосифон; 3 – талый грунт; 4 – мерзлый грунт.

### 3.2 Стабилизация мерзлотных условий в основании зданий с помощью вентилируемого подполья.

Способ разработан Г.В.Порхаевым, Л.Н.Хрустальевым и др. [Порхаев и др.,1976] для возведения зданий на участках, где слой сезонного промерзания-оттаивания не сливается с многолетнемерзлой толщей в пределах пятна здания полностью или частично, многолетне-

мерзлые грунты (ММГ) характеризуются значительной сжимаемостью при оттаивании (более 2 см/м) и талые грунты, расположенные над многолетнемерзлыми, являются пучиноопасными.



Рис. 3.7 Рабочий момент установки охлаждающего контура

Способ предусматривает заложение фундаментов в талом слое, подстилаемом ММГ, и устройство под зданием вентилируемого подполья со средней многолетней температурой воздуха около  $0^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.8).

При таком температурном режиме глубина сезонного промерзания пород в подполье становится равной глубине сезонного оттаивания, в связи с чем подошвы фундаментов в течение всего года существует фазовая граница, на которой стабильно поддерживается температура замерзания. Вторая фазовая граница находится на кровле ММГ. Между двумя фазовыми границами располагается слой талой породы - "буферный слой", в котором температурные градиенты, а следовательно, и теплотокки через него равны нулю. "Буферный слой" является той теплонепроницаемой завесой, которая обеспечивает стабилизацию начального положения верхней границы ММГ. В действительности возможны отклонения средней многолетней температуры воздуха в подполье в область как положительных, так и отрицательных значений. В первом случае произойдут оттаивание ММГ и осадка фундаментов, а во втором случае - начнется многолетнее промерзание грунтов и появится опасность выпучивания фундаментов. Эти случаи



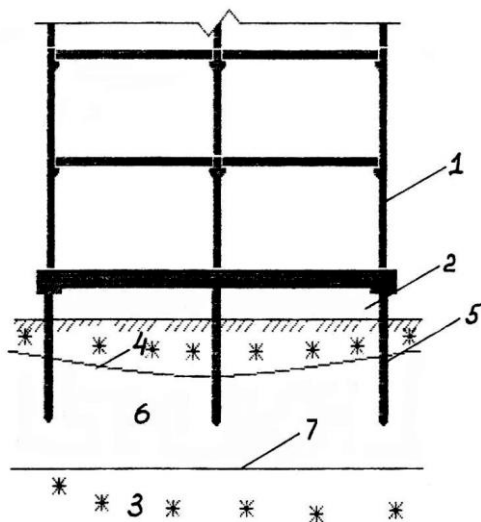


Рис. 3.8 Схема возведения здания со стабилизацией начального положения верхней границы ММГ с помощью вентилируемого подполья.

1 – здание; 2 – вентилируемое подполье; 3 – мерзлый грунт; 4 – подошва слоя сезонного промерзания-оттаивания; 5 – свая; 6 – талый грунт; 7 – кровля ММГ.

учитываются при проектировании системы "здание - основание" путем выбора таких конструктивных параметров, которые обеспечивают ее надежность - мощности буферного слоя и глубины заложения фундаментов.

С 1976 г. способ успешно используется в строительстве в Воркутинском промышленном районе [Хрусталеv, Никифоров, 1990]. Здесь способом стабилизации возведено 66 пятиэтажных крупнопанельных зданий, которые успешно эксплуатируются по настоящее время (рис. 3.9).

### 3.3 Стабилизация мерзлотных условий в основании земляного полотна дорог с помощью теплоизолятора.

Способ разработан в 2008 г. как средство борьбы с многолетним оттаиванием мерзлых пород в основании железнодорожных и автомобильных насыпей [Ашпиз, Хрусталеv и др., 2008]. Он заключается в расположении синтетического изолятора по откосам насыпи, что приводит к увеличению слоя сезонного промерзания откоса над слоем его сезонного оттаивания и вызывает охлаждающий эффект. Синтетический теплоизолятор укладывается под одежду откоса и крепится на откосе с помощью металлических диафрагм и шпилек. Способ прошел успешное испытание на одном из участков Амуро-Якутской железнодорожной магистрали в 2009 – 2016 г.г.



Рис. 3.9 Панорама микрорайона Б пос. Воргашор (Воркутинский район). Устойчивость зданий микрорайона обеспечивается стабилизацией верхней границы ММГ с помощью вентилированного подполья.

Как отмечалось выше, влияние насыпи на грунты основания зависит от соотношения ширины основной площадки и длины откосов. При низких насыпях насыпь оказывает охлаждающее влияние на грунты основания при высоких – отепляющее. Рассматриваемый способ разработан для высоких насыпей, когда площадь откосов превалирует над площадью основной площадки.

На рис. 3.10 показана зависимость глубины промерзания-оттаивания от термического сопротивления поверхности откоса. Благодаря сезонным изменениям условий теплообмена Земля летом поглощает тепло, а зимой – отдает его. Летнее поглощение тепла выражается в оттаивании деятельного слоя и в повышении температуры верхних слоев многолетнемерзлой толщи. Зимой отдача тепла Землей выражается в том, что сначала промерзает деятельный слой, а затем охлаждаются верхние слои многолетнемерзлой толщи. Условием сохранения мерзлого состояния Земли является систематическое ежегодное превышение теплоотдачи над теплоприходом. Мерзлое состояние грунтов сохраняется, если потенциальная глубина сезонного промерзания (промерзание при условии, что весь массив грунта талый)  $h_3$  пре-

восходит глубину летнего оттаивания  $h_л$ , т.е.  $M = \frac{h_3}{h_л} \geq 1$  и наоборот

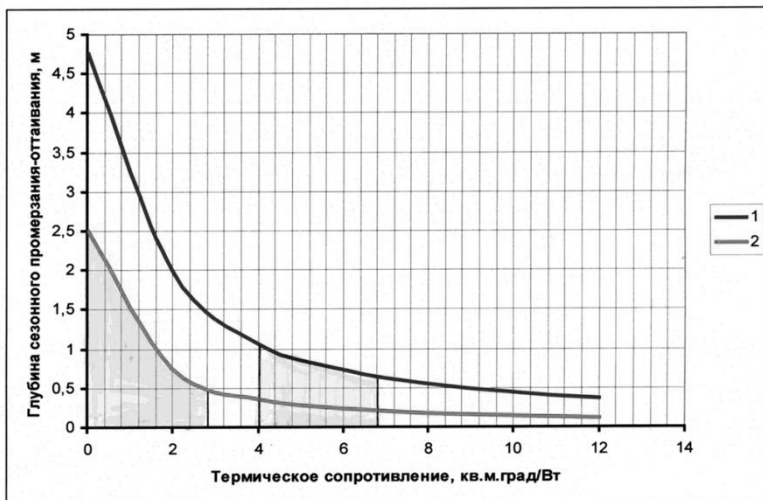


Рис. 3.10 Зависимость глубины сезонного промерзания грунта 1 и глубины сезонного оттаивания грунта 2 от термического сопротивления поверхности.

при  $M < 1$  происходит многолетнее оттаивание вечномерзлых грунтов. Этот параметр впервые ввел Н.А. Цытович в 1928 г. [Цытович, 1928]. Наши усилия направим на то, чтобы на откосе земляного полотна сократить глубину летнего оттаивания, оставив практически без изменения глубину зимнего промерзания. Из графиков на рис. 3.10 следует, что увеличение термического сопротивления на поверхности откоса при его малых начальных значения, что мы наблюдаем летом, существенно больше сокращает глубину, чем при больших, что мы наблюдаем зимой, когда на откосе лежит снег. Таким образом, укладывая на откос теплоизолятор мы увеличиваем параметр  $M$ , причем тем больше, чем больше снега на откосе. При определенной толщине теплоизоляции параметр  $M$  может превысить 1 и откос вместо отепляющего начнет оказывать охлаждающее влияние. Добиться охлаждающего эффекта можно всегда, если на откосе лежит снег. При этом толщина теплоизоляции будет зависеть от мощности снега в обратной пропорциональности. Пример этого, на первый взгляд парадоксального факта, показан на графиках, которые составлены для насыпи, расположенного в районе пос. Анадырь (рис. 3.10). Заметим, что если на откос положить синтетический теплоизолятор, например, ПЕНОПЛЭКС толщи-

ной 10 см, то величина  $M$  резко возрастет с 0.4 (на откосе нет теплоизолятора) до 1.4 (на откос положен теплоизолятор).

Эффективность указанного мероприятия исследовалась на 695 км. Амуро-Якутской железнодорожной магистрали [Чжан и др., 2017]. Протяженность участка 120 м. Он расположен в юго-восточной части Сибирской платформы в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Мощность мерзлой толщи здесь составляет 200 м. Температура ММП изменяется от минус 2.0 до минус 2.2 °С. Отличительной особенностью мерзлых пород на этом участке является то, что они содержат мощные повторно-жильные льды, залегающие на глубине 2–5 м от дневной поверхности. Экспериментальный участок представляет собой насыпь высотой 4.5 м. Заложение откосов 1:1.5. На откосах имеются две бермы высотой 1.0 м. Ширина основной площадки 7.0 м, берм – 2.0 м. Теплоизолятор (ПЕНОПЛЭКС) толщиной 5 см укладывался на откос и закреплялся металлическим шпильками. По поверхности теплоизолятора раскатывалась объемная пластмассовая сетка, которая заполнялась почвой с семенами многолетних трав. В отдельных случаях вместо объемной сетки применялась плоская сетка, поверх которой отсыпалась указанная почва.

Наблюдения за температурным режимом грунтов тела и основания насыпи предполагалось вести по температурным профилям для чего было пробурено и оборудовано несколько термометрических скважин. Однако в скважинах удалось провести только начальные замеры, после чего они были уничтожены вандалами. Восстановить скважины на действующей трассе не представлялось возможным, поэтому в 2016 г Институтом мерзлотоведения СО РАН проведены геофизические исследования методом георадиолокации на одном из температурных профилей с целью определения положения кровли многолетнемерзлых грунтов (рис. 3.11).

На рис. 3.12 цифрой 1 обозначено положение кровли многолетнемерзлых грунтов на момент исследований (2016 г) по данным георадиолокации; цифрой 2 – начальное положение кровли (2009 г) по данным температурных измерений. А также для сравнения, цифрой 3 обозначено положение кровли на момент исследований (2016 г) по результатам математического моделирования при наличии на откосе теплоизоляции; цифрой 4 – при ее отсутствии. Как можно видеть, результаты геофизических исследований и математического моделирования (кривые 1 и 3) практически совпадают. Что позволяет оценить реальную эффективность способа, сопоставляя кривые 1 и 4.



Рис. 3.11. Расположение геофизического профиля на экспериментальном участке.

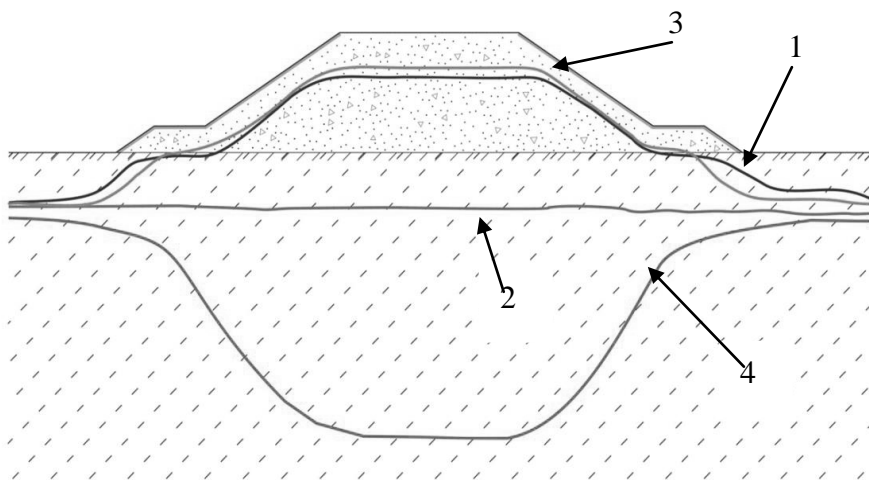


Рис. 3.12. Положение кровли многолетнемерзлых грунтов в теле и основании насыпи на экспериментальном участке по результатам геофизических исследований и математического моделирования..

Описанный способ имеет следующие преимущества перед известными: большая долговечность; высокая надежность; низкая стоимость; простота монтажа; ремонтпригодность.

Его широкое внедрение в практику является новым шагом технического прогресса в дорожном строительстве.

### 3.4 Расчет способов стабилизации

*Стабилизация начального положения кровли ММГ под зданием с помощью охлаждающего контура.* Положение границы оттаивания ММГ под серединой  $H_c$  и краем  $H_k$  здания определяется по нижеприведенным формулам. Вывод формул приводится в учебнике [Хрусталеv, 2005]. При этом положение границ зависит от параметров охлаждающего контура, устанавливаемого по периметру здания, и в первую очередь от глубины погружения термосифонов  $l_e$ , шага их расстановки  $h_e$  и расстояния термосифонов от середины здания  $R_e$ . Параметры контура назначают таким образом, чтобы с одной стороны  $H_k$  была не меньше глубины заложения фундамента плюс мощность сжимаемой зоны грунта (обычно принимается равной 2 м), а с другой иметь минимальную глубину залегания кровли ММГ под серединой здания, поскольку последняя определяет мощность талой зоны под зданием  $H = H_c$ , которую необходимо иметь к моменту передачи на основание полезной нагрузки. Расчет стационарной чаши оттаивания под зданием при наличии охлаждающего контура осуществляется по формуле:

$$H_{c,k} = \xi_{c,k}^* \cdot b_{30}, \quad (3.2)$$

где  $\xi_{c,k}^*$  – безразмерная глубина залегания кровли ММГ под серединой  $\xi_c^*$  и краем  $\xi_k^*$  здания, определяется по номограмме на рис. 3.13 в зависимости от относительного расстояния охлаждающего контура от

середины здания  $R_e^* = \frac{R_e}{b_{30}}$ , относительной глубины погружения

охлаждающих колонок  $l_e^* = \frac{l_e}{b_{30}}$  и безразмерной температуры на кон-

туре  $\beta_e = -\frac{\lambda_f \cdot T_e}{\lambda_{th} \cdot T_1}$ ;  $T_e, T_1$  – средние годовые температуры, соответ-

ственно, на охлаждающем контуре и на поверхности грунта под здани-

ем,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda_f, \lambda_{th}$  - коэффициенты теплопроводности грунта в мерзлом и талом состоянии, Вт/(м $^{\circ}\text{C}$ );  $l_e$  - глубина погружения в грунт термосифонов, м;  $b_{3\partial}$  - ширина здания, м;  $R_e$  - расстояние от оси здания до оси охлаждающего контура, м.

Средняя годовая температура на охлаждающем контуре определяется по формулам:

$$T_e = \frac{C_e \cdot T_{out} - S1 \cdot T_1 \cdot \frac{\lambda_{th}}{\lambda_f}}{C_e + 2 \cdot S2}, \quad (3.3)$$

$$C_e = \frac{\pi \cdot d_e \cdot l_e}{\lambda_f \cdot R_{in} \cdot h_e}, \quad (3.4)$$

$$S1 = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left[ \frac{(A3 + A1) \cdot (A2 - A3)}{(A1 - A3) \cdot (A2 + A3)} \right], \quad (3.5)$$

$$S2 = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left[ \frac{(A1 - 1) \cdot (A2 + 1) \cdot (A4 + A1) \cdot (A4 - A2)}{(A1 + 1) \cdot (A2 - 1) \cdot (A4 - A1) \cdot (A4 + A2)} \right], \quad (3.6)$$

$$A1 = ch \left[ \frac{\pi}{2 \cdot R_e} \cdot (l_e - \delta_e) \right], \quad (3.7)$$

$$A2 = ch \left( \frac{\pi}{2 \cdot R_e} \cdot \delta_e \right), \quad (3.8)$$

$$A3 = \sin \left( \frac{\pi}{4 \cdot R_e} \cdot b_{3\partial} \right), \quad (3.9)$$

$$A4 = ch \left( \frac{\pi}{2 \cdot R_e} \cdot l_e \right), \quad (3.10)$$

где  $T_{out}$  - средняя годовая температура атмосферного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $d_e$  - наружный диаметр охлаждающей колонки, м;  $\delta_e$  - толщина стенки охлаждающей колонки, м;  $R_{in}$  - внутреннее термическое сопротивление охлаждающей колонки теплообмену, м $^2$   $^{\circ}\text{C}$  / Вт, определяемое для парожидкостных термосифонов по формуле (2.7), для воздушных и рассольных установок - по формуле (2.8), для жидкостных термосифонов - по формуле (2.9);  $ch(x)$  - гиперболический косинус,  $ch(x) = 0.5 \cdot (e^x + e^{-x})$ .

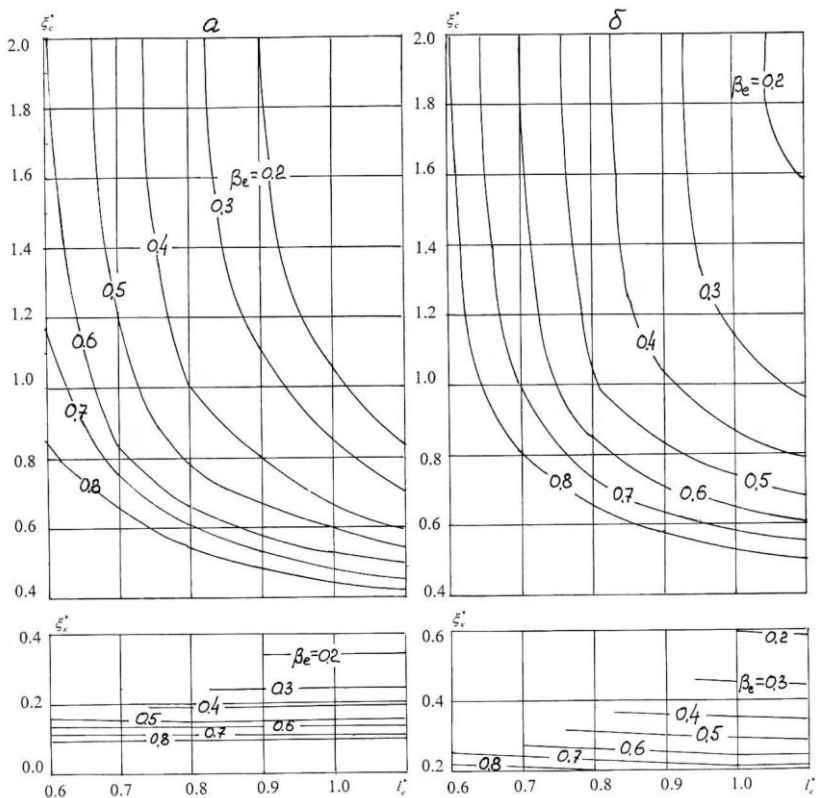


Рис. 3.13 Номограмма для расчета относительной глубины залегания кровли ММГ под серединой  $\xi_c^*$  и краем  $\xi_k^*$  здания при наличии охлаждающего контура.

*a* - при  $R_e^* = 0.625$ ; *б* - при  $R_e^* = 0.75$ .

#### Пример расчета.

Постановка задачи. Требуется выбрать площадку для строительства здания по способу стабилизации с охлаждающим контуром (принцип II) и рассчитать управляющие параметры системы «здание – основание» при следующих исходных данных: здание прямоугольной формы длиной  $l_{30} = 100$  м и шириной  $b_{30} = 12$  м; средняя годовая температура поверхности грунта под зданием  $T_1 = 12$  °С; По внешнему контуру зда-



ния установлен охлаждающий контур из парожидкостных термосифонов. Диаметр испарителя термосифона (диаметр охлаждающей колонки)  $d_e = 0.108$  м, толщина его стенки  $\delta = 0.003$  м, диаметр конденсатора –  $0.057$  м, отношение площади поверхности конденсатора к площади поверхности испарителя  $S_c/S_e = 1$ ; конденсатор имеет оребрение, хладоноситель термосифона – аммиак. В качестве фундамента используются ленты, которые располагаются по середине и краям здания. Глубина заложения подошвы фундамента составляет  $h_\phi = 2.5$  м. Коэффициенты теплопроводности грунта  $\lambda_{th} = 1.33$  Вт/(м $\cdot$ °С);  $\lambda_f = 1.51$  Вт/(м $\cdot$ °С). Климатические параметры района строительства: средняя годовая температура атмосферного воздуха  $T_{out} = -5.7$  °С, средняя годовая скорость ветра  $v = 5$  м/с.

Требуется определить  $H, R_e, l_e, h_e$ .

Последовательность расчета. 1) Определяем глубину залегания кровли ММГ под краем здания  $H_k = 2.5 + 2 = 4.5$  м и по формуле (2.2) - относительную глубину  $\xi_k^* = 4.5/12 = 0.375$ .

2) Как следует из номограммы на рис. 3.13, обеспечить величину  $\xi_k^* = 0.375$  можно, приняв значения параметров  $R_e^* = 0.75$ ,  $\xi_c^* = 1.03$ ,  $l_e/b_{30} = 0.9$ ,  $\beta_e = 0.4$ .

3) Определяем величины  $R_e = 0.75 \cdot 12 = 9$  м,  $l_e = 0.9 \cdot 12 = 10.8$  м,  $H = H_c = 1.03 \cdot 12 = 12.36$  м (принимаем  $H = 12.4$  м) и температуру на контуре  $T_e = -\frac{1.33 \cdot 12 \cdot 0.4}{1.51} = -4.2$  °С.

4) Подбором находим шаг расстановки термосифонов, обеспечивающих температуру контура  $-4.2$  °С. Задаем шаг  $h_e = 3$  м и по формулам (3.3) – (3.10) находим температуру контура, предварительно по формуле (2.7) с использованием табл. 2.2 находим  $R_{in} = \frac{1}{54.5 \cdot 1} = 0.0183$  м $^2$  °С/Вт;

$$C_e = \frac{\pi \cdot 0.108 \cdot 10.8}{1.51 \cdot 0.0183 \cdot 3} = 44.20;$$

$$A1 = ch \left[ \frac{\pi}{2 \cdot 9} \cdot (10.8 - 0.003) \right] = 3.366; \quad A2 = ch \left( \frac{\pi}{2 \cdot 9} \cdot 0.003 \right) = 1 +$$

$$6.9 \cdot 10^{-8}; \quad A3 = \sin\left(\frac{\pi}{4.9} \cdot 12\right) = 0.866; \quad A4 = ch\left(\frac{\pi}{2.9} \cdot 10.8\right) = 3.369;$$

$$S1 = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left[ \frac{(0.866 + 3.366) \cdot (1 + 6.9 \cdot 10^{-8} - 0.866)}{(3.366 - 0.866) \cdot (1 + 6.9 \cdot 10^{-8} + 0.866)} \right] = -0.67;$$

$$S2 = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left[ \frac{(3.366 - 1) \cdot (1 + 6.9 \cdot 10^{-8} + 1) \cdot (3.369 + 3.366) \cdot (3.369 - 1 - 6.9 \cdot 10^{-8})}{(3.366 + 1) \cdot (1 + 6.9 \cdot 10^{-8} - 1) \cdot (3.369 - 3.366) \cdot (3.369 + 1 + 6.9 \cdot 10^{-8})} \right] = 7.54;$$

$$T_e = \frac{44.2 \cdot (-5.7) + 0.67 \cdot 12 \cdot 1.33 / 1.51}{44.2 + 2 \cdot 7.54} = -4.13 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вычисленная температура выше необходимой ( $-4.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), поэтому уменьшаем шаг расстановки термосифонов до  $h_e = 2.8 \text{ м}$  и расчет повторяем.  $T_e = \frac{47.36 \cdot (-5.7) + 0.67 \cdot 12 \cdot 1.33 / 1.51}{47.36 + 2 \cdot 7.54} = -4.21 \text{ } ^\circ\text{C}.$

Вычисленная температура удовлетворяет названному выше условию, поэтому окончательно принимаем  $h_e = 2.8 \text{ м}$ .

*Ответ.*  $H = 12.4 \text{ м}$ ,  $R_e = 9 \text{ м}$ ,  $l_e = 10.8 \text{ м}$ ,  $h_e = 2.8 \text{ м}$ .

*Стабилизация начального положения кровли ММГ под подземным трубопроводом с помощью охлаждающего контура.* Данный расчет осуществляется по эмпирической формуле, полученной нами методом математического моделирования теплового взаимодействия трубопровода с охлаждающим контуром с вмещающими их мерзлыми грунтами. Моделирование производилось по разработанной на кафедре геокриологии компьютерной программе «3dTERM» [Пустовойт и др., 2015], позволяющей решать 3-х мерные задачи Стефана. В качестве начальных и граничных условий использовались данные по 4 метеостанциям, расположенным в различных районах криолитозоны (Воркута, Маррессаля, Игарка, Якутск). Моделирование показало, что влияние времени на глубину оттаивания исчезает еще до окончания эксплуатации трубопровода и ореол оттаивания вокруг трубопровода достигает своего стационарного положения. Это позволяет представить зависимость

глубины оттаивания под серединой нефтепровода  $h_{th}$ , считая от центра трубы, от 12 параметров:

- среднегодовой температуры на поверхности кольцевой изоляции трубы  $T_{ins}$  ;
- среднегодовой температуры на подошве слоя сезонного оттаивания  $T_0$  ;
- среднегодовой температуры на поверхности испарителя термосифона  $T_e$  ;
- температуры промерзания – оттаивания грунта  $T_{bf}$  ;
- радиуса нефтепровода с кольцевой изоляцией  $r_{ins}$  ;
- глубины заложения нефтепровода, считая от дневной поверхности до центра трубы  $h_p$  ;
- радиуса испарителя термосифона  $r_e$  ;
- длины испарителя термосифона  $l_e$ , считая от глубины расположения центра нефтепровода;
- шага расстановки термосифонов  $h_e$  ;
- расстояния от центра нефтепровода до термосифона  $R_e$  ;
- коэффициентов теплопроводности вмещающего нефтепровод грунта в талом  $\lambda_{th}$  и мерзлом  $\lambda_f$  состояниях.

Результаты моделирования приведены в табл. 3.1. В таблице 3.2 представлены те же результаты, но в безразмерном виде, как функция безразмерной глубины оттаивания от безразмерных параметров

$$\xi^\phi = f(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \eta, \omega),$$

$$\text{где } \xi^\phi = h_{th} / r_{ins}; \quad \alpha = -\frac{\lambda_{th} \cdot (T_{ins} - T_{bf})}{\lambda_f \cdot (T_e - T_{bf})}; \quad \beta = \frac{T_0 - T_{bf}}{T_e - T_{bf}}; \quad \gamma = \frac{r_e}{r_{ins}};$$

$$\delta = \frac{h_p}{r_{ins}}; \quad \varepsilon = \frac{h_e}{r_e}; \quad \eta = \frac{l_e}{r_e}; \quad \omega = \frac{R_e}{r_e}. \quad (3.11)$$

Параметр  $T_{ins}$  определяется по формулам (3.12) – (3.15) [Хрусталеv, 2005]:

$$T_{ins} = \left( T_{oil} + T_0 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R_T}{A_p} \right) / \left( 1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R_T}{A_p} \right), \quad (3.12)$$

$$A_p = \ln \left( \frac{h_p}{r_{ins}} + \sqrt{\frac{h_p^2}{r_{ins}^2} - 1} \right), \quad (3.13)$$

$$R_T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_p \cdot \alpha_{in}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ins}} \cdot \ln \left( \frac{r_{ins}}{r_p} \right), \quad (3.14)$$

$$\alpha_{in} = 1220 \cdot \frac{v_{oil}^{0.8}}{4 \cdot r_p^{0.2}}, \quad (3.15)$$

где  $T_{oil}$  – среднегодовая температура транспортируемой нефти,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $v_{oil}$  – скорость движения нефти по трубопроводу, м/с;  $r_p$  – внутренний радиус трубопровода, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта (средний между его талым и мерзлым состоянием), Вт/(м $^{\circ}\text{C}$ );  $\lambda_{ins}$  – коэффициент теплопроводности кольцевой изоляции трубопровода, Вт/(м $^{\circ}\text{C}$ ).

Среднегодовую температуру поверхности испарителя термосифона  $T_e$  можно найти, исходя из следующих соображений: в зимний период она равна температуре воздуха плюс поправка на инерцию системы, последняя принимается равной 1  $^{\circ}\text{C}$ ; в летний период, когда система не работает, – температуре окружающего грунта, которая в худшем случае будет равна температуре таяния грунта  $T_{bf}$ . Отсюда формула для  $T_e$  может быть записана:

$$T_e = \frac{(T_w + 1) \cdot t_w + T_{bf} \cdot t_s}{t_y}, \quad (3.16)$$

где  $T_w$  – средняя зимняя температура атмосферного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_w, t_s, t_y$  – продолжительность зимнего, летнего и годового периодов, ч.

Таблица 3.1

**Результаты математического моделирования теплового взаимодействия трубопровода и охлаждающего контура с вмещающими мерзлыми грунтами.**

| Метеостанция | $T_{ins},$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $T_0,$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $T_e,$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $T_{bf},$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $r_{ins},$<br>М | $h_p,$<br>М | $\lambda_{th}$<br>Вт/м $^{\circ}\text{C}$ | $\lambda_f$<br>Вт/м $^{\circ}\text{C}$ | $h_{th},$<br>М |
|--------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------|-------------|---|--|----------------|
| Воркута      | 30                               | -1                           | -8.03                        | -0.2                            | 0.51            | 1.5         | 1.33                                      | 1.51                                   | 3.0            |
|              | 20                               | -1                           | -8.03                        | -0.2                            | 0.51            | 1.5         | 1.33                                      | 1.51                                   | 2.4            |
|              | 10                               | -1                           | -8.03                        | -0.2                            | 0.51            | 1.5         | 1.33                                      | 1.51                                   | 1.6            |
|              | 30                               | -1                           | -8.03                        | -0.2                            | 0.64            | 1.5         | 1.33                                      | 1.51                                   | 3.2            |
|              | 20                               | -1                           | -8.03                        | -0.2                            | 0.64            | 1.5         | 1.33                                      | 1.51                                   | 2.6            |
|              | 10                               | -1                           | -8.03                        | -0.2                            | 0.64            | 1.5         | 1.33                                      | 1.51                                   | 1.8            |
|              | 30                               | -1                           | -8.03                        | -0.2                            | 0.76            | 1.5         | 1.33                                      | 1.51                                   | 3.4            |
|              | 20                               | -1                           | -8.03                        | -0.2                            | 0.76            | 1.5         | 1.33                                      | 1.51                                   | 2.8            |
|              | 10                               | -1                           | -8.03                        | -0.2                            | 0.76            | 1.5         | 1.33                                      | 1.51                                   | 2.0            |

| Метеостанция | $T_{ins},$<br>°C | $T_{\theta},$<br>°C | $T_e,$<br>°C | $T_{bf},$<br>°C | $r_{ins},$<br>м | $h_p,$<br>м | $\lambda_{th}$<br>Вт/м°C | $\lambda_f$<br>Вт/м°C | $h_{th},$<br>м |
|--------------|------------------|---------------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------|--------------------------|-----------------------|----------------|
| Маррессаля   | 30               | -4                  | -8.89        | -0.2            | 0.51            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.6            |
|              | 20               | -4                  | -8.89        | -0.2            | 0.51            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.2            |
|              | 10               | -4                  | -8.89        | -0.2            | 0.51            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.4            |
|              | 30               | -4                  | -8.89        | -0.2            | 0.64            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.8            |
|              | 20               | -4                  | -8.89        | -0.2            | 0.64            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.4            |
|              | 10               | -4                  | -8.89        | -0.2            | 0.64            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.6            |
|              | 30               | -4                  | -8.89        | -0.2            | 0.76            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 3.0            |
|              | 20               | -4                  | -8.89        | -0.2            | 0.76            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.4            |
|              | 10               | -4                  | -8.89        | -0.2            | 0.76            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.8            |
| Игарка       | 30               | -2                  | -11.0        | -0.2            | 0.51            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.6            |
|              | 20               | -2                  | -11.0        | -0.2            | 0.51            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.0            |
|              | 10               | -2                  | -11.0        | -0.2            | 0.51            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.4            |
|              | 20               | -2                  | -11.0        | -0.2            | 0.64            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.2            |
|              | 10               | -2                  | -11.0        | -0.2            | 0.64            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.6            |
|              | 20               | -2                  | -11.0        | -0.2            | 0.76            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.4            |
|              | 10               | -2                  | -11.0        | -0.2            | 0.76            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.6            |
| Якутск       | 30               | -3                  | -14.1        | -0.2            | 0.51            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.2            |
|              | 20               | -3                  | -14.1        | -0.2            | 0.51            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.8            |
|              | 10               | -3                  | -14.1        | -0.2            | 0.51            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.2            |
|              | 30               | -3                  | -14.1        | -0.2            | 0.64            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.4            |
|              | 20               | -3                  | -14.1        | -0.2            | 0.64            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.0            |
|              | 10               | -3                  | -14.1        | -0.2            | 0.64            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.4            |
|              | 30               | -3                  | -14.1        | -0.2            | 0.76            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.6            |
|              | 20               | -3                  | -14.1        | -0.2            | 0.76            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 2.0            |
|              | 10               | -3                  | -14.1        | -0.2            | 0.76            | 1.5         | 1.33                     | 1.51                  | 1.4            |

Примечание. Параметры охлаждающего контура приняты постоянными, а именно:  $r_e = 0.0635$  м,  $l_e = 5.0$  м,  $h_e = 3.0$  м,  $R_e = 2.0$  м.

Таблица 3.2

Зависимость  $\xi^\phi = f(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \eta, \omega)$

| $\xi^m$ | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\varepsilon$ | $\eta$ | $\omega$ | $\xi^\phi$ |
|---------|----------|---------|----------|----------|---------------|--------|----------|------------|
| 5.882   | 3.397    | 0.102   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 4.776      |
| 4.706   | 2.272    | 0.102   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 4.056      |
| 3.137   | 1.147    | 0.102   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.071      |
| 5.000   | 3.397    | 0.102   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 4.295      |
| 4.063   | 2.272    | 0.102   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.647      |
| 2.813   | 1.147    | 0.102   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.761      |
| 4.474   | 3.397    | 0.102   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.931      |
| 3.684   | 2.272    | 0.102   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.338      |
| 2.632   | 1.147    | 0.102   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.527      |

| $\xi^m$ | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\varepsilon$ | $\eta$ | $\omega$ | $\xi^\phi$ |
|---------|----------|---------|----------|----------|---------------|--------|----------|------------|
| 5.098   | 3.061    | 0.437   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 4.493      |
| 4.314   | 2.047    | 0.437   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.814      |
| 2.745   | 1.034    | 0.437   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.888      |
| 4.375   | 3.061    | 0.437   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 4.-40      |
| 3.750   | 2.047    | 0.437   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.430      |
| 2.500   | 1.034    | 0.437   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.597      |
| 3.947   | 3.061    | 0.437   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.697      |
| 3.158   | 2.047    | 0.437   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.139      |
| 2.368   | 1.034    | 0.437   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.377      |
| 3.137   | 2.463    | 0.167   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 4.164      |
| 3.922   | 1.647    | 0.167   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.535      |
| 2.745   | 0.832    | 0.167   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.677      |
| 3.438   | 1.647    | 0.167   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.179      |
| 2.500   | 0.832    | 0.167   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.407      |
| 3.158   | 1.647    | 0.167   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.910      |
| 2.105   | 0.832    | 0.167   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.203      |
| 4.314   | 1.914    | 0.201   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.748      |
| 3.529   | 1.280    | 0.201   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.182      |
| 2.353   | 0.646    | 0.201   | 0.125    | 2.941    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.410      |
| 3.750   | 1.914    | 0.201   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.371      |
| 3.125   | 1.280    | 0.201   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.862      |
| 2.188   | 0.646    | 0.201   | 0.099    | 2.344    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.167      |
| 3.421   | 1.914    | 0.201   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 3.085      |
| 2.632   | 1.280    | 0.201   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 2.619      |
| 1.842   | 0.646    | 0.201   | 0.084    | 1.974    | 47.244        | 86.614 | 31.496   | 1.983      |

Условные обозначения:  $\xi^m, \xi^\phi$  – соответственно, значения, полученные по результатам моделирования и вычисленные по формулам.

Аппроксимируем зависимость, представленную в табл. 3.2, аналитическим выражением. Для аппроксимации используем метод Брандона (Brandon, 1959). Метод в нашем конкретном случае состоит из 7 последовательных операций.

1. Принимаем значение относительной глубины оттаивания грунта под центром нефтепровода по результатам математического моделирования за  $y$ , а безразмерные коэффициенты  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  за  $x_0, x_1, x_2, x_3$ , соответственно. Таким образом  $y = f(x_0, x_1, x_2, x_3)$ .

2. Получаем нормализованные значения  $y$  для каждого из 34 вариантов:  $y_0 = \frac{y}{\bar{y}}$ ,

где  $\bar{y} = \text{const}$  – среднеарифметическое значение  $y$ , оно равно 3.334.

3. Далее находим зависимость между  $y_0$  и  $x_0$ :

$$y_0 = f_0(x_0).$$

Для этого просчитываем три зависимости:

$$y = a + b \cdot x \quad (\text{линейная})$$

$$y = a + b \cdot \ln x \quad (\text{логарифмическая})$$

$$y = a \cdot x^b \quad (\text{степенная}).$$

Выбираем зависимость с минимальным значением  $\Delta$  (ошибка аппроксимации), которое определяем по формуле:  $\Delta = \frac{|y_0 - f_0(x_0)|}{y_0} \cdot 100\%..$

В нашем случае наименьшую ошибку (17.93 %) дает степенная зависимость вида:  $f_0(x_0) = 0.784 \cdot x_0^{0.407}$

4. Определяем условный показатель  $y_1$  для каждого  $x_1$ :

$$y_1 = \frac{y_0}{f_0(x_0)}.$$

Этот остаточный показатель уже будет зависеть не от изменения  $x_0$ , а от величин  $x_1$ . Далее рассчитываем уравнение  $y_1 = f_1(x_1)$  и выбираем зависимость с минимальным значением  $\Delta$ . Ей соответствует также степенная зависимость со средней ошибкой 17.83 %, которая имеет вид:  $f_1(x_1) = 0.979 \cdot x_1^{0.407}$ .

5. Затем определяем новый показатель  $y_2$ , который будет

зависеть от изменения  $x_2$ :  $y_2 = \frac{y_1}{f_1(x_1)}$ .

Далее рассчитываем уравнение  $y_2 = f_2(x_2)$ . Здесь также выбираем зависимость с минимальным значением  $\Delta$ . Ей соответствует логарифмическая зависимость со средней ошибкой 3.97 %, которая имеет вид  $f_2(x_2) = 0.486 \cdot \ln(x_2) + 2.114$ .

6. Аналогично находим функцию  $y_3 = f_3(x_3)$ . Это опять

логарифмическая зависимость вида:  $f_3(x_3) = 0.003 \cdot \ln(x_3) + 0.996$ ,  
 которой соответствует ошибка  $\Delta = 3.96\%$ .

7. Модель относительной глубины оттаивания грунта под центром трубопровода имеет вид:

$$y = \bar{y} f_1(x_1) f_2(x_2) f_3(x_3) f_0(x_0).$$

Таким образом, окончательная формула для определения относительной глубины оттаивания грунта под центром трубопровода запишется:

$$\xi^\phi = 2.559 \cdot \alpha^{0.407} \cdot \beta^{-0.013} \cdot (0.486 \cdot \ln \gamma + 2.114) \cdot (0.003 \cdot \ln \delta + 0.996) \quad (3.17)$$

*Примечание.* Формула (3.17) выведена при условии, что безразмерные параметры  $\varepsilon$ ,  $\eta$  и  $\omega$  имеют постоянные значения, равные, соответственно, 47.244, 86.614 и 31.496.

Произведенная верификация формулы (3.17) показала, что точность аппроксимации данных моделирования вполне удовлетворительная (ошибка аппроксимации составляет: средняя – 8.06 %, минимальная – 0.37 %, максимальная – 32.73 %), что позволяет использовать эту формулу в практических расчетах.

Итак, окончательно имеем:

$$h_{th} = \xi^\phi \cdot r_{ins} \quad , \quad (3.18)$$

где  $h_{th}$  – глубина оттаивания мерзлого грунта под центром трубопровода, считая от центра нефтепровода, м.

*Пример расчета.*

Постановка задачи. Вокруг нефтепровода радиусом  $r_{ins} = 0.6$  м, находящегося на глубине  $h_p = 1.4$  м, расположен охлаждающий контур из парожидкостных термосифонов со следующими параметрами: радиус термосифонов  $r_e = 0.054$  м; среднегодовая температура испарителя термосифона  $T_e = -12$  °С; температура поверхности кольцевой изоляции нефтепровода  $T_{ins} = 20$  °С; температура грунта  $T_0 = -3$  °С; температура промерзания – оттаивания грунта  $T_{bf} = -0.2$  °С; теплопроводность мерзлого грунта  $\lambda_f = 1.8$  Вт/(м·°С); теплопроводность талого грунта  $\lambda_{th} = 1.57$  Вт/(м·°С).



Требуется определить глубина оттаивания мерзлого грунта под центром трубопровода  $h_{th}$ .

Последовательность расчета. 1) По формулам (3.11) определяем безразмерные параметры:

$$\alpha = -\frac{1.57 \cdot (20 + 0.2)}{1.8 \cdot (-12 + 0.2)} = 1.493; \quad \beta = \frac{-3 + 0.2}{-12 + 0.2} = 0.237;$$

$$\gamma = \frac{0.054}{0.6} = 0.09; \quad \delta = \frac{1.4}{0.6} = 2.5.$$

2) По формуле (3.17) вычисляем безразмерную глубину оттаивания:

$$\xi^{\phi} = 2.559 \cdot 1.493^{0.407} \cdot 0.237^{-0.013} \cdot (0.486 \cdot \ln(0.09) + 2.114) \cdot (0.003 \cdot \ln(2.5) + 0.996) = 2.893$$

3) По формуле (3.18) вычисляем глубину оттаивания:  $h_{th} = 2.893 \cdot 0.6 = 1.736$  м.

Ответ:  $h_{th} = 1.736$  м.

*Примечание:* 1. Указанный результат получен при шаге расстановки термосифонов  $h_e = 47.244 \cdot 0.054 = 2.55$  м, глубине их погружения в грунт  $l_e^* = 86.614 \cdot 0.054 + 1.4 = 6.08$  м и их расположения от оси нефтепровода  $R_e = 31.496 \cdot 0.054 = 1.7$  м ( $l_e^*$  – длина испарителя термосифона, считая от поверхности грунта).

2. Отсчет глубины оттаивания ведется от глубины расположения центра нефтепровода.

*Стабилизация начального положения кровли ММГ в основании дорожной насыпи с помощью охлаждающего контура.* Данный расчет осуществляется по эмпирической формуле, полученной нами методом математического моделирования теплового взаимодействия насыпи с охлаждающим контуром с мерзлыми грунтами основания. Моделирование производилось по разработанной на кафедре геокриологии компьютерной программе «3dTERM» [Пустовойт и др., 2015], позволяющей решать 3-х мерные задачи Стефана. В качестве начальных и граничных условий и грунтовых характеристик при моделировании использовались данные по 3 метеостанциям, расположенным в различных районах криолитозоны (Маррессаля, Елец, Надым). Обработка результатов велась в безразмерном виде. Цель обработки – получить эмпирическую зависимость безразмерной глубины оттаивания в ближайшей к источнику тепла точке на гребне насыпи (под бровкой откоса)

$\xi_{\delta} = \frac{h_6}{H}$  от безразмерных параметров  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \eta$ , которые

определяются по формулам:

$$\alpha = -\frac{2\lambda_{th} \cdot (T_{de} - T_{bf}) \cdot L}{\lambda_f \cdot (T_{or} - T_{bf}) \cdot B}; \quad \beta = \frac{T_e - T_{bf}}{T_{or} - T_{bf}}; \quad \gamma = \frac{T_0 - T_{bf}}{T_{or} - T_{bf}}; \quad \delta = \frac{h_e}{H};$$

$$\varepsilon = \frac{r_e}{h_e}; \quad \eta = \frac{B}{H}, \quad (3.19)$$

где  $\lambda_{th}, \lambda_f$  – коэффициенты теплопроводности грунта земляного полотна в талом и мерзлом состояниях, Вт/(м·°С);

$T_{or}, T_{de}$  – соответственно, расчетная температура поверхности гребня насыпи и расчетная температура поверхности откоса, определяемые по формулам (3.33), (3.34), °С;

$T_0, T_{bf}$  – температура грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов в естественных условиях и температура промерзания-оттаивания грунта земляного полотна, определяемые изысканиями, °С;  $T_e$  – среднегодовая температура поверхности испарителя термосифона, определяемая по формуле (3.16), °С;  $L$  – длина откоса насыпи, определяется по формуле (3.20), м;  $H$  – высота насыпи, м;  $B$  – ширина гребня насыпи, м;  $h_e, r_e$  – шаг расстановки термосифонов и радиус их испарителя, м;  $h_6$  – максимальная глубина оттаивания под бровкой откоса, считая от гребня насыпи, м.

$$L = H \cdot \sqrt{1 + n^2}, \quad (3.20)$$

где  $n$  – заложение откоса, д.е.

Результаты моделирования приведены в табл. 3.3. В таблице 3.4 представлены те же результаты, но в безразмерном виде.

Таблица 3.3

**Результаты математического моделирования теплового взаимодействия насыпи и охлаждающего контура, установленного у ее подошвы, с мерзлыми грунтами основания.**

| Метеостан  | $T_{de}$ | $T_{or}$ | $T_e$ | $T_0$ | $T_{bf}$ | H   | L    | $h_e$ | $h_6$ |
|------------|----------|----------|-------|-------|----------|-----|------|-------|-------|
| Маррессаля | 5.12     | -2.87    | -8.89 | -4.0  | -0.1     | 3   | 5.41 | 3.0   | 5.70  |
| Елец       | 4.90     | -0.36    | -8.10 | -0.5  | -0.1     | 3.0 | 5.41 | 3.0   | 5.20  |
| Надым      | 3.89     | -1.55    | -8.53 | -1.0  | -0.1     | 3.0 | 5.41 | 3.0   | 3.88  |

| Метеостан  | $T_{de}$ | $T_{or}$ | $T_e$ | $T_0$ | $T_{bf}$ | H   | L     | $h_e$ | $h_b$ |
|------------|----------|----------|-------|-------|----------|-----|-------|-------|-------|
| Марресалья | 5.12     | -2.87    | -8.89 | -4.0  | -0.1     | 3   | 5.41  | 5.0   | 3.91  |
| Елец       | 4.90     | -0.36    | -8.10 | -0.5  | -0.1     | 3.0 | 5.41  | 5.0   | 7.02  |
| Надым      | 3.89     | -1.55    | -8.53 | -1.0  | -0.1     | 3.0 | 5.41  | 5.0   | 4.56  |
| Марресалья | 5.12     | -2.87    | -8.89 | -4.0  | -0.1     | 3   | 5.41  | 8.0   | 4.30  |
| Елец       | 4.90     | -0.36    | -8.10 | -0.5  | -0.1     | 3.0 | 5.41  | 8.0   | 6.17  |
| Надым      | 3.89     | -1.55    | -8.53 | -1.0  | -0.1     | 3.0 | 5.41  | 8.0   | 5.93  |
| Марресалья | 5.12     | -2.87    | -8.89 | -4.0  | -0.1     | 6.0 | 10.82 | 3.0   | 7.17  |
| Елец       | 4.90     | -0.36    | -8.10 | -0.5  | -0.1     | 6.0 | 10.82 | 3.0   | 9.12  |
| Надым      | 3.89     | -1.55    | -8.53 | -1.0  | -0.1     | 6.0 | 10.82 | 3.0   | 7.60  |
| Марресалья | 5.12     | -2.87    | -8.89 | -4.0  | -0.1     | 6.0 | 10.82 | 5.0   | 7.42  |
| Елец       | 4.90     | -0.36    | -8.10 | -0.5  | -0.1     | 6.0 | 10.82 | 5.0   | 9.68  |
| Надым      | 3.89     | -1.55    | -8.53 | -1.0  | -0.1     | 6.0 | 10.82 | 5.0   | 8.43  |
| Марресалья | 5.12     | -2.87    | -8.89 | -4.0  | -0.1     | 6.0 | 10.82 | 8.0   | 8.27  |
| Елец       | 4.90     | -0.36    | -8.10 | -0.5  | -0.1     | 6.0 | 10.82 | 8.0   | 13.35 |
| Надым      | 3.89     | -1.55    | -8.53 | -1.0  | -0.1     | 6.0 | 10.82 | 8.0   | 9.98  |
| Марресалья | 5.12     | -2.87    | -8.89 | -4.0  | -0.1     | 9.0 | 16.23 | 3.0   | 10.41 |
| Елец       | 4.90     | -0.36    | -8.10 | -0.5  | -0.1     | 9.0 | 16.23 | 3.0   | 14.17 |
| Надым      | 3.89     | -1.55    | -8.53 | -1.0  | -0.1     | 9.0 | 16.23 | 3.0   | 11.54 |
| Марресалья | 5.12     | -2.87    | -8.89 | -4.0  | -0.1     | 9.0 | 16.23 | 5.0   | 11.04 |
| Елец       | 4.90     | -0.36    | -8.10 | -0.5  | -0.1     | 9.0 | 16.23 | 5.0   | 15.20 |
| Надым      | 3.89     | -1.55    | -8.53 | -1.0  | -0.1     | 9.0 | 16.23 | 5.0   | 12.48 |
| Марресалья | 5.12     | -2.87    | -8.89 | -4.0  | -0.1     | 9.0 | 16.23 | 8.0   | 11.69 |
| Елец       | 4.90     | -0.36    | -8.10 | -0.5  | -0.1     | 9.0 | 16.23 | 8.0   | 17.26 |
| Надым      | 3.89     | -1.55    | -8.53 | -1.0  | -0.1     | 9.0 | 16.23 | 8.0   | 14.44 |

Примечание: Ширина гребня насыпи и радиус термосифонов приняты постоянными величинами:  $B = 6.0$  м,  $r_e = 0.127$  м.

Таблица 3.4

Зависимость  $\xi_{\sigma}^{\phi} = f(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \eta)$

| $\xi_{\sigma}^m$ | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\varepsilon$ | $\eta$ | $\xi_{\sigma}^{\phi}$ | $\Delta$ |
|------------------|----------|---------|----------|----------|---------------|--------|-----------------------|----------|
| 1.900            | 2.885    | 3.173   | 1.408    | 1.00     | 0.042         | 2.000  | 1.350                 | 28.921   |
| 1.733            | 29.442   | 30.769  | 1.538    | 1.00     | 0.042         | 2.000  | 1.826                 | 5.368    |
| 1.293            | 4.213    | 5.814   | 0.621    | 1.00     | 0.042         | 2.000  | 1.475                 | 14.071   |
| 1.303            | 2.885    | 3.173   | 1.408    | 1.667    | 0.025         | 2.000  | 1.469                 | 12.680   |
| 2.340            | 29.442   | 30.769  | 1.538    | 1.667    | 0.025         | 2.000  | 1.986                 | 15.124   |
| 1.152            | 4.213    | 5.814   | 0.621    | 1.667    | 0.025         | 2.000  | 1.604                 | 5.548    |
| 1.433            | 2.885    | 3.173   | 1.408    | 2.667    | 0.015         | 2.000  | 1.600                 | 11.619   |
| 2.057            | 29.442   | 30.769  | 1.538    | 2.667    | 0.015         | 2.000  | 2.164                 | 5.200    |
| 1.977            | 4.213    | 5.814   | 0.621    | 2.667    | 0.015         | 2.000  | 1.748                 | 11.581   |
| 1.195            | 5.770    | 3.173   | 1.408    | 0.500    | 0.042         | 1.000  | 1.226                 | 2.561    |
| 1.152            | 58.884   | 30.769  | 1.538    | 0.500    | 0.042         | 1.000  | 1.657                 | 9.045    |
| 1.267            | 8.425    | 5.814   | 0.621    | 0.500    | 0.042         | 1.000  | 1.339                 | 5.703    |

| $\xi_{\sigma}^M$ | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\varepsilon$ | $\eta$ | $\xi_{\sigma}^{\phi}$ | $\Delta$ |
|------------------|----------|---------|----------|----------|---------------|--------|-----------------------|----------|
| 1.237            | 5.770    | 3.173   | 1.408    | 0.833    | 0.025         | 1.000  | 1.333                 | 7.773    |
| 1.613            | 58.884   | 30.769  | 1.538    | 0.833    | 0.025         | 1.000  | 1.802                 | 11.721   |
| 1.405            | 8.425    | 5.814   | 0.621    | 0.833    | 0.025         | 1.000  | 1.456                 | 3.629    |
| 1.378            | 5.770    | 3.173   | 1.408    | 1.333    | 0.015         | 1.000  | 1.452                 | 5.339    |
| 2.225            | 58.884   | 30.769  | 1.538    | 1.333    | 0.015         | 1.000  | 1.964                 | 11.750   |
| 1.663            | 8.425    | 5.814   | 0.621    | 1.333    | 0.015         | 1.000  | 1.586                 | 4.641    |
| 1.157            | 8.655    | 3.173   | 1.408    | 0.333    | 0.042         | 0.667  | 1.158                 | 0.113    |
| 1.574            | 88.327   | 30.769  | 1.538    | 0.333    | 0.042         | 0.667  | 1.566                 | 0.536    |
| 1.282            | 12.638   | 5.814   | 0.621    | 0.333    | 0.042         | 0.667  | 1.265                 | 1.343    |
| 1.227            | 8.655    | 3.173   | 1.408    | 0.556    | 0.025         | 0.667  | 1.259                 | 2.655    |
| 1.689            | 88.327   | 30.769  | 1.538    | 0.556    | 0.025         | 0.667  | 1.703                 | 0.833    |
| 1.387            | 12.638   | 5.814   | 0.621    | 0.556    | 0.025         | 0.667  | 1.376                 | 0.796    |
| 1.299            | 8.655    | 3.173   | 1.408    | 0.889    | 0.015         | 0.667  | 1.372                 | 5.613    |
| 1.918            | 88.327   | 30.769  | 1.538    | 0.889    | 0.015         | 0.667  | 1.855                 | 3.264    |
| 1.604            | 12.638   | 5.814   | 0.621    | 0.889    | 0.015         | 0.667  | 1.499                 | 6.598    |

Условные обозначения:  $\xi_{\sigma}^M$ ,  $\xi_{\sigma}^{\phi}$  - относительная глубина оттаивания грунта у бровки откоса земляного полотна, найденная моделированием и вычисленная по формуле (3.21);  $\Delta$  - ошибка аппроксимации,

$$\Delta = \frac{\left| \xi_{\sigma}^M - \xi_{\sigma}^{\phi} \right|}{\xi_{\sigma}^M} \cdot 100\%.$$

По данным табл. 3.4 нами методом американского статистика Брандона (Brandon, 1959) произведена аппроксимация данных моделирования и составлена эмпирическая формула вида:

$$\xi_{\sigma}^{\phi} = 1.125 \cdot \alpha^{0.081} \cdot \beta^{0.052} \cdot (1.054 - 0.034 \cdot \gamma) \cdot \delta^{0.212} \cdot (1.464 \cdot \varepsilon + 0.964) \cdot (0.009 \cdot \ln \eta + 0.999). \quad (3.21)$$

Верификация формулы (3.21) произведена в табличной форме (табл. 3.4) (последняя колонка). Как можно видеть, точность аппроксимации данных моделирования удовлетворительная (ошибка аппроксимации составляет: средняя - 7.19 %, минимальная - 0.11 %, максимальная - 28.92 %), что позволяет использовать эту формулу в практических расчетах.

*Примечание.* При выводе формулы (3.21) приняты следующие допущения: 1) термосифоны располагаются у подошвы насыпи; 2) внутреннее термическое сопротивление термосифонов отсутствует; 3) длина испа-

рителей термосифонов принимается равной заложению откоса насыпи; 4) крутизна откоса насыпи - 1.5.

Итак, окончательно имеем:

$$h_6 = \xi_6^\Phi \cdot H. \quad (3.22)$$

*Пример расчета.*

Постановка задачи. Железнодорожная насыпь, расположенная в районе г. Надым, имеет ширину основной площадки  $B = 6$  м, высоту  $H = 6$  м, заложение откоса  $n = 1.5$ . Расчетная температура основной площадки  $T_{or} = -4.4$  °С, откоса -  $T_{de} = 2.5$  °С. У подошвы насыпи с ее двух сторон установлены термосифоны диаметром  $d_e = 0.108$  м. Среднегодовая температура поверхности испарителя термосифонов  $T_e = -5.6$  °С; температура промерзания-оттаивания грунта земляного полотна  $T_{bf} = -0.1$  °С; температура грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов в естественных условиях  $T_0 = -1.6$  °С. Коэффициент теплопроводности материала насыпи в талом состоянии равен  $\lambda_{th} = 1.91$  Вт/(м·°С), в мерзлом  $\lambda_{th} = 2.14$  Вт/(м·°С).

Требуется определить шаг расстановки термосифонов, при котором максимальное оттаивание грунта под основной площадкой (под бровкой откоса)  $h_6$  будет равно или меньше высоты насыпи  $H$ .

Последовательность расчета. Расчет ведем методом итераций, добиваясь выполнения условия  $h_6 \leq H$ . На первом шаге итераций задаемся шагом расстановки термосифонов  $h_e = 3$  м. Далее определяем.

1) По формуле (3.20) -  $L = 6 \cdot \sqrt{1 + 1.5^2} = 10.82$ .

2) По формуле (3.19) -.  $\alpha = -\frac{2 \cdot 1.91 \cdot (2.5 + 0.1) \cdot 10.82}{2.14 \cdot (-4.4 + 0.1) \cdot 6} = 1.946$ ;

$$\beta = \frac{-5.6 + 0.1}{-4.4 + 0.1} = 1.279; \gamma = \frac{-1.6 + 0.1}{-4.4 + 0.1} = 0.349;$$

$$\delta = \frac{3}{6} = 0.5; \varepsilon = \frac{0.054}{3} = 0.018; \eta = \frac{6}{6} = 1.$$

3) По формуле (3.21) -

$$\xi_6^\Phi = 1.125 \cdot 1.946^{0.081} \cdot 1.279^{0.052} \cdot (1.054 - 0.034 \cdot 0.349) \cdot$$

$$0.5^{0.212} \cdot (1.464 \cdot 0.018 + 0.964) \cdot (0.009 \cdot \ln(1) + 0.999) = 1.071.$$

4) По формуле (3.22) –  $h_0 = 1.071 \cdot 6 = 6.423$  м.

Как видим  $h_0 > H$  ( $6.423$  м  $>$   $6$  м), поэтому уменьшаем шаг расстановки термосифонов и расчет повторяем до тех пор, пока не будет выполнено условие  $h_0 \leq H$ . Опуская аналогичные расчеты, приведем окончательный результат: Условие выполняется при шаге расстановки термосифонов равном  $h_e = 2.5$  м, при этом  $h_0 = 5.957$  м.

Ответ.  $h_e = 2.5$  м.

*Стабилизация начального положения кровли ММГ в основании здания с помощью вентилируемого подполья.* Цель расчета – определить модуль вентиляции проветриваемого подполья, при котором случайное отклонение температуры воздуха в подполье в сторону понижения от своего номинала не вызовет многолетнего промерзания грунта с поверхности более  $y$ , а в сторону повышения – многолетнего оттаивания грунта более  $\Delta H$  от своего начального положения  $H_0$ , где  $y$  и  $H_0$  – параметры, обеспечивающие устойчивость здания и определяемые из решения механической задачи [Хрусталеv, 2005].

Модуль вентиляции подполья здания, возводимого способом стабилизации, определяют по формуле (3.23):

$$M = k_n \frac{T_{in} - T_{c,a} - (T_{c,a} - T_{air})C}{1000R_0k_a v_a (T_{c,a} - T_{air})} \cdot \sqrt{1 + \chi}, \quad (3.23)$$

где  $k_n$  – коэффициент, зависящий от расстояния между зданиями  $l_c$  и их высоты  $h_{зд}$  (при

$l_c \geq 5 h_{зд}$   $k_n = 1.0$ , при  $l_c = 4 h_{зд}$   $k_n = 1.2$ , при  $l_c = 3 h_{зд}$   $k_n = 1.5$ );  $T_{in}$  – температура воздуха в помещениях,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{c,a}$  – температура воздуха в подполье, определяемая по формуле (3.26),  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{air}$  – средняя годовая температура атмосферного воздуха в районе строительства,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_0$  – сопротивление теплопередачи перекрытия над подпольем,  $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ;  $C$  – безразмерный параметр, учитывающий теплопотери через цоколь здания (для подполий без цокольного ограждения принимается  $C=0$ , для подполий с цокольным ограждением определяется расчетом);  $k_a$  – обобщенный аэродинамический коэффициент (для зданий прямоугольной формы в плане  $k_a = 0.37$ ; П-образной формы  $k_a = 0.30$ ; Т-образной формы  $k_a = 0.33$ ; L-образной формы  $k_a = 0.29$ );  $v_a$  – среднегодовая скорость ветра, м/с;  $\chi$  – суммарный коэффициент потерь аэродинамического

напора в вентиляционном канале или отверстии, определяется по формуле (3.25).

$$C = \frac{F_u}{F_c} \cdot \frac{R_0}{R_u}, \quad (3.24)$$

где  $F_u$  и  $F_c$  – площадь цоколя и здания в плане (пятна здания), м<sup>2</sup>;  $R_u$  – термическое сопротивление теплопередаче цоколя, м<sup>2</sup>°C/Вт.

$$\chi = \sum_{j=1}^{m1} \chi_j, \quad (3.25)$$

где  $m1$  – число участков;  $\chi_j$  – коэффициент, учитывающий потерю аэродинамического напора на  $j$ -ом участке, принимается по данным табл. 3.5.

Таблица 3.5

**Значение коэффициента, учитывающего потерю аэродинамического напора**

| Участок                           | $\chi_i$ |
|-----------------------------------|----------|
| Вход с сужением потока            | 0.50     |
| <b>Жалюзийная решетка</b>         | 2.00     |
| Поворот потока на 90°             | 1.32     |
| <b>Выход с расширением потока</b> | 0.64     |

$$T_{c,a} = -\frac{\lambda_f}{\lambda_{th} \cdot \beta_f} \cdot (T_0^{\min} - T_{bf}) + T_{bf} + 1.05 \cdot \sigma_a, \quad (3.26)$$

где  $T_0^{\min}$  – минимальная среднегодовая температура грунта возле здания на подошве слоя сезонного промерзания-оттаивания, определяется по формуле (3.30), °C;  $T_{bf}$  – температура промерзания-оттаивания грунта, °C;  $\lambda_{th}, \lambda_f$  – теплопроводность грунта в талом и мерзлом состояниях, Вт/(м·°C);  $\beta_f$  – безразмерный коэффициент, определяется по графикам на рис. 2.14, в зависимости от безразмерной глубины многолетнего промерзания у края здания  $\xi_f$  и безразмерного времени  $I_f$ ;  $\sigma_a$  – среднеквадратическое отклонение средней годовой температуры воздуха в подполье, принимается по данным натурных наблюдений, а при их отсутствии принимается равной 1 °C.

Параметры  $\xi_f, I_f$  вычисляются по формулам:

$$\xi_f = y/b_{зд}, \quad (3.27)$$

$$I_f = -\frac{\lambda_f \cdot T_0^{\min} \cdot t_3}{L_v^* \cdot b_{зд}^2}, \quad (3.28)$$

$$L_v^* = 93 \cdot \rho_{d,f} \cdot w_{tot} + 0.5 \cdot (C_{th} \cdot T_s - C_f \cdot T_w), \quad (3.29)$$

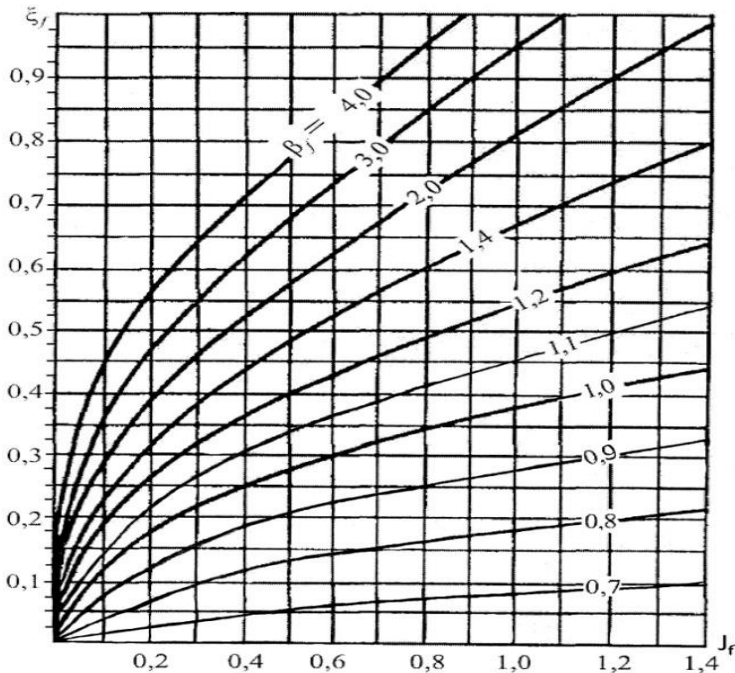


Рис. 3.14 Графики для определения безразмерной температуры  $\beta_f$ .

где  $y$  – допускаемая глубина многолетнего промерзания у края здания, определяется из условия устойчивости фундамента на выпучивание, м;  $b_{зд}$  – ширина здания, м;  $t_3$  – период эксплуатации здания, ч;



$\rho_{d,f}$  – плотность мерзлого грунта в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;  $w_{tot}$  – суммарная влажность мерзлого грунта, д.е.;  $C_{th}$ ,  $C_f$  – теплоемкость талого и мерзлого грунта, Вт·ч/(м<sup>3</sup>·°С);  $T_s$ ,  $T_w$  – средняя летняя и средняя зимняя температура атмосферного воздуха, °С.

$$T_0^{\min} = \frac{1}{t_y} \left\{ T_w(t_y - t_s) + L_v^* \cdot d_{th} \cdot \left[ \frac{d_{th}}{2 \cdot \lambda_f} + \theta^* \cdot (1 - 1.05 \cdot k_v) \cdot R_s \right] \right\}, \quad (3.30)$$

где  $t_y$  – продолжительность года, 8760 ч;  $t_s$  – продолжительность летнего периода, ч;  $d_{th}$  – глубина сезонного оттаивания, определяется по формуле (3.31), м;  $\theta^*$  – коэффициент, учитывающий снегозаносимость застройки (принимается по данным наблюдений, при их отсутствии и среднезимней скорости ветра более 5 м/с  $\theta^* = 1.3$ , а при скорости менее 5 м/с  $\theta^* = 1.0$ ;  $k_v$  – коэффициент вариации снежных отложений (определяется по данным натуральных наблюдений, а при их отсутствии принимается равным 0.2);  $R_s$  – среднее зимнее термическое сопротивление снежного покрова, м<sup>2</sup>·°С/Вт.

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th} \cdot (T_s - T_{bf}) \cdot t_s}{L_v^*}}. \quad (3.31)$$

Начальное расположение кровли ММГ определяется по формуле (3.32):

$$H_0 = \xi_0 \cdot b_{3д}, \quad (3.32)$$

где  $\xi_0$  – параметр, определяемый по номограмме на рис. 3.15 в зависимости от безразмерных параметров  $\Delta \xi_c$  и  $I_{th}$ .

$$\Delta \xi_c = \Delta H / b_{3д}, \quad (3.33)$$

$$I_{th} = \frac{\lambda_{th} \cdot (T_{c,a} + 1.05 \cdot \sigma_a) \cdot t_3}{L_v \cdot b_{3д}^2}, \quad (3.34)$$

$$L_v = 93 \cdot \rho_{d,f} \cdot (w_{tot} - w_w), \quad (3.35)$$

где  $w_w$  – количество незамерзшей воды в грунте, д.е.; остальные обозначения даны выше.

*Пример расчета.*

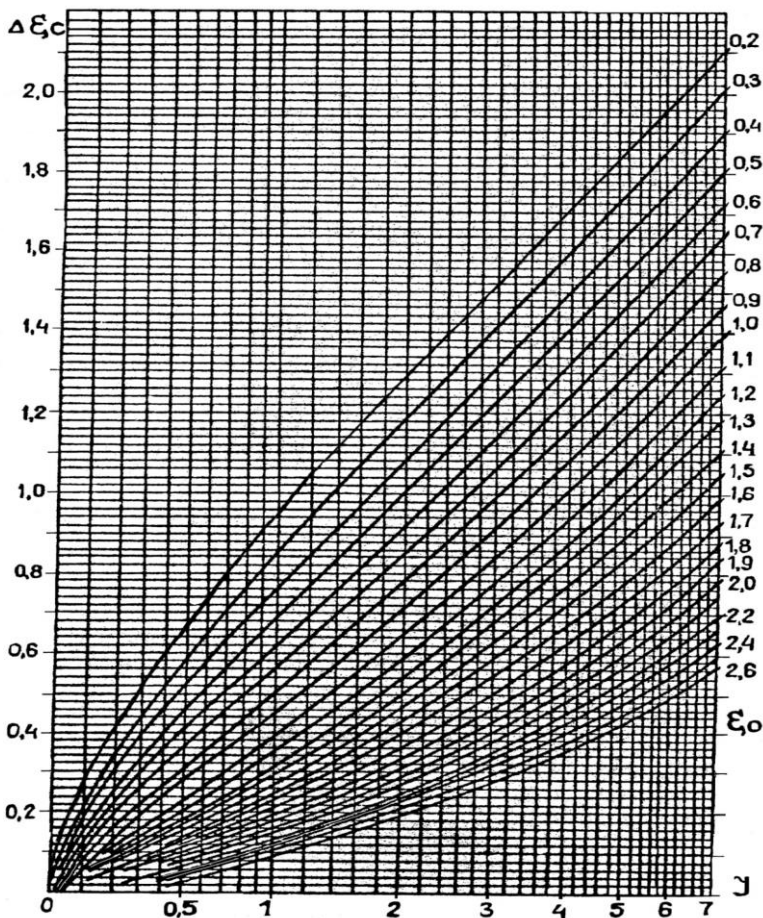


Рис. 3.15 Номограмма для определения  $\xi_0$

Постановка задачи. Требуется определить модуль вентиляции подполья здания, возводимого по способу стабилизации  $M$ , и минимальную глубину расположения кровли ММГ  $H_0$ , которую можно стабилизировать с помощью подполья, при следующих исходных данных: здание прямоугольной формы длиной  $l_{зд} = 100$  м и шириной  $b_{зд} = 12$  м; срок эксплуатации здания  $t_э = 438000$  ч (50 лет). Здание имеет технический этаж, в котором располагаются все санитарно-технические коммуникации и поддерживается средняя годовая температура воздуха  $T_{in} = 12$  °С. Термическое сопротивление перекрытия над подпольем  $R_0 = 0.43$  м<sup>2</sup> °С/Вт, цоколя –  $R_ц = 0.34$  м<sup>2</sup> °С/Вт; высота подполья  $h_ц = 1.5$  м. Для

предотвращения заносов снега входные отверстия вентиляционных каналов расположены на высоте 1.5 м от поверхности планировки и оборудованы жалюзийными решетками. Сами каналы имеют Z-образную форму ( $\chi = 5.78$ ). Допустимое промерзание грунта в основании здания за период его эксплуатации  $y = 4$  м, допустимое оттаивание  $-\Delta H = 2$  м. Климатические характеристики района строительства следующие: средняя годовая температура атмосферного воздуха  $T_{air} = -5.7$  °С; средняя летняя температура атмосферного воздуха  $T_s = 8.4$  °С; средняя зимняя температура атмосферного воздуха  $T_w = -12.8$  °С; продолжительность летнего периода  $t_s = 2920$  ч; средняя годовая скорость ветра  $v = 2$  м/с; среднезимнее термическое сопротивление снежного покрова  $R_s = 0.85$  м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Основание здания сложено суглинками:  $T_{bf} = -0.2$  °С;  $\rho_{df} = 1500$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{th} = 1780$  кг/м<sup>3</sup>;  $w_{tot} = 0.2$ ;  $w_w = 0.077$ ;  $\lambda_{th} = 1.34$  Вт/(м·°С);  $\lambda_f = 1.54$  Вт/(м·°С);  $C_{th} = 779$  Вт·ч/(м<sup>3</sup>·°С);  $C_f = 593$  Вт·ч/(м<sup>3</sup>·°С).

Последовательность расчетов. 1) По формулам (3.29) и (3.35) определяем затраты тепла на промерзание-оттаивание слоя сезонного промерзания и на оттаивание ММГ:

$$L_v^* = 93 \cdot 1500 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot (779 \cdot 8,4 - 593 \cdot (-12,8)) = 34967 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3,$$

$$L_v = 93 \cdot 1500 \cdot (0,2 - 0,07) = 18135 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3.$$

2) По формуле (3.31) вычисляем глубину сезонного оттаивания:

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,34 \cdot (8,4 + 0,2) \cdot 2920}{34967}} = 1,39 \text{ м}.$$

3) По формуле (3.30) находим минимальная среднегодовую температуру грунта возле здания:

$$T_0^{\min} = \frac{1}{8760} \left\{ \begin{array}{l} -12,8 \cdot (8760 - 2920) + 34967 \cdot 1,39 \cdot \\ \left[ \frac{1,39}{2 \cdot 1,54} + 1,3 \cdot (1 - 1,05 \cdot 0,2) \cdot 0,85 \right] \end{array} \right\} = -1,2 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

4) По формулам (3.27) и (3.28) вычисляем безразмерные параметры графиков на рис. 3.14

$$5) \quad \xi_f = 4/12 = 0,33;$$

$$I_f = -\frac{1,54 \cdot (-1,2) \cdot 438000}{34967 \cdot 12^2} = 0,16.$$

6) Используя значения параметров  $\xi_f$  и  $I_f$ , по графику на рис. 3.14 находим безразмерный параметр  $\beta_f = 1,7$ .

7) По формуле (3.26) вычисляем среднегодовую температуру воздуха в подполье:

$$T_{c,a} = -\frac{1,54}{1,34 \cdot 1,7} (-1,2 + 0,2) - 0,2 + 1,05 \cdot 1 = 1,53 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

8) По формуле (3.24) определяем параметр С. Предварительно находим площадь пятна здания  $F_c = l_{зд} \cdot b_{зд} = 100 \cdot 12 = 1200 \text{ м}^2$  и площадь его цоколя  $F_{ц} = 2 \cdot (l_{зд} + b_{зд}) \cdot h_{ц} = 2 \cdot (100 + 12) \cdot 1,5 = 336 \text{ м}^2$ ;

$$C = \frac{336 \cdot 0,43}{1200 \cdot 0,34} = 0,35.$$

9) По формуле (3.23) вычисляем модуль вентиляции подполья:

$$M = 1 \cdot \frac{12 - 1,53 - (1,53 + 5,7) \cdot 0,35}{1000 \cdot 0,43 \cdot 0,37 \cdot 5,1 \cdot (1,53 + 5,7)} \cdot \sqrt{1 + 5,78} = 0,0035$$

10) По формулам (3.33) и (3.34) определяем входные параметры в номограмму на рис. 3.15:

$$\Delta \xi_c = 2/12 = 0,16;$$

$$I_{th} = \frac{1,34 \cdot (1,53 + 1,05 \cdot 1) \cdot 438000}{18135 \cdot 12^2} = 0,58.$$

11) Используя значения параметров  $\Delta \xi_c$  и  $I_{th}$ , по номограмме на рис.

3.15 находим параметр  $\xi_0 = 0,9$ , а затем по формуле (2.32) вычисляем

$$H_0 = 0,9 \cdot 12 = 10,8 \text{ м}.$$

Ответ.  $M = 0,0035$ ,  $H_0 = 10,8 \text{ м}$ .

*Стабилизация мерзлотных условий в основании земляного полотна дорог с помощью теплоизолятора.* Данный расчет осуществляется по эмпирическим формулам, полученным методом математического моделирования теплового взаимодействия земляного полотна дороги с атмосферой [Чжан, 2019]. Моделирование производилось по разработанной на кафедре геокриологии компьютерной программе «Warm» [Емельянов и др., 1994], позволяющей решать 2-х мерные задачи Стефана. В качестве начальных и граничных условий и грунтовых харак-

теристик использовались данные по 3 метеостанциям, расположенным в различных районах криолитозоны (Чум, Салехард, Амга). Обработка результатов велась в безразмерном виде. В результате обработки получена нижеследующая экспериментальная зависимость:

$$\xi_{\sigma}^{\phi} = h_{\sigma} / H = 1,1 \cdot \alpha^{0,45} \cdot \beta^{-0,213} \cdot \gamma^{0,571}. \quad (3.36)$$

*Примечание:* Если  $\alpha < 0$ , то следует принимать  $\alpha = 0$ .

$$\alpha = \frac{2 \cdot \lambda_{th} \cdot (T_{de} - T_{bf}) \cdot L}{\lambda_f \cdot (T_{bf} - T_{or}) \cdot B}, \quad \beta = \frac{T_{bf} - T_0}{T_{bf} - T_{or}}, \quad \gamma = \frac{B}{H}, \quad (3.37)$$

где  $h_{\sigma}$  – глубина оттаивания земляного полотна под бровкой откоса, м;  $H$  – высота насыпи, м;  $\lambda_{th}, \lambda_f$  – коэффициенты теплопроводности грунта земляного полотна, соответственно, в талом и мерзлом состояниях, Вт/(м·°С);

$T_{or}, T_{de}, T_0, T_{bf}$  – соответственно, расчетная температура поверхности гребня земляного полотна, расчетная температура поверхности откоса, температура грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов в естественных условиях, температура промерзания-оттаивания грунта земляного полотна, °С;  $B$  – ширина гребня земляного полотна, м;  $L$  – длина откоса земляного полотна, м.

Расчетные температуры гребня и откоса земляного полотна определяются по следующим корреляционным зависимостям, полученным на основе математического моделирования теплового взаимодействия земляного полотна дороги с атмосферой [Ашпиз, Хрусталеv, 2013].

Для пурговых районов ( $v_w > 4\text{м/с}$ ) эта зависимость имеет вид:

$$T_{or,de} = -5,513 \cdot M + 6,64 \quad \text{при коэффициенте линейной корреляции} \\ k_r = -0,938, \quad (3.38)$$

Для морозных районов ( $v_w \leq 4\text{м/с}$ ):

$$T_{or,de} = -7,762 \cdot M + 7,68 \quad \text{при коэффициенте линейной корреляции} \\ k_r = -0,957, \quad (3.39)$$

где  $v_w$  – средняя зимняя скорость ветра, м/с;  $M = \frac{d_f}{d_{th}}$ , безразм.;

$d_f, d_{th}$  – максимально возможная глубина сезонного промерзания и оттаивания земляного полотна, м.

Чтобы воспользоваться корреляционными зависимостями, надо знать глубины сезонного промерзания – оттаивания материала насыпи в районе строительства. В первом приближении они могут быть вычислены по формуле Стефана:

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th} \cdot \Omega_s}{L_v} + (\lambda_{th} \cdot R_s)^2} - \lambda_{th} \cdot R_s, \quad (3.40)$$

$$d_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot (-\Omega_w)}{L_v} + (\lambda_f \cdot R_w)^2} - \lambda_f \cdot R_w, \quad (3.41)$$

$$R_s = \frac{1}{\alpha_s} + R_{ins}, \quad (3.42)$$

$$R_w = \frac{1}{\alpha_w} + R_{ins} + R_{snow}, \quad (3.43)$$

где  $L_v$  – удельная теплота промерзания-оттаивания материала земляного полотна, Втч/м<sup>3</sup>;  $\Omega_w$  – сумма градусочасов температуры атмосферного воздуха в зимний период;  $\Omega_s$  – сумма градусочасов температуры поверхности земляного полотна в летний период, вычисляется согласно СП 131.33330.12 по формуле (3.44);  $R_s, R_w$  – среднелетнее и среднезимнее термическое сопротивление теплообмену на поверхности грунта в пределах гребня и откоса земляного полотна, м<sup>2</sup> °C/Вт;  $\alpha_s, \alpha_w$  – коэффициенты теплообмена на поверхности гребня и откоса, соответственно, в летнее и зимнее время, Вт/(м<sup>2</sup> °C);  $R_{ins}$  – термическое сопротивление изоляции, укладываемой на откос ( на гребне  $R_{ins}$  принимается равным нулю), м<sup>2</sup> °C/Вт;  $R_{snow}$  – среднее зимнее термическое сопротивление снежного покрова на гребне и откосе (методика определения перечисленных величин изложена в учебнике [Хрусталеv, 2005]).

$$\Omega_s = 730 \cdot \sum_{i=1}^m \left( T_{s,i} + \frac{R_i - Q_i}{\alpha_i} \right), \quad (3.44)$$

где  $m$  – количество летних месяцев;  $T_{s,i}$  – среднемесячная температура воздуха в  $i$ -ый летний месяц,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_i$  – радиационный баланс поверхности подсыпки в  $i$ -ый летний месяц, определяется по формуле (3.45), (3.46),  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $Q_i$  – потери тепла с дневной поверхности за счет испарения и нагрева подстилающих пород и фазовых переходов в них в  $i$ -ый летний месяц, определяется по формуле (3.47),  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\alpha_i$  – коэффициент теплообмена поверхности с атмосферой в  $i$ -ый летний месяц, определяется по формуле (3.48),  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

*Примечание:* Параметры  $T_{s,i}$ ,  $Q_i$  и  $v_i$  определяются согласно СП 131.33330.12.

Для песчаных, щебеночных и асфальтовых поверхностей:

$$R_i = 0.61 \cdot \Phi_{s,i} - 20, \quad (3.45)$$

Для бетонных и железобетонных покрытий:

$$R_i = 0.61 \cdot \Phi_{s,i} - 40, \quad (3.46)$$

где  $\Phi_{s,i}$  – суммарная солнечная радиация в  $i$ -ый летний месяц, определяется по данным графиков (рис. 3.16),  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

$$Q_i = 0,49 \cdot \Phi_i - 60, \quad (3.47)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 2.4 \cdot v_i + 2.3, & \text{при } v_i < 4.6 \text{ м/с,} \\ 3.7 \cdot (v_i - 1) & \text{при } v_i > 4.6 \text{ м/с,} \end{cases} \quad (3.48)$$

где  $v_i$  – средняя месячная скорость ветра, м/с.

*Пример расчета.*

Постановка задачи. Железнодорожная насыпь, расположенная в районе пос. Лабитнанги (метеостанция Салехард, пурговый район), имеет ширину основной площадки  $B = 6$  м, высоту  $H = 4$  м, заложение откоса  $n = 1.5$ . Коэффициент теплообмена между дневной поверхностью насыпи и атмосферой в летнее время равен  $\alpha_{v,s} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , в зимнее  $\alpha_{v,w} = 16.7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ . Среднее зимнее термическое сопротивление снега на основной площадке равно  $R_{snow,or} = 0.167 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ , на откосе  $R_{snow,de} = 4 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ . Сумма градусочасов дневной поверхности насы-

пи в летнее время с учетом солнечной радиации равно  $\Omega_s = 38617$ , в зимнее  $\Omega_w = -84607$ . Коэффициент теплопроводности материала насыпи в талом состоянии равен  $\lambda_{th} = 1.97$  Вт/(м·°С), в мерзлом  $\lambda_{th} = 2.32$  Вт/(м·°С), удельная теплота промерзания-оттаивания  $L_v = 20925$  Вт·ч/м<sup>3</sup>, температура промерзания-оттаивания  $T_{bf} = -0,1$ °С. Начальная температура грунта основания насыпи на глубине нулевых годовых теплооборотов равна  $T_0 = -1$ °С. Требуется определить термическое сопротивление теплоизоляции, укладываемой на откос насыпи, при котором максимальное оттаивание грунта под основной площадкой (под бровкой откоса) не превысит высоту насыпи.

талом состоянии равен  $\lambda_{th} = 1.97$  Вт/(м·°С), в мерзлом  $\lambda_{th} = 2.32$  Вт/(м·°С), удельная теплота промерзания-оттаивания  $L_v = 20925$  Вт·ч/м<sup>3</sup>, температура промерзания-оттаивания  $T_{bf} = -0,1$ °С. Начальная температура грунта основания насыпи на глубине нулевых годовых теплооборотов равна  $T_0 = -1$ °С. Требуется определить термическое сопротивление теплоизоляции, укладываемой на откос насыпи, при котором максимальное оттаивание грунта под основной площадкой (под бровкой откоса) не превысит высоту насыпи.

Последовательность расчета. Расчет ведем методом итераций, добиваясь выполнения условия  $h_g \leq H$ . На первом шаге итераций задаемся значением термического сопротивления теплоизоляции равным  $R_{ins} = 0$ . Далее определяем.

1) Длину откоса  $L = \sqrt{H^2 + (n \cdot H)^2} = \sqrt{4^2 + (1,5 \cdot 4)^2} = 7,21$  м. 2) По формулам (3.42) и (3.43) вычисляем термическое сопротивление на дневной поверхности в летнее и зимнее время в пределах основной площадки и откоса:

$$R_{s,or} = R_{s,de} = 1/20 = 0.05 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}; \quad R_{w,or} = 1/16.7 + 0.167 = 0.227 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}; \quad R_{w,de} = 1/16.7 + 4 = 4.06 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}.$$

3) По формуле (3.40) определяем глубину сезонного оттаивания грунта на основной площадке и откосе:

$$d_{th,or} = d_{th,de} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.97 \cdot 38617}{20925} + (1.97 \cdot 0.05)^2} - 1.97 \cdot 0.05 = 2.6 \text{ м}.$$



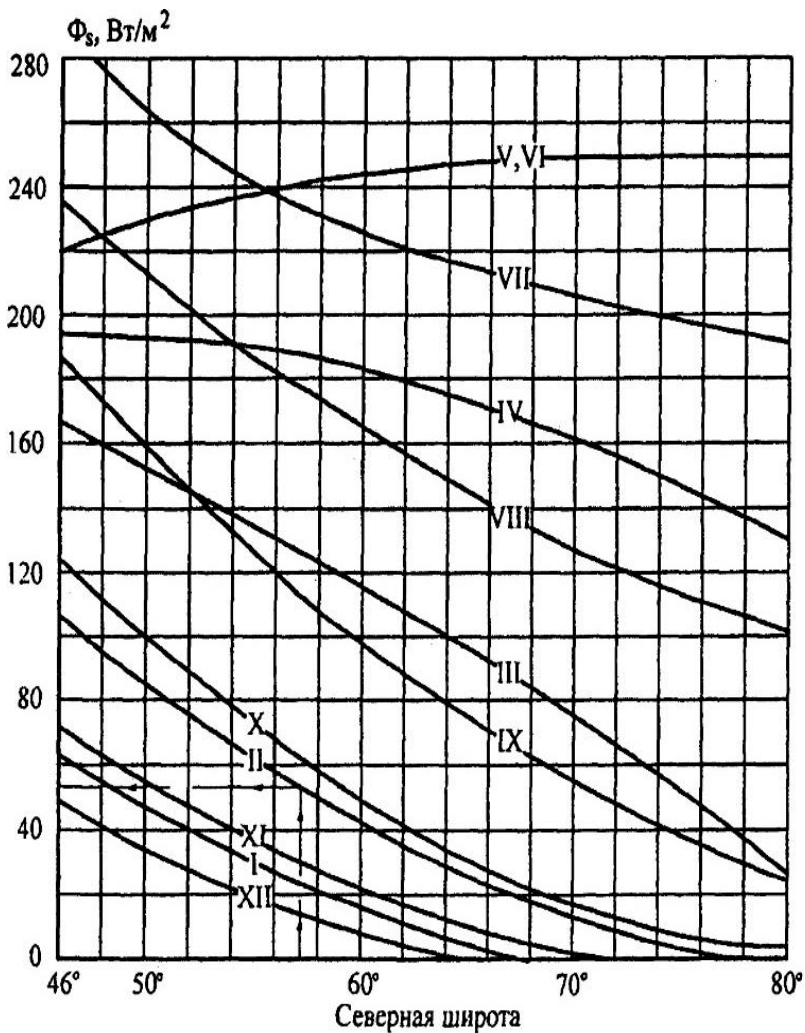


Рис. 3.16. Зависимость суммарной солнечной радиации  $\Phi_s$  от широты местности (I – XII – месяцы года) [СП 131.13330.2012].

4)

$$d_{f,de} = \sqrt{\frac{-2 \cdot 2.32 \cdot (-84607)}{20925} + (2.32 \cdot 4.06)} - 2.32 \cdot 4.06 = 0.95 \text{ м.}$$

5) По формуле (3.41) определяем глубину сезонного промерзания грунта на основной площадке и откосе:

$$d_{f,or} = \sqrt{\frac{-2 \cdot 2.32 \cdot (-84607)}{20925} + (2.32 \cdot 0.227)} - 2.32 \cdot 0.227 = 3.84 \text{ м;}$$

6) Находим безразмерный параметр М на основной площадке и откосе:  $M_{or} = 3.84/2.6 = 1.476$ ;  $M_{de} = 0.95/2.6 = 0.365$ . 7) По формуле (3.38) определяем расчетную температуру поверхности насыпи в пределах основной площадки и откоса:

$$T_{or} = -5.53 \cdot 3.84 + 6.64 = -1.5^{\circ}\text{C};$$

$T_{de} = -5.53 \cdot 0.365 + 6.64 = 4.63^{\circ}\text{C}$ . 8) По формулам (3.37) определяем безразмерные параметры:

$$\alpha = \frac{2 \cdot 1.97 \cdot (4.63 + 0.1) \cdot 7.21}{2.32 \cdot (-0.1 + 1.5)} = 6.916; \beta = \frac{-0.1 + 1}{-0.1 + 1.5} = 0.645;$$

$$\gamma = \frac{6}{4} = 1.5.$$

9) По формуле (3.36) находим безразмерную глубину оттаивания грунта у бровки откоса:

$$\xi_6 = 1.1 \cdot 6.916^{0.45} \cdot 0.645^{-0.213} \cdot 1.5^{0.571} = 3.63.$$

10) Определяем глубину оттаивания грунта у бровки откоса и сравниваем ее с высотой насыпи:  $3.63 \cdot 4 \text{ м} \gg 4 \text{ м}$ . Поскольку условие не выполняется кладем на откос теплоизолятор и расчет повторяем при разных значениях  $R_{ins}$  до тех пор, пока это условие не будет выполнено. Опуская аналогичные расчеты, приведем окончательный результат: Условие выполняется при термическом сопротивлении теплоизоляции равным  $R_{ins} = 4.57 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ , при этом  $h_6 = 3.58 \text{ м}$ , что на 0.42 м меньше высоты насыпи.

Ответ.  $R_{ins} = 4.57 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$

## **Глава 4. Использование тепловых насосов в строительных конструкциях**

В настоящее время в мире используется более 10 млн тепловых насосов (ТН) для обогрева помещений за счет охлаждения окружающей среды. По экономичности их работы ТН уступают только газовым котлам, а если одновременно с обогреванием помещений ТН использовать и его возможности охлаждения, например, для сохранения мерзлого состояния грунтов, то таким установкам сегодня в мире нет равных. Использованию ТН по двойному назначению – «обогревание-охлаждение» в конструкциях малоэтажных зданий и нефтяных резервуарах посвящается настоящая глава.

### **4.1 Принцип работы теплового насоса**

ТН состоит из трех контуров – двух внешних (греющего и охлаждающего) и одного внутреннего. Внешние контура заполнены теплоносителем: греющий контур – водой, охлаждающий – антифризом (жидкостью, замерзающей при температуре ниже температуры кипения хладагента), внутренний контур – хладагентом (аммиаком или фреоном 12). Охлаждающий контур укладывается в среду, из которой планируется перекачивать низкопотенциальную тепловую энергию (земля, воздух, вода), греющий – подключается к системе отопления или сам представляет собой систему отопления здания, сооружения. ТН работает следующим образом (рис. 4.1)

Теплоноситель нагревается на несколько градусов, проходя по охлаждающему контуру, и поступает во внутренний контур. Здесь он проходит через теплообменник (испаритель) и отдает собранное тепло внутреннему контуру теплового насоса. Внутренний контур теплового насоса заполнен хладагентом, имеющим низкую температуру кипения, который, проходя через испаритель, превращается из жидкого состояния в газообразное при низкой температуре и низком давлении. Из испарителя газообразный хладагент попадает в компрессор, там он сжимается до высокого давления и высокой температуры. Затем горячий газ поступает во второй теплообменник – конденсатор, где происходит теплообмен между горячим газом и теплоносителем греющего контура. Хладагент, отдавая тепло теплоносителю греющего контура, охлаждается и превращается в жидкость, а теплоноситель греющего контура отдает тепло среде (воздух, жидкость) внутри здания или сооруже-

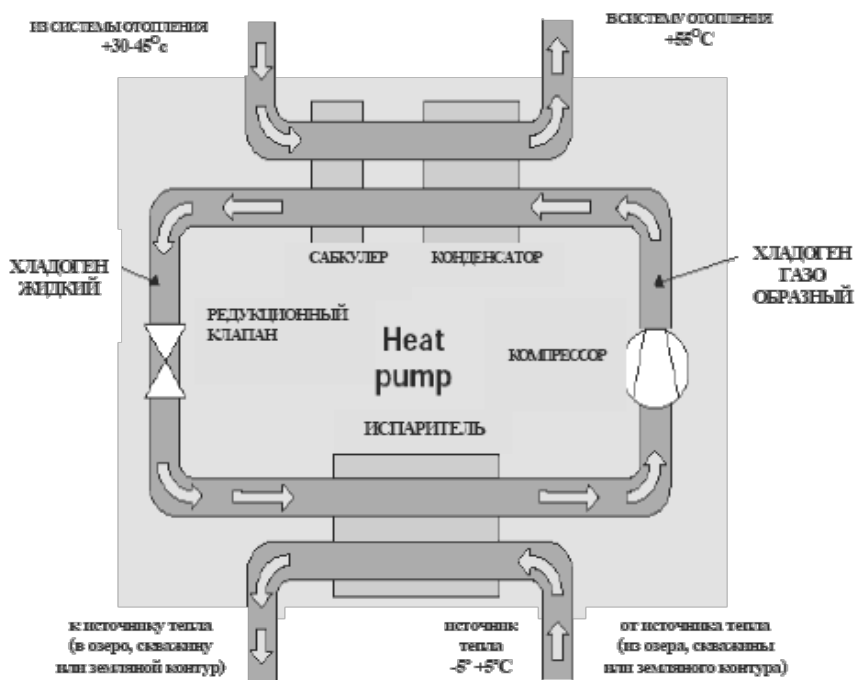


Рис. 4.1 Схема работы теплового насоса

ния. Далее хладагент поступает в редукционный клапан, сбрасывает давление и вновь поступает в испаритель. На этом один цикл завершается и начинается следующий и т. д.

Эффективность тепловых насосов принято характеризовать величиной безразмерного коэффициента трансформации энергии  $COP$ , равного:

$$COP = \frac{Q_h}{N}, \quad (4.1)$$

где  $Q_h$  – теплопроизводительность ТН, кВт;  $N$  – мощность электродвигателя компрессора, кВт.

С другой стороны величина  $COP$  для идеального цикла Карно определяется по формуле:

$$COP = \frac{T_{кон}}{T_{кон} - T_{кип}}, \quad \text{для реального цикла:}$$

$$COP = \eta \cdot \frac{T_{кон}}{T_{кон} - T_{кип}}, \quad (4.2)$$

где  $T_{кон}, T_{кип}$  – абсолютные температуры конденсации и кипения хладагента во внутреннем контуре;  $\eta$  – эмпирический коэффициент, учитывающий необратимые потери энергии при реализации цикла, обычно принимаемый равным 0,35-0,75 (таб. 4.1).

К преимуществам ТН по сравнению с другими способами отопления в первую очередь следует отнести их экономичность. Так для передачи в систему отопления 1 кВт·ч тепловой энергии ТН необходимо затратить всего 0,2 - 0,35 кВт·ч электрической энергии.

Так как преобразование тепловой энергии в электрическую на крупных электростанциях происходит с КПД до 50 %, то эффективность использования топлива при применении ТН повышается более чем в два раза. Кроме того, повышается уровень пожарной безопасности, ибо все системы функционируют с использованием замкнутых контуров и практически не требуют эксплуатационных затрат. При использовании ТН по двойному назначению (обогревание помещений и охлаждение грун-

Таблица 4.1

**Степень термодинамического совершенства некоторых компрессоров, используемых в современных ТН**

| Мощность, кВт | Тип компрессора       | $\eta$      |
|---------------|-----------------------|-------------|
| 300 - 3000    | Открытый центробежный | 0,55 – 0,75 |
| 50 - 500      | Открытый поршневой    | 0,50 – 0,65 |
| 20 - 50       | Полугерметичный       | 0,45 – 0,55 |
| 2 - 5         | Герметичный           | 0,35 – 0,50 |

тов основания) преимущества ТН многократно возрастают, поскольку в этом случае охлаждение есть всего лишь побочный эффект обогрева и, естественно, ничего не стоит.

Общим недостатком ТН является сравнительно низкая температура нагреваемой воды, в большинстве не более  $+50^{\circ}\text{C} \div +60^{\circ}\text{C}$  градусов, причем, чем выше температура нагреваемой воды, тем меньше эффективность ТН, что следует из формулы (4.2). Это обуславливает переход с радиаторной системы отопления на поверхностные системы (теплый пол, теплая стена и т.п.). В нашем случае такой переход особенно полезен, поскольку он позволяет в конструкции одного фундамента здания или сооружения совместить две функции ТН: обогрев и охлаждение.

## 4.2 Поверхностный фундамент, совмещенный с ТН

Намечающееся широкое освоение Арктики потребует новые строительные технологии, которые будут отличаться от известных новыми материалами, высокой сборностью конструкций, их малым весом, энергосберегающими технологиями и экологической безопасностью. Особенно остро стоит вопрос в фундаментостроении, составляющего 30-40 % общих капитальных затрат на строительство. Это обусловлено тем, что в осваиваемых районах мало крупно скелетных грунтов, позволяющих создавать подсыпки для поверхностных фундаментов. В итоге большинство зданий возводится на свайных фундаментах значительно удлиняющих сроки строительства и его стоимость. Во избежание оттаивания многолетнемерзлых грунтов и разрушения зданий под ними устраиваются вентилируемые подполья, что исключает передачу на пол здания больших нагрузок, увеличивает материалоемкость конструкции и затраты на обогрев помещений. В качестве материала свай и элементов перекрытия подполья используется металл, который, как правило, доставляется по воздуху и является дефицитным товаром. Кроме того, установка свай занимает много времени и связана с экологическими нарушениями природных условий.

Наши усилия были направлены на то, чтобы ликвидировать отмеченные недостатки в фундаментостроении. В результате в 2015 г. была разработана конструкция и метод расчета поверхностного фундамента, не требующего подсыпок из крупно скелетного грунта, надежно обеспечивающего мерзлое состояние грунтов основания и обогрев здания с малыми энергетическими затратами в течение всего периода его эксплуатации [Хрусталев и др., 2016]. Указанное достоинство конструкции было достигнуто путем ее совмещения с тепловым насосом (ТН).

Фундамент, совмещенный с ТН, представляет собой железобетонную плиту, состоящую из двух частей (рис. 4.2). В верхней части находится змеевик греющего контура ТН, в нижней – охлаждающего контура. Между контурами имеется теплоизолятор из пеноплекса с тер

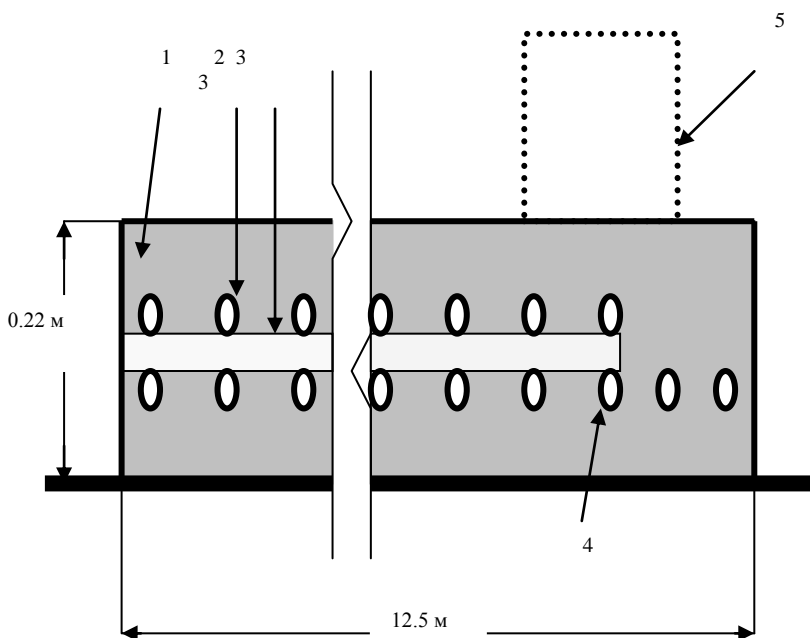


Рис. 4.2 Продольный разрез фундаментного модуля.

1 – железобетонный корпус фундамента; 2 – змеевик греющего контура ТН; 3 – теплоизолятор (пеноплэкс); 4 – змеевик охлаждающего контура ТН; 5 – место расположения наружной стены здания.

мическим сопротивлением  $R_b$ . Контура заполнены жидкостью, верхний – водой с температурой  $t_1$ ; нижний – антифризом с температурой  $t_2$ . Верхний змеевик обеспечивает обогрев пола первого этажа здания, нижний – искусственное охлаждение основания. При этом змеевик охлаждающего контура заходит за наружную стену здания на два витка, этим исключается оттаивание грунта основания под краем здания в летнее время. Описанный фундамент одновременно выполняет три функции: первая, передает нагрузку от здания на основание; вторая, понижает (стабилизирует) температуру многолетнемерзлого грунта в основании здания и тем увеличивает надежность основания и, третья, поддерживает необходимую положительную температуру воздуха в помещениях здания.

Фундамент состоит из отдельных модулей, которые на стройплощадке стыкуются между собой с помощью закладных деталей на сварке и

подсоединяются к ТН параллельно (рис. 4.3). При параллельном подсоединении модулей гидравлические потери в контурах минимальны. Фундамент устанавливается на многолетнемерзлый грунт во второй половине зимы после промерзания слоя сезонного оттаивания. Торцевые стороны фундамента обваловываются местным грунтом. Модули фундамента рекомендуется изготавливать на месте в летнее время и зимой на санях перемещать к месту установки. Показанный на рис 4.2 фундамент разработан для Арктики и работает постоянно, поскольку отопительный сезон в большинстве районов Арктики длится

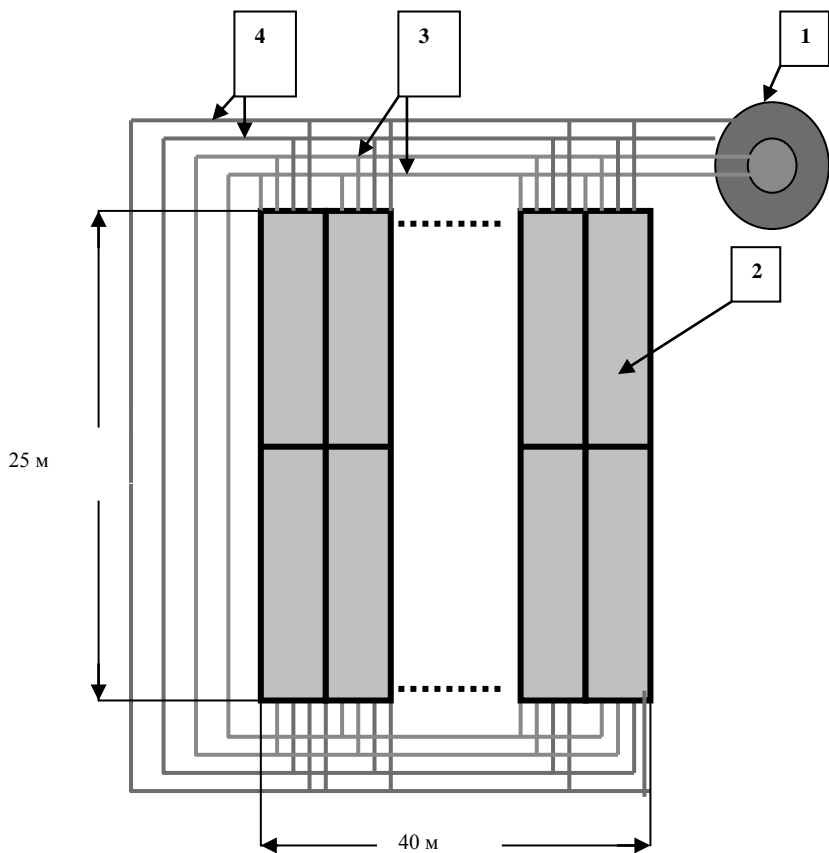


Рис. 4.3 Схема подключения фундаментных модулей к ТН.  
 1 – тепловой насос; 2 – фундаментный модуль; 3 – коллектор греющего контура теплового насоса; 4 – коллектор охлаждающего контура теплового насоса.



круглый год. Этот фундамент круглый год обеспечивает отопление здания и искусственное охлаждение его основания.

Когда отопительный период длится не полный год, предлагается модифицированная конструкция фундамента, продольный разрез модуля которого показан на рис. 4.4 [Хрусталеv, Хилимонюк, 2018] Фундаментный модуль такой конструкции состоит из нижнего короба, внутри которого размещен змеевик охлаждающего контура ТН и залита жидкость, замерзающая (оттаивающая) при отрицательной температуре (водный раствор диэтиленгликоля). Во избежание переохлаждения основания в качестве температуры замерзания –оттаивания жидкости назначается среднегодовая температура грунта на подошве слоя сезонного оттаивания в естественных условиях. Во избежание разрыва короба при замерзании жидкости ее объем принимается меньше объема короба на величину расширения жидкости при замерзании. Нижний короб имеет съемную крышку, поверх которой размещен верхний короб со змеевиком греющего контура теплового насоса. Змеевик положен на слой тепло изоляции, которая размещена на крышке нижнего короба. Фундаментный модуль устанавливается непосредственно на мерзлый грунт. Фундаментные модули, в совокупности образующие поверхностный фундамент, подсоединяются параллельно к теплоизолированному коллектору охлаждающего контура и теплоизолированному коллектору греющего контура ТН.

Работает устройство следующим образом. С началом отопительного сезона тепловой насос включается в работу. При этом происходит обогрев полов здания змеевиком греющего контура и замораживание жидкости в нижнем коробе змеевиком охлаждающего контура. При замерзании жидкости температура во всем объеме нижнего короба поддерживается постоянной и равной температуре фазового перехода  $t_{bf}$ , которая, в свою очередь, равна температуре грунта в естественных условиях. Поэтому переохлаждения грунта не происходит. Мощность теплового насоса назначена таким образом, что замораживание жидкости длится весь отопительный сезон, следовательно, весь отопительный сезон на подошве поверхностного фундамента поддерживается естественная температура грунта. По окончании отопительного сезона тепловой насос отключается. Под действием тепла от здания происходит оттаивание льда в нижнем коробе. При этом температура во всем объеме нижнего короба поддерживается также постоянной и равной температуре фазового перехода  $t_{bf}$  жидкости, которая, в свою очередь, равна температуре грунта в естественных условиях. Оттаивание длится до начала нового отопительного сезона. Таким образом, в течение

ние года температура грунта на подошве поверхностного фундамента постоянна и равна температуре грунта в естественных условиях. Поэтому в течение года в основание не пропускается ни импульс холода, ни импульс тепла, которые могут вызвать деформации основания.

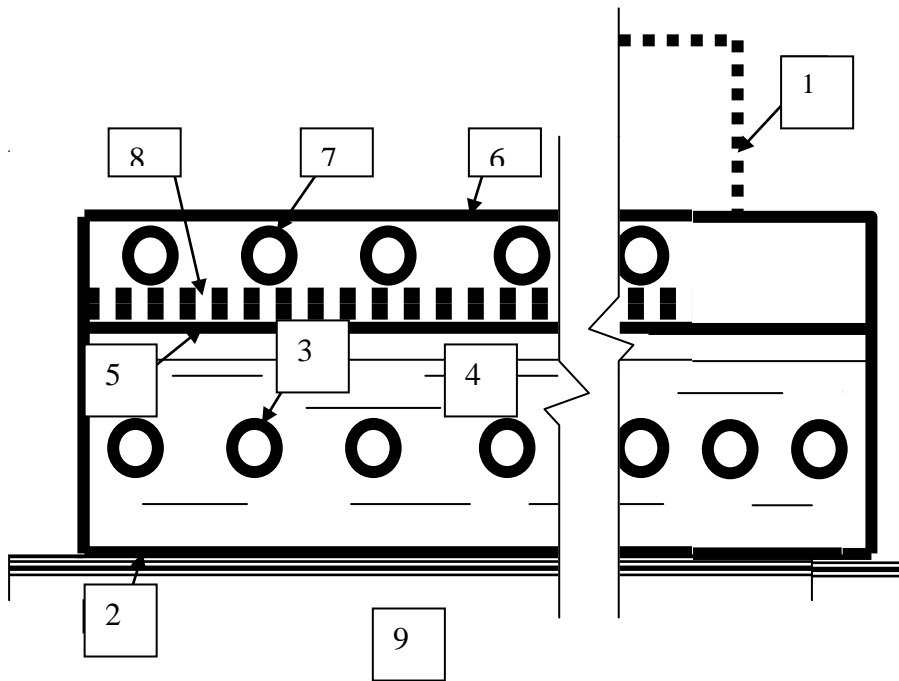


Рис. 4.4 Продольный разрез фундаментного модуля.

1- место расположения наружной стены здания; 2 – нижний короб; 3 – змеевик охлаждающего контура ТН; 4 – жидкость, замерзающая при отрицательной температуре; 5 - съемная крышка нижнего короба; 6 – верхний короб; 7 – змеевик греющего контура ТН; 8 – слой теплоизоляции; 9 – многолетнемерзлый грунт.

Далее до конца периода эксплуатации здания годовые циклы промерзания – оттаивания жидкости в нижнем коробе повторяются.

### 4.3 Использование тепловых насосов в конструкции нефтяных резервуаров

В настоящее время существуют два способа возведения резервуаров на многолетнемерзлых грунтах. На свайном фундаменте с устройством вентилируемого подполья и на поверхностном фундаменте в виде железобетонной плиты, укладываемой на подсыпку из крупноскелетного материала, в теле которой устраивается трубчатая охлаждающая система, вентилируемая наружным воздухом с помощью естественного или искусственного побуждения. Второй способ значительно дешевле первого при наличии на месте строительства карьеров крупноскелетного грунта. Однако в Арктике такие условия встречаются крайне редко, поэтому здесь основной тип фундамента – свайный. Применение ТН в конструкции фундаментов позволяет отказаться от свай и перейти на поверхностный фундамент, конструкция которого описана выше. Этот фундамент устанавливается на подсыпку из любого грунта, утраиваемого под резервуаром и вокруг него (обваловка) из соображений локализации аварийного разлива нефти. Единственным условием такого строительства является требование о том, чтобы сама подсыпка и подстилающее ее основание должны быть мерзлыми. На рис. 4.5 показан схематический разрез такой конструкции.

Итак, фундамент представляет собой железобетонную плиту, в верхней части которой находится змеевик греющего контура ТН, в нижней – охлаждающего контура. Между контурами имеется теплоизолятор из пеноплекса с термическим сопротивлением  $R_b$ . Контура заполнены жидкостью, верхний – водой со средней температурой  $t_1$ ; нижний – антифризом со средней температурой  $t_2$ . Описанный фундамент одновременно выполняет три функции: передает нагрузку от резервуара с нефтью на основание, понижает температуру многолетнемерзлого грунта в основании резервуара и тем увеличивает надежность основания и поддерживает положительную температуру нефти в резервуаре не ниже температуры  $t_d$ , при которой еще возможно ее перекачивание.

С одной стороны количество перекачиваемого тепла в резервуар во многом зависит от величины термического сопротивления теплоизоляции между контурами ТН  $R_b$ , с другой стороны потери тепла из резервуара – от термического сопротивления изоляции, покрывающей боковую поверхность и крышу резервуара  $R_{air}$ . Эти две величины жестко связаны между собой, ибо потери тепла всегда должны быть равны его поступлению. Возникает оптимизационная задача, из реше-

ния которой находим величину  $R_{air}$  и  $R_b$ . При этом термическое сопротивление

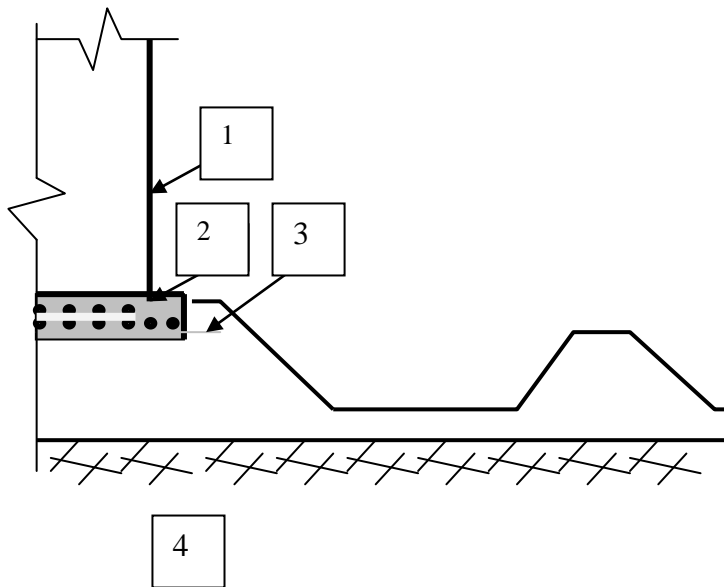


Рис 4.5 Схематический разрез нефтяного резервуара на поверхностном фундаменте, совмещенным с ТН.

- 1 – нефтяной резервуар; 2 – поверхностный фундамент, совмещенный с ТН; 3 – подсыпка;
- 4 – многолетнемерзлое основание.

$R_b$  должно обеспечивать такую величину теплового потока, при которой температура нефти в наиболее холодный месяц года будет равна  $t_d$  при заданном значении  $R_{air}$ .

Оптимизационная задача формулируется следующим образом:

$$C_{ins} + C_{pw} \rightarrow \min, \quad (4.3)$$

где  $C_{ins}$  – стоимость теплоизоляции резервуара, включая изоляцию в фундаментной плите;  $C_{pw}$  – стоимость затраченной энергии на работу ТН.

Проведенные расчеты показали, что использование ТН при строительстве фундаментов нефтяных резервуаров на многолетнемерзлых грунтах технически целесообразно, ибо ТН, совмещенный с фундаментной плитой, одновременно обеспечивает сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии и подогрев нефти в течение всего года за счет низкопотенциального тепла, отбираемого от мерзлого грунта, и утилизации тепловых потерь компрессора ТН. Использование ТН в конструкции нефтяного резервуара позволяет при его строительстве отказаться от дорогостоящих свайных фундаментов и без потерь надежности основания перейти на поверхностные фундаменты и тем сократить сроки строительства и уменьшить трудоемкость строительных работ.

Строительные работы ведутся в зимний период после промерзания слоя сезонного оттаивания. Вначале возводится подсыпка из талого грунта, который послойно промораживается, и на ней железобетонная фундаментная плита, включающая контура теплового насоса и теплоизолятор. На фундаментной плите монтируется резервуар, боковая поверхность и крыша которого покрываются теплоизолятором. По завершению этих работ к контурам подключается тепловой насос.

#### 4.4 Расчет теплового насоса

Энергетическая схема работы ТН показана на рис. 4.6. Как следует из схемы, тепло для отопления здания или нагревания нефти забирается из грунта  $Q_3$  охлаждающим контуром ТН, одновременно с ним к охлаждающему контуру поступает тепло от греющего контура ТН  $Q_2$ . Эти потоки подаются в холодильную машину ТН, где низкопотенциальное тепло преобразуется в высокопотенциальное [Освоение..., 2012] и, при этом к нему добавляются потери энергии компрессором холодильной машины, равные  $\frac{Q_2 + Q_3}{COP - 1}$ . Далее эти потоки теп-

ла поступают к греющему контуру ТН, от которого часть из них направляется к зданию  $Q_1$  и идет на обогрев пола, а часть  $Q_2$  возвращается в охлаждающий контур. Далее цикл повторяется. Управление тепловыми потоками осуществляется следующими параметрами: температурой воды в греющем и антифриза в охлаждающем контурах ТН ( $t_1$  и  $t_2$ ) и термическим сопротивлением между контурами  $R_b$ . При этом, указанные параметры должны быть подобраны таким образом, чтобы  $Q_1$  была не более величины:  $Q_3 + (Q_2 + Q_3)/COP$  и не менее величины 50 Вт

на 1 кв. м пола здания в наиболее холодную пятидневку, а для нефтяного резервуара, чтобы температура нефти в резервуаре не опустилась ниже температуры, при которой возможна ее перекачка  $t_d$ .

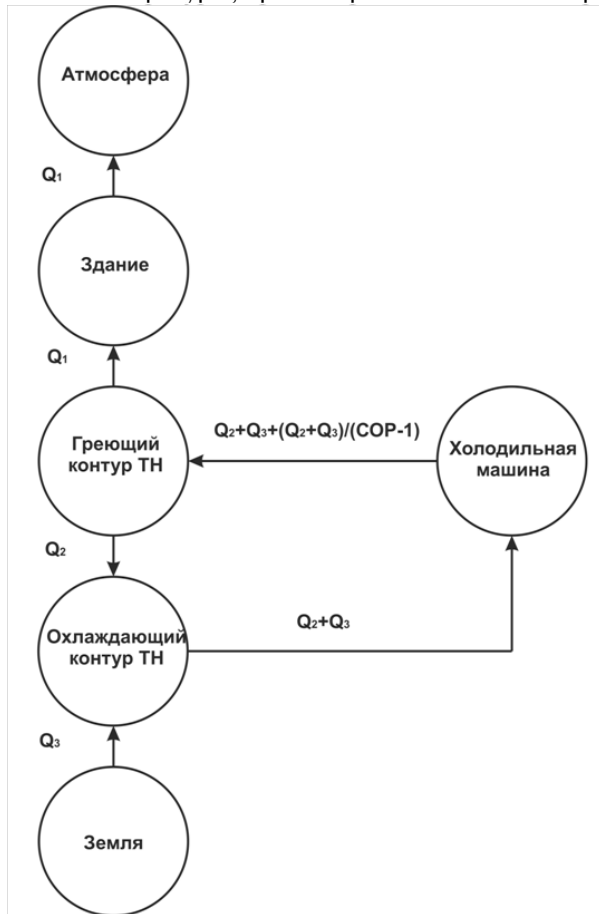


Рис. 4.6 Схема теплопередачи теплового насоса, совмещенного с поверхностным фундаментом.

Условные обозначения:  $Q_1$  – интенсивность теплового потока от греющего контура к зданию и от здания в атмосферу, Вт;  $Q_2$  – то же от греющего контура к охлаждающему;  $Q_3$  – то же от многолетнемерзлого грунта к охлаждающему контуру; COP – коэффициент трансформации энергии.

Тепловые потоки  $Q_1, Q_2$  и  $Q_3$  находятся из решения задачи Стефана методом математического моделирования по любой из известных компьютерных программ, разработанной для этой цели. Что касается коэффициента трансформации энергии COP, то он вычисляется по формуле (4.2), где согласно [Новиков, 1984] значения параметров принимается:  $\eta = 0.5$ ;  $T_{\text{кон}} = t_1 + 0.5\Delta t + 273$ ,  $T_{\text{кит}} = t_2 - 0.5\Delta t + 273$

( $\Delta t$  – разность температуры жидкости на входе и выходе из греющего и охлаждающего контура, принимается 6 °С).

Для выбора ТН необходимо знать его тепловую и электрическую мощность, а также необходимые расходы жидкости в греющем и охлаждающем контурах и потерю гидравлического давления в них. Первые три параметра вычисляются по формулам:

$$N_T = (Q_2 + Q_3) \frac{COP}{COP - 1}, \quad (4.4)$$

$$N_{\text{э}} = \frac{Q_2 + Q_3}{COP - 1}, \quad (4.5)$$

где  $N_T, N_{\text{э}}$  – номинальная тепловая мощность и потребная электрическая мощность, Вт.

$$W_{1,2} = \frac{N_T}{C_{1,2} \cdot \Delta t}, \quad (4.6)$$

где  $W_1, W_2$  – расход жидкости, соответственно, в греющем и охлаждающем контурах, м<sup>3</sup>/ч;

$C_1, C_2$  – теплоемкость жидкости, соответственно, в греющем и охлаждающем контурах, Вт·ч/(м<sup>3</sup>·°С).

Последний (потери давления в контурах) определяется гидравлическим расчетом, который осуществляется по общеизвестным формулам. Эти формулы можно найти в любом справочнике по гидравлик. Поясним сказанное примером расчета.

*Пример расчета.*

Исходные данные: Одноэтажное каркасное общественное здание на многолетнемерзлых грунтах с охлаждающей системой и обогревающими полами с помощью теплового насоса (ТН). Срок эксплуатации здания 25 лет. Размер здания в плане 25×40 м, площадь  $S = 1000 \text{ м}^2$ . Фундамент для такого здания будет состоять из 26 фундаментных модулей размером в плане 3,1×12,5 м, площадь модуля  $S_M = 38,75 \text{ м}^2$ . Температура в здании  $t_{\text{in}} = 20^\circ\text{С}$ . Интенсивность максимальных теплотерь здания в отопительный период – 50 кВт. Продолжительность отопительного периода 12 месяцев ( 8760 ч.) Температура подстилающих многолетнемерзлых грунтов  $t_0 = -5,5^\circ\text{С}$ . Фундаментный модуль представляет собой железобетонную плиту (рис. 4.2) со встроенными греющими и охлаждающими контурами теплового насоса (ТН) в виде системы змеевиков из полиэтиленовых труб, расположенных с шагом  $h = 0,15 \text{ м}$ . Наружный диаметр труб  $d_{\text{out}} = 0,06 \text{ м}$ , внутренний  $d_{\text{in}} = 0,054$

м. Длина труб греющего или охлаждающего контура одного фундаментного модуля 251 м, включая 38 поворотов на 90°. Между контурами расположен теплоизолятор с термическим сопротивлением  $R_b = 0,278 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

В плане фундаментные модули расположены в два ряда и параллельно подключены к ТН с помощью двух коллекторов (рис. 4.3). Длина каждого коллектора 220 м, включая 4 поворота на 90°. Наружный диаметр коллектора  $d_{out}^k = 0,0885 \text{ м}$ , внутренний  $d_{in}^k = 0,0805 \text{ м}$ . Греющий контур использует воду, охлаждающий – антифриз (20 % водный раствор этиленгликоля, который замерзает при температуре ниже температуры его охлаждения в испарителе ТН). Средняя температура жидкости в контурах принята  $t_1 = 40 \text{ °C}$ ,  $t_2 = -10 \text{ °C}$ . Объемная теплоемкость воды  $1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ , антифриза  $C_2 = 1111 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ . Кинематическая вязкость воды при температуре  $40 \text{ °C}$   $\eta = 0,658 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , то же 20 % водного раствора этиленгликоля при температуре минус  $10 \text{ °C}$   $\eta = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Эквивалентная шероховатость полимерной трубы  $\Delta = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Климатические и грунтовые условия соответствуют району пос. Сабетта полуострова Ямал.

#### Тепловой расчет ТН.

*Шаг 1.* Вначале производим расчет тепловых потоков  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$ . Он осуществляется методом математического моделирования теплового взаимодействия фундамента со зданием и подстилающим многолетнемерзлым грунтом. В табл. 4.2 приводятся результаты расчета по программе QFrost [Песоцкий, 2016].

Таблица 4.2

**Результаты математического моделирования теплового взаимодействия поверхностного фундамента со зданием и подстилающим многолетнемерзлым грунтом**

| $\tau$ , лет | $t_1, \text{°C}$ | $t_2, \text{°C}$ | $R_b$ ,<br>$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ | $Q_1$ , кВт | $Q_2$ , кВт | $Q_3$ , кВт |
|--------------|------------------|------------------|---|-------------|-------------|-------------|
| 25           | 40               | -10              | 0.278   | 67.94       | 128.57      | 2.58        |

*Условные обозначения:*  $\tau$  - время работы теплового насоса, лет;  $t_1$  – температура воды в греющем контуре,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2$  – температура антифриза в охлаждающем контуре,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_b$  – термическое сопротивление между контурами,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ;  $Q_1$  - поток тепла в здание, кВт;  $Q_2$  – поток тепла от греющего контура, кВт;  $Q_3$  – поток тепла из грунта, кВт.



Из данных таблицы 4.2 следует, что подача тепла ТН на небольшую величину превышает необходимый для данного здания минимум 50 кВт, что свидетельствует о правильности подобранных управляющих параметров  $t_1, t_2$  и  $R_b$ .

*Шаг 2.* Далее определяем необходимые температуры кипения и конденсации хладагента во внутреннем контуре ТН:  $T_{кин} = -10 - 0,5 \cdot 6 + 273 = 260$  град;  $T_{кон} = 40 + 0,5 \cdot 6 + 273 = 316$  град. Затем по формуле (4.2) находим коэффициент трансформации

$$\text{тепловой энергии } COP = 0,5 \cdot \frac{316}{316 - 260} = 2,82$$

*Шаг 3.* Производим проверку точности, проведенного математического моделирования, для чего сравниваем количество тепла, поступающего в греющий контур от холодильной машины с количеством тепла, уходящего из греющего контура на обогрев здания и в охлаждающий контур, т.е.

$$Q_2 + Q_3 + \frac{Q_2 + Q_3}{COP - 1} = Q_1 + Q_2. \text{ В нашем случае имеем:}$$

203,2 кВт  $\approx$  196 кВт. Расхождение составляет 3,4 %, что допустимо.

*Шаг 4.* По формуле (4.4) определяем номинальную тепловую мощность ТН, а по формуле (4.5) – его электрическую мощность:

$$N_T = (128,57 + 2,58) \cdot 2,82 / (2,82 - 1) = 203,2 \text{ кВт};$$

$$N_3 = (128,57 + 2,58) / (2,82 - 1) = 72,1 \text{ кВт}.$$

*Шаг 5.* По формуле (4.6) определяем расход теплоносителя в греющем

и охлаждающем контурах ТН:  $W_1 = \frac{203,2 \cdot 10^3}{1000 \cdot 6} = 33,87 \text{ м}^3/\text{ч};$

$$W_2 = \frac{203,2 \cdot 10^3}{1111 \cdot 6} = 30,48 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

#### Гидравлический расчет ТН.

Целью расчета является определение потери давления воды  $h_1$  и антифриза  $h_2$  в греющем и охлаждающем контурах ТН. Расчет осуществляем по общеизвестным формулам [Справочник, 1972]. Вначале рассчитываем греющий контур, затем охлаждающий.

*Расчет потерь напора в змеевике одного фундаментного модуля греющего контура.*

*Шаг 1.* Определяем расход воды в трубах змеевика фундаментного модуля:

$$W_1^{\text{ф.м}} = W_1 / m = 33,87 / 26 = 1,303 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ (} m \text{ – количество модулей)}.$$

Шаг 2. Определяем скорость воды в трубах змеевика:

$$V_1^{\text{ф.м}} = \frac{4 \cdot W_1^{\text{ф.м}}}{3600 \cdot \pi \cdot d_{in}^2} = \frac{4 \cdot 1,303}{3600 \cdot \pi \cdot 0.054^2} = 0.158 \text{ м/с.}$$

Шаг 3. Определяем потери напора в змеевике одного фундаментного модуля греющего контура. Предварительно находим следующие безразмерные параметры:

$$\text{Число Рейнольдса } Re = \frac{V \cdot d_{in}}{\eta} = \frac{0.158 \cdot 0.054}{0.658 \cdot 10^{-6}} = 12970 ;$$

$$\frac{d_{in}}{\Delta} = \frac{0.054}{0.000005} = 10800$$

В нашем случае число Рейнольдса находится в интервале

$4000 < Re < 10 \frac{d_{in}}{\Delta}$ , поэтому коэффициент гидравлического трения опре-

деляем по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} = \frac{0.3164}{12970^{0.25}} = 0.0296.$$

Определяем потери напора по длине:

$$h_L = \lambda \cdot \frac{L}{d_{in}} \cdot \frac{(V_1^{\text{ф.м}})^2}{2g} = 0.0296 \cdot \frac{251}{0.054} \cdot \frac{0.158^2}{2 \cdot 9.81} = 0.175 \text{ м.}$$

Определяем местные потери напора:

$$h_{\xi} = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 \cdot n) \cdot \frac{V^2}{2g} = (0.5 + 0.64 + 1.32 \cdot 38) \cdot \frac{0.189^2}{2 \cdot 9.81} = 0.0934$$

м. ( $\xi_{1,2,3}$  - коэффициент потерь напора на входе, выходе и повороте потока на  $90^\circ$ ,  $n$  - число поворотов)

Суммарные потери напора будут:

$$h_{\Sigma} = h_L + h_{\xi} = 0.175 + 0.0934 = 0.268 \text{ м.}$$

*Расчет потерь напора в коллекторе греющего контура.*

Гидравлический расчет коллектора производим в той же последовательности, что и расчет змеевика фундаментного модуля. При этом имеем в виду, что расход на каждом участке коллектора при параллельном присоединении фундаментных модулей будет разный. А именно на подающей ветви коллектора он будет уменьшаться после каждого присоединения к змеевику модуля на величину расхода в змеевике, а на отводящей ветви – возрастать на ту же величину. Число

участков соответствует числу фундаментальных модулей. В нашем случае 26. В связи с большим количеством участков расчет производим в табличной форме (таб. 4.3) с помощью электронных таблиц Excel.

Из данных таб. 4.3 следует, что потери напора по длине в коллекторе греющего контура составят  $h_L^k = 2.452$  м.в.ст. Кроме того, коллектор имеет 4 поворота на  $90^\circ$  (два на подающей ветви коллектора и два на отводящей). Повороты осуществляются на 14-ом участке, где скорость воды составляет 0.924 м/с, тогда местные потери давления в

коллекторе будут:  $h_{\xi}^k = (0.5 + 0.64 + 4 \cdot 1.32) \cdot \frac{0.924^2}{2 \cdot 9.81} = 0.279$  м и

общие потери давления в коллекторе:  $h_{\Sigma,k} = 2.452 + 0.279 = 2.731$  м

в.ст.

*Общие потери напора в греющем контуре при параллельном присоединении фундаментальных модулей вычисляется по формуле:*

$$H_{\Sigma,k} = \left( \sum_{i=1}^{26} h_{\Sigma}^{-0.5} \right)^{-2} + h_{\Sigma,k} = (26 \cdot \sqrt{0.268})^{-2} + 2.731 = 2.73652 \text{ м в.ст.}$$

Таблица 4.3

**Определение потерь напора по длине коллектора греющего контура**

| NN<br>уч-ков | $W_1^k, \text{ м}^3/\text{ч}$ | L, м  | $V_1^k, \text{ м/с}$ | Re, б.р. | $\lambda, \text{ б.р.}$ | $h_L, \text{ м}$ |
|--------------|-------------------------------|-------|----------------------|----------|-------------------------|------------------|
| 1            | 33,87                         | 10,00 | 1,849                | 226151,8 | 0,014509                | 0,313907         |
| 2            | 32,567                        | 6,15  | 1,77743              | 217451,6 | 0,014652                | 0,180244         |
| 3            | 31,264                        | 6,15  | 1,706316             | 208751,4 | 0,014802                | 0,167814         |
| 4            | 29,961                        | 6,15  | 1,635201             | 200051,2 | 0,014961                | 0,155766         |
| 5            | 28,658                        | 6,15  | 1,564086             | 191351   | 0,015128                | 0,144105         |
| 6            | 27,355                        | 6,15  | 1,492972             | 182650,8 | 0,015305                | 0,132836         |
| 7            | 26,052                        | 6,15  | 1,421857             | 173950,6 | 0,015493                | 0,121961         |
| 8            | 24,749                        | 6,15  | 1,350742             | 165250,4 | 0,015693                | 0,111487         |
| 9            | 23,446                        | 6,15  | 1,279628             | 156550,2 | 0,015906                | 0,101419         |
| 10           | 22,143                        | 6,15  | 1,208513             | 147850   | 0,016135                | 0,091762         |
| 11           | 20,84                         | 6,15  | 1,137398             | 139149,8 | 0,016382                | 0,082522         |
| 12           | 19,537                        | 6,15  | 1,066284             | 130449,6 | 0,016649                | 0,073706         |
| 13           | 18,234                        | 6,15  | 0,995169             | 121749,4 | 0,016938                | 0,06532          |
| 14           | 16,931                        | 50    | 0,924054             | 113049,2 | 0,017255                | 0,466433         |
| 15           | 15,628                        | 6,15  | 0,85294              | 104349   | 0,017604                | 0,049869         |
| 16           | 14,325                        | 6,15  | 0,781825             | 95648,79 | 0,017991                | 0,042822         |
| 17           | 13,022                        | 6,15  | 0,71071              | 86948,59 | 0,018426                | 0,03624          |
| 18           | 11,719                        | 6,15  | 0,639595             | 78248,38 | 0,018918                | 0,030134         |

| NN<br>уч-ков | $W_1^k, \text{ м}^3/\text{ч}$ | $L, \text{ м}$ | $V_1^k, \text{ м/с}$ | Re, б.р. | $\lambda, \text{ б.р.}$ | $h_{L, \text{ м}}$ |
|--------------|-------------------------------|----------------|----------------------|----------|-------------------------|--------------------|
| 19           | 10,416                        | 6,15           | 0,568481             | 69548,18 | 0,019483                | 0,024518           |
| 20           | 9,113                         | 6,15           | 0,497366             | 60847,98 | 0,020145                | 0,019405           |
| 21           | 7,81                          | 6,15           | 0,426251             | 52147,78 | 0,020938                | 0,014813           |
| 22           | 6,507                         | 6,15           | 0,355137             | 43447,58 | 0,021915                | 0,010763           |
| 23           | 5,204                         | 6,15           | 0,284022             | 34747,38 | 0,023174                | 0,007279           |
| 24           | 3,901                         | 6,15           | 0,212907             | 26047,18 | 0,024906                | 0,004396           |
| 25           | 2,598                         | 6,15           | 0,141793             | 17346,98 | 0,02757                 | 0,002158           |
| 26           | 1,295                         | 6,15           | 0,070678             | 8646,784 | 0,032811                | 0,000638           |
|              |                               |                |                      |          | сумма                   | <b>2,452319</b>    |

*Расчет потерь напора в змеевике одного фундаментного модуля охлаждающего контура.*

*Шаг 1.* Определяем расход воды в трубах змеевика фундаментного модуля:

$$W_2^{\text{ф.м}} = W_2 / m = 30.48 / 26 = 1.172 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (m - \text{количество модулей}).$$

*Шаг 2.* Определяем скорость воды в трубах змеевика:

$$V_2^{\text{ф.м}} = \frac{4 \cdot W_2^{\text{ф.м}}}{3600 \cdot \pi \cdot d_{in}^2} = \frac{4 \cdot 1.172}{3600 \cdot \pi \cdot 0.054^2} = 0.142 \text{ м/с}.$$

*Шаг 3.* Определяем потери напора в змеевике одного фундаментного модуля греющего контура. Предварительно находим следующие безразмерные параметры:

$$\text{Число Рейнольдса } Re = \frac{V_2^{\text{ф.м}} \cdot d_{in}}{\eta} = \frac{0.142 \cdot 0.054}{5 \cdot 10^{-6}} = 1534;$$

В нашем случае число Рейнольдса находится в интервале  $Re < 2300$ , поэтому коэффициент гидравлического трения определяем по формуле для ламинарного движения жидкости:

$$\lambda = \frac{0.64}{Re} = \frac{0.64}{1534} = 0.0417.$$

Определяем потери напора по длине:

$$h_L = \lambda \cdot \frac{L}{d_{in}} \cdot \frac{(V_2^{\text{ф.м}})^2}{2g} = 0.0417 \cdot \frac{251}{0.054} \cdot \frac{0.142^2}{2 \cdot 9.81} = 0.199 \text{ м}.$$

Определяем местные потери напора:

$$h_{\xi} = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 \cdot n) \cdot \frac{V^2}{2g} = (0.5 + 0.64 + 1.32 \cdot 38) \cdot \frac{0.142^2}{2 \cdot 9.81} = 0.053 \text{ м}.$$

Суммарные потери напора будут:

$$h_{\Sigma} = h_L + h_{\xi} = 0.199 + 0.0527 = 0.252 \text{ м.}$$

*Расчет потерь напора в коллекторе охлаждающего контура.*

Гидравлический расчет коллектора производим в той же последовательности, что и расчет змеевика фундаментного модуля. При этом имеем в виду, что расход на каждом участке коллектора при параллельном присоединении фундаментных модулей будет разный. А именно на подающей ветви коллектора он будет уменьшаться после каждого присоединения к змеевику модуля на величину расхода в змеевике, а на отводящей ветви – возрастать на ту же величину. Число участков соответствует числу фундаментных модулей. В нашем случае 26. В связи с большим количеством участков расчет производим в табличной форме (таб. 4.4) с помощью электронных таблиц Excel.

Из данных таб. 4.4 следует, что потери напора по длине в коллекторе охлаждающего контура составят  $h_L^k = 4.525$  м.в.ст. Кроме того, коллектор имеет 4 поворота на  $90^0$  (два на подающей ветви коллектора и два на отводящей). Повороты осуществляются на 14-ом участке, где скорость воды составляет 0.924 м/с, тогда местные потери давления в коллекторе будут:

$$h_{\xi}^k = (0.5 + 0.64 + 4 \cdot 1.32) \cdot \frac{0.924^2}{2 \cdot 9.81} = 0.279 \text{ м}$$

и общие потери давления в коллекторе:  $h_{\Sigma,k} = 4.525 + 0.279 = 4.804$  м в.ст.

*Общие потери напора в охлаждающем контуре при параллельном присоединении фундаментных модулей вычисляется по формуле:*

$$: H_{o.k.} = \left( \sum_{i=1}^{26} h_{\Sigma}^{-0.5} \right)^{-2} + h_{\Sigma,k} = (26 \cdot \sqrt{0.252})^{-2} + 4.804 = 4.81 \text{ м в.ст.}$$

Таблица 4.4

**Определение потерь напора по длине коллектора охлаждающего контура**

| NN уч-ков | $W_1^k, \text{ м}^3/\text{ч}$ | $L, \text{ м}$ | $V_1^k, \text{ м/с}$ | Re, б.р. | $\lambda, \text{ б.р.}$ | $h_{L, \text{ м}}$ |
|-----------|-------------------------------|----------------|----------------------|----------|-------------------------|--------------------|
| 1         | 33,87                         | 10             | 1,848545             | 29761,58 | 0,024089                | 0,52118            |
| 2         | 32,698                        | 6,15           | 1,78458              | 28731,74 | 0,024302                | 0,301369           |
| 3         | 31,526                        | 6,15           | 1,720615             | 27701,9  | 0,024525                | 0,28272            |
| 4         | 30,354                        | 6,15           | 1,65665              | 26672,07 | 0,024758                | 0,264584           |
| 5         | 29,182                        | 6,15           | 1,592685             | 25642,23 | 0,025003                | 0,246966           |
| 6         | 28,01                         | 6,15           | 1,52872              | 24612,39 | 0,025261                | 0,229871           |
| 7         | 26,838                        | 6,15           | 1,464755             | 23582,56 | 0,025532                | 0,213304           |
| 8         | 25,666                        | 6,15           | 1,40079              | 22552,72 | 0,025819                | 0,197271           |

| NN уч-ков | $W_1^k, \text{ м}^3/\text{ч}$ | L, м | $V_1^k, \text{ м/с}$ | Re, б.п. | $\lambda, \text{ б.п.}$ | $h_{f,} \text{ м}$ |
|-----------|-------------------------------|------|----------------------|----------|-------------------------|--------------------|
| 9         | 24,494                        | 6,15 | 1,336825             | 21522,88 | 0,026122                | 0,181778           |
| 10        | 23,322                        | 6,15 | 1,27286              | 20493,05 | 0,026444                | 0,166831           |
| 11        | 22,15                         | 6,15 | 1,208895             | 19463,21 | 0,026788                | 0,152437           |
| 12        | 20,978                        | 6,15 | 1,14493              | 18433,37 | 0,027154                | 0,138603           |
| 13        | 19,806                        | 6,15 | 1,080965             | 17403,54 | 0,027547                | 0,125337           |
| 14        | 18,634                        | 50   | 1,017                | 16373,7  | 0,02797                 | 0,915834           |
| 15        | 17,462                        | 6,15 | 0,953035             | 15343,86 | 0,028428                | 0,100543           |
| 16        | 16,29                         | 6,15 | 0,88907              | 14314,03 | 0,028927                | 0,089032           |
| 17        | 15,118                        | 6,15 | 0,825105             | 13284,19 | 0,029472                | 0,078127           |
| 18        | 13,946                        | 6,15 | 0,76114              | 12254,35 | 0,030072                | 0,067838           |
| 19        | 12,774                        | 6,15 | 0,697175             | 11224,52 | 0,030739                | 0,058178           |
| 20        | 11,602                        | 6,15 | 0,63321              | 10194,68 | 0,031488                | 0,049161           |
| 21        | 10,43                         | 6,15 | 0,569245             | 9164,843 | 0,032337                | 0,040802           |
| 22        | 9,258                         | 6,15 | 0,50528              | 8135,006 | 0,033316                | 0,03312            |
| 23        | 8,086                         | 6,15 | 0,441315             | 7105,17  | 0,034462                | 0,026135           |
| 24        | 6,914                         | 6,15 | 0,37735              | 6075,333 | 0,035838                | 0,019871           |
| 25        | 5,742                         | 6,15 | 0,313385             | 5045,496 | 0,037541                | 0,014356           |
| 26        | 4,57                          | 6,15 | 0,24942              | 4015,66  | 0,039746                | 0,009628           |
|           |                               |      |                      |          | сумма                   | <b>4,524877</b>    |

*Ответ.* На основе проведенного расчета составляем требования для выбора теплового насоса. Последний подбирается из каталога по следующим параметрам:

номинальная тепловая мощность: 203.2 кВт,

потребляемая электрическая мощность: 72.1 кВт,

расход воды в греющем контуре: 33.87 м<sup>3</sup>/ч,

потеря давления в греющем контуре: 2.74 м. водяного столба,

расход антифриза в охлаждающем контуре: 30.48 м<sup>3</sup>/ч,

потеря давления в охлаждающем контуре: 4.81 м. водяного столба.

# **Глава 5. Использование льда для строительства стационарных буровых платформ на шельфе арктических морей**

## **5.1 Шельф арктических морей – кладовая углеводородов, ледостойкие стационарные платформы для бурения на нефть и газ**

Под континентальным шельфом понимается прибрежная зона морей от береговой линии до материкового склона, ширина которой обычно составляет около 200 км. По последним оценкам на шельфе находится примерно 70 % всех углеводородов Земного шара. Этим объясняется большой интерес, который в настоящее время проявляется всеми странами к его хозяйственному освоению. В России этот интерес сосредоточен на освоении шельфа арктических морей: Баренцева, Белого, Карского, Лаптевых, Восточно - Сибирского и Чукотского.

Главное отличие арктического шельфа от остальных – наличие льда, надводного и подводного. Последний сосредоточен ниже дна моря в толще грунтовых отложений, которые принято называть многолетнемерзлыми породами (ММП). ММП захватывают всю береговую полосу и в последний климатический и криогенный минимум (20-15 т.л.н.) распространились в сторону моря на 60-80 км. Около 15 т.л.н. началась последняя трансгрессия моря. Перекрываемые морской водой сформировавшиеся ММП начали деградировать. К настоящему времени деградация привела к сохранению в западном секторе Арктики лишь относительно небольших массивов и островов реликтовых мерзлых пород. В восточном секторе мерзлые породы сохранились значительно шире [Неизвестнов и др., 2005]. Однако и здесь мощность ММП не одинакова, у берега она больше и составляет примерно 600-800 м и убывает в сторону моря до нуля. При этом ее кровля расположена непосредственно под дном моря или на некоторой от него глубине, порядка 10-20 м [Дмитренко, Хьюлеман, Кириллов, 2001].

Наличие льда создает большие проблемы при хозяйственном освоении шельфа. Надводный лед, дрейфуя под действием ветра и течений оказывает давление на гидротехнические сооружения, превосходящее штормовые давления волн при ураганных ветрах. Так, например, измеренные значения давлений на гидротехнические сооружения,

расположенные в открытом море составляют: ветра 2 кПа, волны 96-144 кПа, перемещающихся ледовых полей 2880 кПа. Известны случаи переворота буровых стационарных платформ из-за навалов льда. Подводный лед формирует особые свойства породы, зависящие от ее температуры и засоленности. А поскольку добываемый из Земли флюид (нефть или газ) имеет высокую положительную температуру, то со временем происходит растепление мерзлых грунтов оснований гидротехнических сооружений, которое в сочетании с действием надводного льда приводит к потере их устойчивости. В настоящее время для бурения на нефть и газ на шельфе арктических морей используются стальные буровые платформы и грунтовые острова (рис. 5.1).



Рис. 5.1 Стальная буровая платформа (вверху) и грунтовый остров (внизу). Фото неизвестного автора.



Грунтовые острова значительно надежнее стальных платформ. Они состоят из трех частей: подводной, надводной и защитного парапета. Чаще всего подводная часть создается односторонним намывом и имеет незакрепленный пляжный откос крутизной от 1:15 до 1:20; надводная – насыпным способом с закрепленным откосом крутизной от 1:3 до 1:5; защитный парапет возводится из камня или мешков с песком в виде призмы с крутизной откоса 1:2. Комбинированные откосы (сочетание намывных и насыпных откосов) имеют преимущества над остальными, ибо малые глубины на пологих подводных откосах летом способствуют разрушению морских волн, которые по пути вдоль откоса уменьшают высоту и теряют большую часть энергии, зимой – разрушению наползающих на остров ледяных полей, с образованием защитного пояса из битого льда.

В качестве крепления откоса надводной части обычно используются синтетические полипропиленовые мешки с песком или гравием объемом 0.4-2.0 куб. м, иногда мешки с цементным раствором (одна часть цемента и 4 части инертных), поверх которых укладывается стальные тросовые сети и якорные цепи (для удержания элементов покрытий). Под крепление укладывается фильтр (геотекстиль) [Джефриз, Роджерз, Стьюарт, 1985].

Грунтовые острова по своему назначению подразделяются на разведывательные и эксплуатационные. Разведывательные острова имеют относительно небольшой срок службы (до 3 лет), эксплуатационные – до 30 лет. Конструктивные параметры островов зависят от климатических, гидрографических, гидрологических, геологических и мерзлотных условий района их расположения и определяются расчетом [Соколов, 2003]. В качестве примера приведем некоторые цифры для островов, расположенных в море Бофорта на глубинах до 10 м, где они впервые были возведены.

Разведывательный остров:

- принимается круглая или прямоугольная (овальная) форма острова в плане с диаметром или стороной рабочей площадки 122 м;
- возвышение территории острова над уровнем моря 3,4 м;
- высота защитного парапета (бермы) не менее 1,5 м;

Эксплуатационный остров:

- размеры острова в плане определяются оборудованием и технологией работ, обычно диаметры (стороны) островов в плане назначаются равными 183 м (в общем случае в диапазоне 183...305 м)
- возвышение территории острова над уровнем моря 4,6 м;
- высота защитного парапета не менее 2,4 м;

Несмотря на высокую надежность грунтовые острова из-за большого объема строительного материала получили распространение только на мелководье. С увеличением глубины моря они по своим экономическим показателям уступают стальным стационарным платформам. Граница раздела проходит примерно на глубинах 10 м. По нашему мнению, эту границу можно существенно сдвинуть в сторону моря, если использовать в качестве строительного материала островов материал, которого в Арктике в избытке, а именно морской и континентальный (пресноводный) лед.

Лед является хорошим строительным материалом и часто использовался в качестве цемента при создании зимних фортификационных сооружений из грунта. Однако лед обладает и отрицательным свойством – пластическими деформациями, которые проявляются даже при малых нагрузках, в том числе под действием собственного веса [Войтковский, 1954]. В результате этого большинство конструкций из льда непрерывно деформируются и, не разрушаясь, изменяют очертания. Эти деформации обычно не дают возможности полностью использовать прочность льда, обуславливая то, что основным критерием устойчивости конструкций из таких материалов становятся не их прочностные характеристики, а параметры ползучести и уплотняемости. Конструкции и сооружения из льда считаются деформативно устойчивыми в том случае, когда конечные деформации за расчетный период эксплуатации сооружения не превышают допустимых величин. Конечная деформация объема ледяной конструкции  $e$  под действием внешней нагрузки и собственного веса за расчетный период времени складывается из начальной упругой деформации  $e_{el}$ , деформации ползучести  $e_t$  и деформации уплотнения  $e_c$ :

$$e = e_{el} + e_t + e_c. \quad (5.1)$$

С повышением отрицательной температуры деформации льда увеличиваются, а его прочность уменьшается.

Несмотря на перечисленные недостатки льда, как строительного материала, он широко используется при возведении фортификационных сооружений и ледовых переправ через водные преграды. Что касается его применения при строительстве морских платформ, то это предложение, несмотря на его перспективность, пока не получило промышленного воплощения и находится на стадии опытного применения, проектной проработки или просто идеи. Некоторые из них, разработанные нами на уровне изобретений, рассматриваются ниже.

## 5.2 Ледогрунтовый остров

Остров состоит из намороженного на обрезающую по периметру буровой платформы льдину морской воды, укрытой грунтом на величину слоя сезонного оттаивания [Хрусталев, Городецкий, Садовский, 1984]. Вокруг подводной части ледяного тела и частично надводной на величину набега волны и наползания льда устроена грунтовая призма, в которую установлена замораживающая система в виде ряда сезонно-действующих охлаждающих установок (СОУ), погружаемых через грунтовую призму в дно моря. Высота призмы принята равной высоте надводной части грунтового острова, включая защитный парапет (рис.5.2).

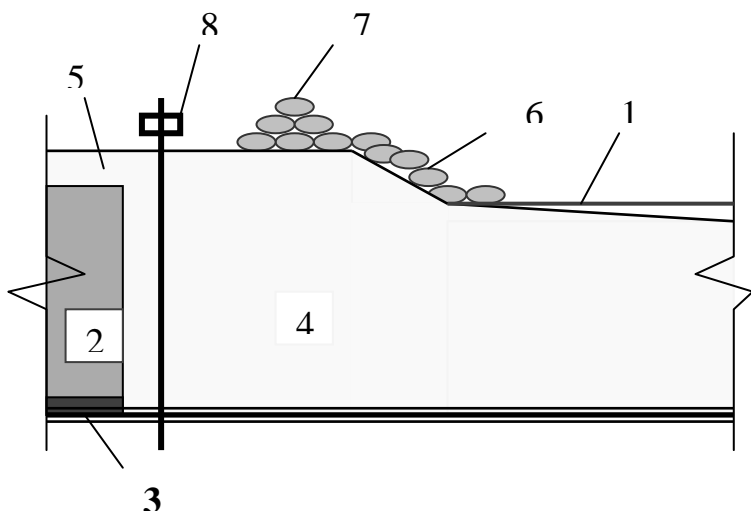


Рис. 5.2 Разрез ледогрунтового острова.

1 – уровень моря; 2 – замороженный массив из морской воды; 3 – обрезающий по краям морской лед; 4 – огибающая песчаная призма с комбинированным откосом; 5 – теплозащитный слой песчаного грунта; 6 – укрепление откоса; 7 – парапет; 8 – замораживающая система.

Намороженное ледяное тело острова не имеет положительной плавучести, это означает, что его надводная часть превышает глубину моря (с учетом прилива и ветрового нагона волн) не менее, чем на 1/6. В остальном ледогрунтовой остров удовлетворяет тем же требованиям,

которые предъявляются к грунтовым островам. Дополнительно производится только расчет на деформативную устойчивость ледяного тела.

На графиках рис. 5.3 показана условная зависимость стоимости ледостойкой стационарной платформы (ЛСП) от глубины моря. Она получена при условии, что стоимость стальной ЛСП при глубине моря 10 м равна стоимости грунтового острова.

Из рассмотрения графиков следует, что глубина моря, перекрываемая ледогрунтовыми островами, при которой их стоимость остается ниже стоимости стальной ЛСП, составляет 38 м, что превышает возможности искусственного намораживания льда. Поэтому последние являются определяющими при определении глубины моря, где строительство ледогрунтового острова будет целесообразно.

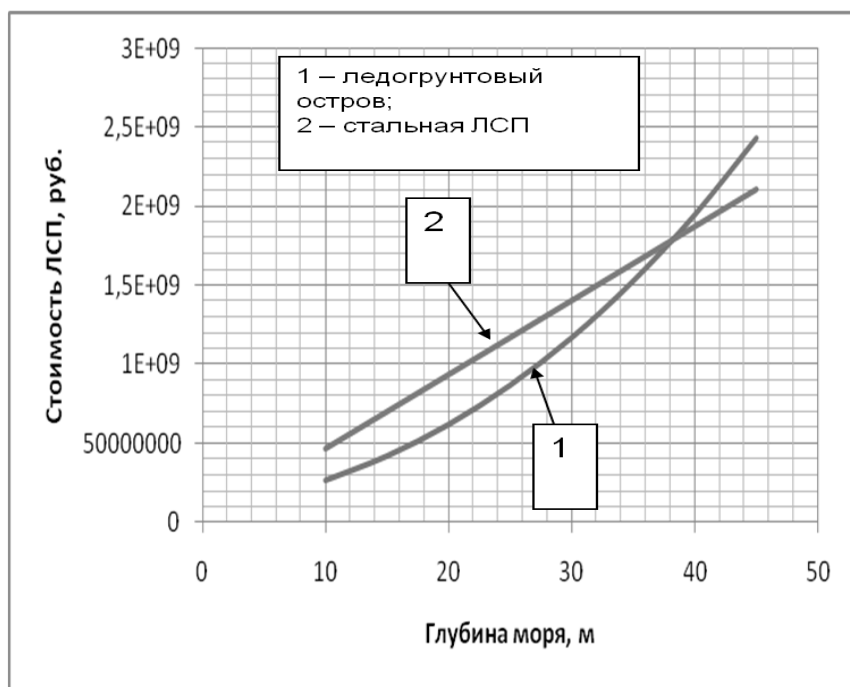


Рис. 5.3 Зависимость стоимости ледостойкой стационарной платформы (ЛСП) от глубины моря

Интенсивность тонкослойного намораживания льда из пресной воды можно оценить по формуле В.А. Бобкова:

$$h = T_{в}(1 + v/2)/3, \quad (5.2)$$

где  $h$  – интенсивность намораживания льда, см воды/сут.;  $T_{в}$  – температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $v$  – скорость ветра, м/с.

Расчеты, проведенные по формуле (5.2) показали, что возможности намораживания льда за один морозный период на западе арктического побережья составляют от 15 до 35 м, на востоке – от 35 до 55 м [Сосновский, Накалов, Ненашев, 2014]. При этом за морозный период принимается продолжительность года со среднесуточной температурой ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ . Интенсивность намораживания морской воды на 20 % меньше. Из этих цифр следует, что описанный ледогрунтовый остров технически возможно возводить в акваториях, где глубина моря не превышает 10 – 23 м на западе Арктики и 23 – 37 м на востоке.

Сооружение острова осуществляется следующим образом. На ледяном покрове намечают контур будущего сооружения, по контуру обрезают лед и устанавливают майну. На вырезанную карту производят намораживание воды, которая образует ледяное тело. Под действием веса ледяного тела карта опускается на дно моря. Далее в майну насыпают песок, доставляемый с берега самосвалами по ледяному покрову или намываемый земснарядом, с образованием призмы, в центре которой устанавливают замораживающие колонки, с помощью которых призму смораживают с дном моря и поддерживают в мерзлом состоянии в период эксплуатации острова. Надводную часть ледяного тела покрывают слоем песка, превышающим глубину его сезонного оттаивания. Рассмотренная конструкция позволяет увеличить срок службы острова за счет снижения интенсивности термоабразии и термоденудации ее поверхности, увеличить сопротивляемость платформы сдвигу за счет ее смерзания с дном моря и снизить требования к качеству намораживаемого льда за счет восприятия большей части срезающих нагрузок призмой мерзлого грунта. Срок создания конструкции – один зимний сезон.

### 5.3 Ледяной остров

Остров представляет собой посаженный на дно моря айсберг. Айсбергом принято называть сползший в море отколовшийся от ледника массив пресноводного льда, выступающий над водой не менее 5 м. В северных морях не редко встречаются айсберги как на открытой воде, так и в дрейфующем льду и припае. Первые из них представляют большую опасность для гидротехнических сооружений и их часто называют «убийцами морских платформ» (рис. 5.4).

Идея превратить айсберг из противника хозяйственной деятельности человека в союзника зрела давно. И впервые о ней заговорили в 1942 г во время 2-ой мировой войны. Тогда был разработан проект военного аэродрома на айсберге, который широко обсуждался в английских военных кругах, однако не был реализован. Этот аэродром выглядел примерно так, как показано на рис. 5.5.



Рис. 5.4 Айсберг – убийца морских платформ (фото неизвестного автора).

В 1982 г В.Д. Смирновым, С.Э. Городецким и Л.Н. Хрустальевым была



Рис. 5.5 Непотопляемый авианосец – военный аэродром на айсберге (картина неизвестного художника)

предложена идея посадить айсберг на дно моря и использовать в качестве буровой платформы. Эта идея была признана изобретением [Смирнов, Городецкий, Хрусталеv, 1982]. Учитывая, что отношение подводной части к надводной массива пресноводного льда в морской воде составляет 87 %, глубины которые можно будет перекрывать с помощью айсбергов будут более 33.5 м. Вопрос заключается лишь в том, где найти нужный айсберг, как его переместить к месту установки и как его посадить на дно моря. При этом для буровой платформы нужен будет не просто айсберг, а только столовый, линейные размеры которого должны превышать линейные размеры технологической площадки по крайней мере в 1.5 раза (запас на разрушение за время эксплуатации краев ледяного тела на воздухе и в воде). Как и где найти такой айсберг?

На Земле имеется несколько районов образования айсбергов: Гренландия, Новая Земля, Шпицберген, Северная Земля, Земля Франца-Иосифа, острова Канадского Арктического архипелага, Антарктида. Ежегодно выводные ледники Гренландии образуют 10-15 тыс. айсбергов от 0.4 до 1.6 млн. т. каждый. Наибольшие из них достигают длины до 2 км при общей толщине 300 м. Нужный айсберг находится с помощью спутника или самолета.

Следующая проблема – доставка айсберга к месту установки. В настоящее время в Канаде имеется практический опыт буксировки айсбергов с маршрутов судоходства и линий дрейфа, пересекающих места расположения морских платформ. Самый большой из отбуксированных айсбергов был длиной 112 м, шириной 85 м и общей толщиной 182 м. Его буксировал обычный грузовой корабль со скоростью 1 миля в час. В России буксировка айсбергов началась в 2016 г. Осенью этого года в Карском море был проведен эксперимент по буксировке айсбергов. По сообщению агентства РИА Новости от 10 октября 2016 г. ледоколом «Капитан Драницын» было отбуксировано 18 айсбергов, при этом самый крупный из них превысил миллион тонн.

Последняя проблема - посадка на дно моря. Для этого айсберг должен иметь осадку в воде несколько меньшую, чем глубина моря в месте установки. После буксировки его нагружают балластом и он садится на дно. Величина балласта должна обеспечивать не только отрицательную плавучесть айсберга, но и его устойчивость на действие горизонтальных нагрузок. В качестве балласта может использоваться лед, послойно намораживаемый из морской воды или грунт со дна моря. Посадка айсберга на дно и его устойчивость могут быть достигнуты за счет изменения плавучести с помощью направленного взрыва [Смирнов, Городецкий, Хрусталеv, 1984]. Эта идея реализуется следующим образом. На месте обнаружения направленным взрывом откалывается некоторый объем надводной части – айсберг всплывает, на месте установки – подводной – айсберг теряет часть плавучести и садится на дно. На рис. 5.6 показана схема описанной операции. При этом независимо от способа посадки на дно моря, дневная поверхность айсберга во избежание оттаивания ледяного тела покрывается слоем грунта на величину сезонного оттаивания. Что касается боковых сторон айсберга, то их защита от разрушения на воздухе и в воде в результате процессов термоденудации и термоабразии практически не возможна, поэтому айсберг должен быть существенно больше технологической площадки на величину этих разрушений. Последняя зависит от метеорологических и гидрологических условий района посадки айсберга на дно и времени его эксплуатации. Эта величина определяется расчетом [Войтковский, 1954]. Общий вид айсберга в качестве буровой платформы показан на рис. 5.7.

Преимущество айсберга в качестве буровой платформы по сравнению со всеми другими очевидно. Огромный массив пресноводного льда для своего создания не требует капитальных вложений, дос-



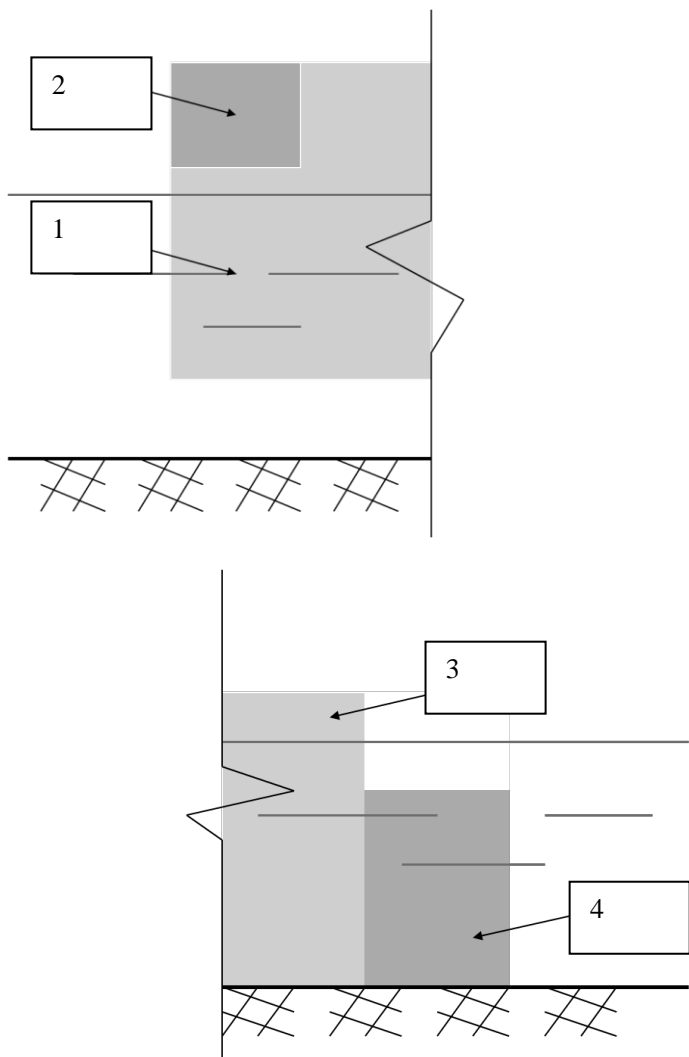


Рис. 5.6 Схема операций по посадке айсберга на дно моря. Слева на месте обнаружения, справа – на месте посадки. 1 – транспортируемый массив льда; 2 – удаляемый массив льда на месте обнаружения; 3 – посаженный на дно моря массив льда; 4 – удаляемый массив льда на месте посадки.

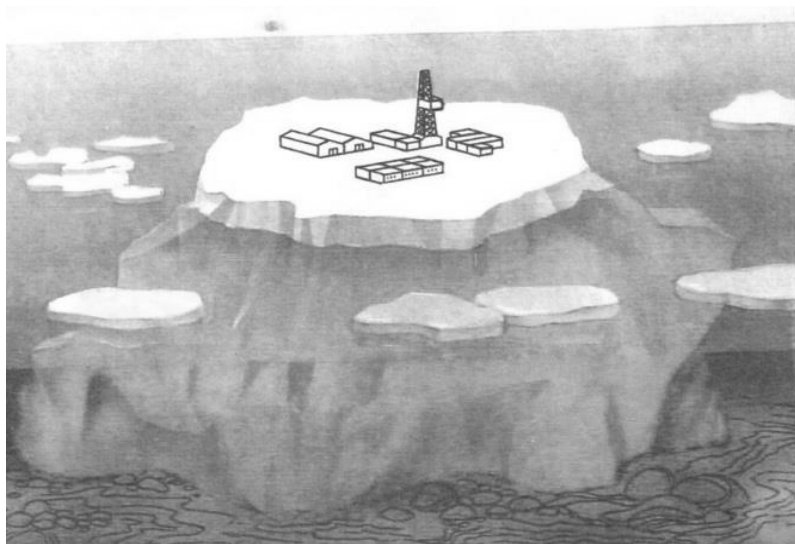


Рис. 5.7 Айсберг – буровая платформа (рисунок заимствован из статьи [Городецкий, Хрусталеv, 1991])

таточно однороден по своему составу и строению, сохраняет прочность даже тогда, когда окружающий ледовый покров теряет ее вследствие летнего таяния. Благодаря огромной массе и запасу холода сидящий на дне айсберг за счет гравитационных сил и сил смерзания с дном моря сохраняет устойчивость при всех нагрузках и воздействиях, включая ледовые, ветровые и волновые. Так наблюдения, проведенные С.Э. Городецким в Антарктиде, показали [Городецкий, Хрусталеv, 1991], что даже в летние месяцы, в период таяния и наиболее интенсивных ледовых подвижек, посаженные морским течением на мель айсберги хорошо противостоят внешним воздействиям. Главной причиной является то обстоятельство, что они состоят из пресноводного льда, который значительно прочнее морского. Что касается естественного таяния, то в высоких широтах оно незначительно: ледяные массивы обладают большим запасом холода. Измерения, проведенные в Антарктиде на базе «Дружная 1», показали, что температура айсберга, образованного из шельфового льда ледника Фильхнера, достигает минус 30 °С. Большим преимуществом платформы является еще и то, что она позволяет осваивать глубины до 200 и более метров.

Таким образом, на сегодняшний день известно, где и как находить айсберги нужных размеров, как их буксировать и как осаживать

на дно моря. Это, на наш взгляд, открывает широкие возможности для решения проблемы хозяйственного освоения арктического шельфа.

## 5.4 Тепловой и механический расчет островов

Целью теплового расчета является определение параметров охлаждающей системы, обеспечивающей мерзлое состояние ледяного тела острова в течение всего срока его эксплуатации.

Целью механического расчета – обеспечение устойчивости острова на сдвиг при действии наибольшей силы – ледовой нагрузки от движущегося тороса. При этом считается, что ледяное тело островов есть монолит, сдвигаемый двигающимся торосистым ледяным полем по контакту ледяное тело – дно моря. Последнее обусловлено тем, что указанный контакт является наиболее слабым сечением основания ледяного тела из-за частичного оттаивания последнего и разжижения подстилающего талого грунта.

### Тепловой расчет

Данный расчет осуществляется по эмпирической формуле, полученной нами методом математического моделирования теплового взаимодействия ледяного тела острова с охлаждающим контуром и с сопредельным талым грунтом оконтуривающей песчаной призмы. Моделирование производилось по разработанной на кафедре геокриологии трехмерной компьютерной программе «3dTERM» [Пустовойт и др., 2015]. В качестве начальных и граничных условий использовались данные по трем метеостанциям, расположенным на побережье арктических морей (Марресаля, Диксон, Анадырь). Обработка результатов велась в безразмерном виде. Цель обработки – получить шаг расстановки вертикальных парожидкостных термосифонов по периметру оконтуривающей призмы, обеспечивающий защиту ледяного тела от оттаивания. Для этого вначале определялся радиус промораживания грунта вокруг термосифона за один год. Такая постановка задачи обусловлена тем, что талый грунт оконтуривающей ледяное тело призмы вызывает оттаивание последней. Защитой от этого явления может служить охлаждающий контур, который следует создать за один зимний сезон, чтобы ограничиться оттаиванием ледяного тела не более нескольких см. Исходя из этого условия и находился шаг расстановки термосифонов, как удвоенная величина радиуса промораживания грунта вокруг термосифона за один год. Климатические условия перечисленных метеостаций приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

## Климатические условия, используемые в расчете

| Метеостанция | $T_s, ^\circ\text{C}$ | $T_w, ^\circ\text{C}$ | $t_s, \text{ч}$ | $t_w, \text{ч}$ | $R_v, \frac{\text{М}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ | $R_{\text{snow},o}, \frac{\text{М}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ | $R_{\text{snow},d}, \frac{\text{М}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|--|--|--|
| Марресаля    | 8.16                  | -14.55                | 2920            | 5840            | 0.053  | 0.484  | 4.000  |
| Диксон       | 8.27                  | -18.59                | 2920            | 5840            | 0.088  | 0.484  | 4.000  |
| Анадырь      | 10.76                 | -14.73                | 2920            | 5840            | 0.047  | 0.484  | 4.000  |

*Условные обозначения.*  $T_s$  – среднелетняя температура воздуха с поправкой на солнечную радиацию,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_w$  – среднезимняя температура воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_s, t_w$  – продолжительность летнего и зимнего периодов, ч;  $R_v, R_{\text{snow},o}, R_{\text{snow},d}$  – термические сопротивления, соответственно, на границе атмосфера – дневная поверхность, среднезимнего снежного покрова на гребне острова и на его надводном откосе,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

Моделирование производилось для четырех видов грунта оконтуривающей призмы (А, В, С, D), теплофизические свойства которых показаны в табл. 5.2, и трех высот острова 6, 8 и 16 м. При этом свойства ледяного тела и грунтов основания острова во всех вариантах принимались одинаковыми (табл. 5.2). Глубина моря назначалась равной половине высоты острова, среднегодовая температура морской вода – плюс  $4^\circ\text{C}$ . Термосифоны располагались по гребню оконтуривающей песчаной призмы, имеющей ширину гребня 8 м и крутизну откоса 1:3. Расстояние термосифонов от края ледяного тела составляет 2 м, длина испарителей термосифонов равняется высоте острова плюс 1 м. В качестве граничных условий модели принимались среднегодовые температуры поверхности, которые вычислялись по формулам: (3.38), (3.39). Среднегодовая температура поверхности испарителя термосифона определялась по формуле (3.16). Граничные условия при-

Таблица 5.2

## Теплофизические свойства материалов

| Грунт          | $\lambda_{th}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ | $\lambda_f, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ | $C_{th}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$ | $C_f, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$ | $L_v, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3}$ | $T_{bf}, ^\circ\text{C}$ |
|----------------|---|--|--|---|--|--------------------------|
| А              | 2.0   | 2.4  | 690  | 580   | 34060  | - 1.2                    |
| В              | 1.76  | 1.92   | 625  | 547   | 31263  | - 1.2                    |
| С              | 1.45  | 1.51   | 563  | 522   | 29797  | - 1.2                    |
| Д              | 2.1   | 2.14   | 563  | 522   | 22878  | - 1.2                    |
| Лед. тело      | 0.57  | 1.51   | 1144   | 519   | 96720  | - 1.9                    |
| Основа-<br>ние | 1.33  | 1.51   | 766  | 568   | 43273  | - 1.2                    |

Условные обозначения:  $\lambda_{th}, \lambda_f$  – теплопроводность материала в талом и мерзлом состояниях;  $C_{th}, C_f$  – объемная теплоемкость материала в талом и мерзлом состояниях;  $L_v$  – удельная теплота промерзания-оттаивания материала;  $T_{bf}$  – температура промерзания-оттаивания.

ведены в табл. 5.3. За начальные условия принимались температуры на  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше температуры промерзания-оттаивания грунтов и на  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже температуры промерзания-оттаивания ледяного тела.

Таблица 5.3

**Граничные условия**

| Метеостанция | Грунт | $T_{ор},\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $T_{де},\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $T_{м.в.},\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $T_e,\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
|--------------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Марресаля    | A     | -2.87                             | 5.12                              | 1.4                                 | - 9.43                         |
|              | B     | -2.78                             | 4.90                              | 1.4                                 | - 9.43                         |
|              | C     | -2.89                             | 4.61                              | 1.4                                 | - 9.43                         |
|              | D     | -2.67                             | 4.75                              | 1.4                                 | - 9.43                         |
| Диксон       | A     | -2.47                             | 4.22                              | 1.4                                 | - 12.13                        |
|              | B     | -2.29                             | 4.03                              | 1.4                                 | - 12.13                        |
|              | C     | -2.31                             | 3.79                              | 1.4                                 | - 12.13                        |
|              | D     | -2.13                             | 3.91                              | 1.4                                 | - 12.13                        |
| Анадырь      | A     | -1.63                             | 5.42                              | 1.4                                 | - 9.56                         |
|              | B     | -1.57                             | 5.22                              | 1.4                                 | - 9.56                         |
|              | C     | -1.68                             | 4.95                              | 1.4                                 | - 9.56                         |
|              | D     | -1.48                             | 5.08                              | 1.4                                 | - 9.56                         |

Условные обозначения:

$T_{ор}, T_{де}, T_{м.в.}, T_e$  – среднегодовая температура поверхности, соответственно, гребня острова (технологической площадки), надводного откоса, подводного откоса и дна моря, испарителя термосифона,  $^{\circ}\text{C}$ .

Результаты моделирования приведены в табл. 5.4. В таблице 5.5 представлены те же результаты, но в безразмерном виде, как функция безразмерного радиуса промораживания от безразмерных параметров:

$$\xi_f = f(Fo, Ko, \gamma, \delta, \varepsilon), \quad (5.3)$$

$$\text{где } \xi_f = r_f / r_e ; Fo = \frac{\lambda_f \cdot t_y}{C_f \cdot r_e^2} ; Ko = -\frac{L_v}{C_f \cdot (T_e - T_{bf})} ; \gamma = \frac{T_{ro} - T_{bf}}{T_e - T_{bf}} ;$$

$$\delta = -\frac{\lambda_{th} \cdot (T_{de} - T_{bf})}{\lambda_f \cdot (T_e - T_{bf})} , \varepsilon = H / r_e , \quad (5.4)$$

где;  $H$  – высота острова, м;  $r_f, r_e$  – радиусы, соответственно, промораживания грунта вокруг испарителя термосифона и самого испарителя термосифона, м.

Таблица 5.4

**Величина радиуса промерзания вокруг термосифона за один год в м.**

| Метеостанция | Н, м | Грунт оконтуривающей призмы |      |      |      |
|--------------|------|-----------------------------|------|------|------|
|              |      | А                           | В    | С    | Д    |
| Марресалья   | 6    | 1.5                         | 1.41 | 1.27 | 1.65 |
|              | 8    | 1.56                        | 1.53 | 1.83 | 1.63 |
|              | 16   | 1.53                        | 1.50 | 1.33 | 1.66 |
| Диксон       | 6    | 1.6                         | 1.55 | 1.50 | 1.91 |
|              | 8    | 1.77                        | 1.63 | 1.55 | 1.83 |
|              | 16   | 1.70                        | 1.61 | 1.52 | 1.90 |
| Анадырь      | 6    | 1.50                        | 1.42 | 1.28 | 1.66 |
|              | 8    | 1.55                        | 1.47 | 1.84 | 1.64 |
|              | 16   | 1.53                        | 1.50 | 1.30 | 1.67 |

Таблица 5.5

**Зависимость  $\xi_f = f(Fo, Ko, \gamma, \delta, \varepsilon)$**

| $\xi_f^m$ | Fo   | Ko    | $\gamma$ | $\delta$ | $\varepsilon$ | $\xi_f^\phi$ | $\Delta, \%$ |
|-----------|------|-------|----------|----------|---------------|--------------|--------------|
| 23.438    | 6199 | 7.135 | 0.203    | 0.640    | 93.75         | 23.278       | 0.682        |
| 22.031    | 6023 | 6.945 | 0.192    | 0.679    | 93.75         | 22.968       | 4.250        |
| 19.844    | 5508 | 6.936 | 0.205    | 0.678    | 93.75         | 22.262       | 12.186       |
| 25.781    | 7977 | 5.325 | 0.179    | 0.709    | 93.75         | 26.782       | 3.881        |
| 24.375    | 6199 | 7.135 | 0.203    | 0.640    | 125.0         | 23.325       | 4.309        |
| 23.906    | 6023 | 6.945 | 0.192    | 0.679    | 125.0         | 23.014       | 3.732        |
| 28.594    | 5508 | 6.936 | 0.205    | 0.678    | 125.0         | 22.307       | 21.987       |
| 25.469    | 7977 | 5.325 | 0.179    | 0.709    | 125.0         | 26.836       | 5.367        |
| 23.906    | 6199 | 7.135 | 0.203    | 0.640    | 250.0         | 24.438       | 1.959        |
| 23.438    | 6023 | 6.945 | 0.192    | 0.679    | 250.0         | 23.126       | 1.329        |
| 20.781    | 5508 | 6.936 | 0.205    | 0.678    | 250.0         | 22.415       | 7.863        |
| 25.938    | 7977 | 5.325 | 0.179    | 0.709    | 250.0         | 26.966       | 3.966        |
| 25.000    | 6199 | 5.373 | 0.116    | 0.413    | 93.75         | 25.370       | 1.478        |
| 24.219    | 6023 | 5.229 | 0.100    | 0.439    | 93.75         | 25.001       | 3.229        |
| 23.438    | 5508 | 5.223 | 0.102    | 0.438    | 93.75         | 24.213       | 3.307        |

| $\xi_f^m$ | Fo   | Ko    | $\gamma$ | $\delta$ | $\varepsilon$ | $\xi_f^\phi$ | $\Delta, \%$ |
|-----------|------|-------|----------|----------|---------------|--------------|--------------|
| 29.844    | 7977 | 4.010 | 0.085    | 0.459    | 93.75         | 29.144       | 2.444        |
| 27.656    | 6199 | 5.373 | 0.116    | 0.413    | 125.0         | 25.421       | 8.083        |
| 25.469    | 6023 | 5.229 | 0.100    | 0.439    | 125.0         | 25.051       | 1.640        |
| 24.219    | 5508 | 5.223 | 0.102    | 0.438    | 125.0         | 24.261       | 0.176        |
| 28.594    | 7977 | 4.010 | 0.085    | 0.459    | 125.0         | 29.173       | 2.026        |
| 26.563    | 6199 | 5.373 | 0.116    | 0.413    | 250.0         | 25.544       | 3.833        |
| 25.156    | 6023 | 5.229 | 0.100    | 0.439    | 250.0         | 25.173       | 0.066        |
| 23.750    | 5508 | 5.223 | 0.102    | 0.438    | 250.0         | 24.379       | 2.650        |
| 29.688    | 7977 | 4.010 | 0.085    | 0.459    | 250.0         | 29.315       | 1.255        |
| 23.438    | 6199 | 7.024 | 0.051    | 0.660    | 93.75         | 22.852       | 2.498        |
| 22.188    | 6023 | 6.837 | 0.044    | 0.704    | 93.75         | 22.509       | 1.448        |
| 20.000    | 5508 | 6.828 | 0.057    | 0.706    | 93.75         | 22.859       | 9.294        |
| 25.938    | 7977 | 5.243 | 0.033    | 0.737    | 93.75         | 26.168       | 0.891        |
| 24.219    | 6199 | 7.024 | 0.051    | 0.660    | 125.0         | 22.898       | 5.453        |
| 22.969    | 6023 | 6.837 | 0.044    | 0.704    | 125.0         | 22.554       | 1.805        |
| 28.750    | 5508 | 6.828 | 0.057    | 0.706    | 125.0         | 21.903       | 23.816       |
| 25.625    | 7977 | 5.243 | 0.033    | 0.737    | 125.0         | 26.221       | 2.327        |
| 23.906    | 6199 | 7.024 | 0.051    | 0.660    | 250.0         | 23.010       | 3.751        |
| 23.438    | 6023 | 6.837 | 0.044    | 0.704    | 250.0         | 22.664       | 3.301        |
| 20.313    | 5508 | 6.828 | 0.057    | 0.706    | 250.0         | 22.009       | 8.354        |
| 26.094    | 7977 | 5.243 | 0.033    | 0.737    | 250.0         | 26.349       | 0.977        |

Условное обозначение: 
$$\Delta = \frac{\xi_f^\phi - \xi_f^b}{\xi_f^b} \cdot 100\%$$

По данным табл. 5.5 нами методом американского статистика Брандона (Brandon, 1959) составлена эмпирическая формула вида:

$$\xi_f = 31,285 \cdot (6 \cdot 10^{-5} \cdot Fo + 0,603) \cdot Ko^{-0,167} \cdot \gamma^{0,013} \cdot \delta^{-0,105} \cdot \varepsilon^{0,007}, (5.5)$$

Верификация формулы (5.5) произведена в табличной форме (табл. 5.5, последняя колонка). Как можно видеть, точность аппроксимации данных моделирования вполне удовлетворительная (ошибка аппроксимации составляет: средняя – 4.60 %, минимальная – 0.07%, максимальная – 23.81%), что позволяет использовать эту формулу в практических расчетах.

Итак, окончательно имеем:

$$h_e = \xi_f \cdot d_e, (5.6)$$

где  $h_e$  – шаг расстановки термосифонов, м;  $d_e$  – диаметр испарителя термосифона, м.

## Механический расчет

Расчет ледяного тела на плоский сдвиг производится по первому предельному состоянию с использованием формулы [СП 58.13330.2012]:

$$\gamma_k \cdot F \leq \frac{R}{\gamma_n}, \quad (5.7)$$

где  $\gamma_k$  – коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый для основного сочетания 1;

$F$  – расчетное значение обобщенного силового воздействия;

$R$  – расчетное значение обобщенной силы сопротивления силовому воздействию;

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый согласно данным таб. 5.6

Таблица 5.6

| Класс сооружения                  | I    | II   | III  | IV   |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Коэффициент надежности $\gamma_n$ | 1.25 | 1.20 | 1.15 | 1.10 |

Для расчета ледогрунтового острова на плоский сдвиг параметры формулы (5.7) определяются:

$$F = \gamma_{f,1} \cdot F_h - \gamma_{f,2} \cdot F_n, \quad (5.8)$$

$$R = [\gamma_{f,2} \cdot (P_i + P_d) - F_{\text{вы}}] \cdot f, \quad (5.9)$$

где  $\gamma_{f,1}, \gamma_{f,2}$  – коэффициент надежности по нагрузке, принимаемый согласно приложения Д [СП 58.13330.2012] равными  $\gamma_{f,1} = 1.1, \gamma_{f,2} = 0.9$ ;

$F_h$  – горизонтальное давление льда на остров, вычисляется по указаниям [СП 38.13330.2012], МН;

$F_n$  – пассивное давление части грунтовой призмы, оконтуривающей остров и подверженной сдвигу вместе с ледяным телом, МН;

$P_i, P_d$  – вес ледяного тела (включает вес замороженного массива льда и обрезанной морской льдины, на которую произведено намораживание) и теплозащитной подсыпки поверх ледяного тела, МН;

$F_{\text{вы}}$  – выталкивающая сила морской воды, МН;



$f$  – коэффициент трения при скольжении льда по талому грунту, принимаемый согласно [СП 38. 13330.2012] равным 0.1-0.2.

$$F_{\Pi} = [(V_{н.в} \cdot \rho_{сух} + V_{п.в} \cdot \rho_{взв}) \cdot g \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \cdot S] \cdot 10^{-6}, \quad (5.10)$$

где  $V_{н.в}$ ,  $V_{п.в}$  – объем надводной и подводной частей оконтуривающей грунтовой призмы, подверженных сдвигу вместе с ледяным телом, м<sup>3</sup>;

$\rho_{сух}$ ,  $\rho_{взв}$  – плотность грунта призмы в сухом и взвешенном состоянии, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение силы тяжести, 9.81 м<sup>2</sup>/с;

$\varphi$  – угол внутреннего трения грунта призмы, рад;

$c$  – сцепление грунта призмы, МПа;

$S$  – площадь возможного сдвига части оконтуривающей призмы, м<sup>2</sup>.

$$F_{вы} = \rho_{м.в} \cdot g \cdot H_{м.в} \cdot S_i \cdot 10^{-6}, \quad (5.11)$$

где  $\rho_{м.в}$  – плотность морской воды, кг/м<sup>3</sup>;

$H_{м.в}$  – глубина моря в месте установки острова с учетом прилива и ветрового нагона, м;

$S_i$  – площадь ледяного тела в плане, м<sup>2</sup>.

Для расчета ледового острова на плоский сдвиг следует пользоваться теми же формулами, что и при расчете ледогрунтового острова, но при условии, что  $F_{\Pi} = 0$ .

### *Пример расчета.*

Постановка задачи. В акватории Байдарацкой губы Карского моря проектируется ледогрунтовой остров для бурения на газ. Глубина моря в месте расположения острова 4.0 м. Остров представляет собой ледяное тело квадратной формы размерами 190x190x6.5 м, поверху которой отсыпан защитный слой песка мощностью 2.0 м. К ледяному телу прилегает оконтуривающая песчаная призма, имеющая размеры поверху 8.0 м и крутизну откосов 1:3. Общие габариты острова составляют в плане: поверху – 198x198 м, понизу – 249x249 м по высоте 8.5 м, кроме того остров имеет парапет высотой 2.0 м. Откосы оконтуривающей призмы покрыты мешками с песком, скрепленных металлическими тросами. По периметру острова на расстоянии 1.5 м от ледяного тела с шагом 3.0 м установлены парожидкостные термосифоны радиусом 0.0635 м (диаметр 0.127 м) и глубиной погружения в грунт 9.5 м. Раз-

рез острова показан на рис. 5.8. Требуется оценить тепловую и механическую устойчивость острова.

Исходные данные для расчета [Джефриз и др., 1985; Кульпин и др., 2011; Миронюк, 2014 ]:

*Метеорологические условия.*

Среднегодовая температура воздуха – минус 4.4 °С; среднезимняя температура воздуха – минус 9.1 °С; среднелетняя температура воздуха с учетом поправки на солнечную радиацию – плюс 5 °С; продолжительность зимы – 5840 ч; продолжительность лета – 2920 ч; термическое сопротивление теплообмену на контакте воздух-дневная поверхность – 0.09 м<sup>2</sup>·°С/Вт; термическое сопротивление снега на гребне острова – 0.1 м<sup>2</sup>·°С/Вт, на поверхности надводного откоса – 4 м<sup>2</sup>·°С/Вт.

*Ледовые условия.*

Максимальная толщина льда – 1.7 м, плотность льда – 940 кг/м<sup>3</sup>, максимальная площадь ледяного поля – 4000000 м<sup>2</sup>, максимальная скорость дрейфа льда – 1 м/с, высота ледяного образования – 1.5 м, прочность льда на сжатие – 2.7 МПа.

*Гидродинамические условия.*

Средний уровень моря – минус 0.6 м, высота волны 1% обеспеченности – 4.6 м, длина волны – 50 м, высота прилива и ветрового нагона – 1.5 м (от среднего уровня моря), плотность морской воды – 1040 кг/м<sup>3</sup>, температура замерзания морской воды – минус 1.9 °С.

*Геологические условия.*

Верхняя часть геологического разреза мощностью более 100 м представлена засоленными песчано-глинистыми отложениями верхнего плейстоцена и голоцена. От дна до глубины 10-20 м грунты талые, ниже мерзлые. Температура талых грунтов выше минус 1.2 °С, мерзлых – ниже минус 1.2 °С. Температура замерзания-оттаивания грунтов – минус 1.2 °С.

Характеристики грунтов

- песчаные грунты: плотность – 1800 кг/м<sup>3</sup>, влажность – 0.2, плотность во взвешенном состоянии – 984 кг/м<sup>3</sup>, угол внутреннего трения в талом состоянии – 0.419 рад., коэффициент теплопроводности в талом состоянии – 2.67 Вт/(м<sup>0</sup>С), в мерзлом – 2.84 Вт/(м<sup>0</sup>С), объемная теплоемкость в талом состоянии – 876 Вт/(м<sup>3</sup>·°С), в мерзлом – 633 Вт/(м<sup>3</sup>·°С), удельная теплота промерзания-оттаивания грунта – 27900 Вт·ч/м<sup>3</sup>.

- глинистые грунты: плотность – 1800 кг/м<sup>3</sup>, влажность – 0.2, угол внутреннего трения в талом состоянии – 0.367 рад., сцепление в талом состоянии – 0.23 МПа, коэффициент теплопроводности в талом состоянии – 2.67 Вт/(м<sup>0</sup>С), в мерзлом – 2.84 Вт/(м<sup>0</sup>С), объемная теплоем-

кость в талом состоянии –  $876 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ , в мерзлом –  $633 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ , удельная теплота промерзания-оттаивания грунта –  $27900 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ . Для производства теплового расчета задаемся диаметром испарителя термосифона:  $d_e = 0.127 \text{ м}$

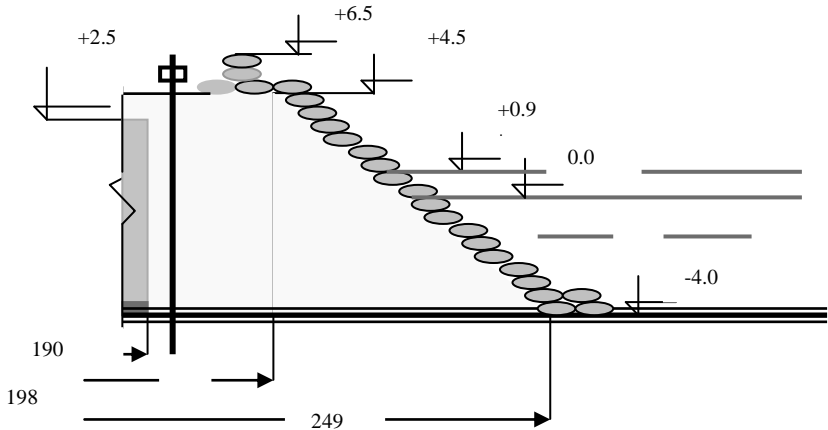


Рис. 5.8 Поперечный разрез ледогрунтового острова (к примеру расчета)

#### Последовательность расчета.

Тепловой расчет начинаем с определения среднегодовой температуры испарителя термосифона, для чего используем формулу (3.16):

$$T_e = \frac{(-9.1 + 1) \cdot 5840 + (-1.2) \cdot 2920}{8760} = -5,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Затем по формуле (3.40) и (3.39) определяем глубину сезонного оттаивания и промерзания грунта оконтуривающей призмы:

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2.67 \cdot (5 + 1.2) \cdot 2920}{27900} + (2.67 \cdot 0.09)^2} - 2.67 \cdot 0.09 = 1.64 \text{ м}$$

гребень

$$d_f = \sqrt{\frac{2 \cdot 2.84 \cdot (9.1 - 1.2) \cdot 5840}{27900} + (2.84 \cdot 0.1)^2} - 2.84 \cdot 0.1 = 2.57 \text{ м}$$

надводный откос

$$d_f = \sqrt{\frac{2 \cdot 2.84 \cdot (9.1 - 1.2) \cdot 5840}{27900} + (2.84 \cdot 4.09)^2} - 2.84 \cdot 4.09 = 0.39$$

м.

Далее определяем отношение глубин:  $M_1 = 2.57/1.64 = 1.57$ ,  $M_2 = 0.39/1.64 = 0.24$  и затем по формуле (3.38) находим расчетные температуры поверхности:

$$T_{or} = -5.513 \cdot 1.57 + 6.64 = -2.02^\circ \text{C};$$

$$T_{de} = -5.513 \cdot 0.24 + 6.64 = 5.33^\circ \text{C}.$$

Затем по формуле (5.4) находим безразмерные критерии:

$$Fo = \frac{2.84 \cdot 8760}{633 \cdot 0.0635^2} = 9747; \quad Ko = \frac{27900}{633 \cdot (-1.2 + 5.8)} = 9.56;$$

$$\gamma = \frac{-2.02 + 1.2}{-5.8 + 1.2} = 0.18;$$

$$\delta = -\frac{2.67 \cdot (5.33 + 1.2)}{2.84 \cdot (-5.8 + 1.2)} = 1.35; \quad \varepsilon = \frac{8.5}{0.0635} = 133.86.$$

Далее по формуле (5.5) находим безразмерный радиус промерзания грунта вокруг испарителя термосифона:

$$\xi_f = 31.285 \cdot (6 \cdot 10^{-5} \cdot 9747 + 0.603) \cdot 9.56^{-0.167} \cdot 0.18^{0.013} \cdot 1.35^{-0.105} \cdot 133.86^{0.007} = 12.31$$

Расчет завершаем нахождением шага расстановки термосифонов, используя формулу (5.6):

$$h_e = 12.31 \cdot 0.127 = 1.56 \text{ м.}$$

Механический расчет начинаем с определения горизонтальной нагрузки на остров от движущегося торосистого ледяного поля. Согласно СП 38.13330.2012 эта нагрузка есть сумма горизонтальных нагрузок:  $F_h = F_{h,u} + F_{h,c} + F_{h,k}$ , где  $F_{h,u}, F_{h,c}, F_{h,k}$  – соответственно, нагрузка от надводной части тороса, консолидированной и подводной. Перечисленные нагрузки определяются по нижеприведенным формулам.

*Нагрузка от надводной части тороса:*

$$F_{h,u} = 0.5 \cdot [10^{-6} \cdot \rho_i \cdot g \cdot (1 - \psi_u) \cdot h_u^2 \cdot k_{u,\varphi} + c_u \cdot \text{ctg}(k_{u,c} - 1) \cdot h_u] \cdot b_u = \\ 0.5 \cdot [10^{-6} \cdot 940 \cdot 9.81 \cdot (1 - 0.6) \cdot 1.5^2 \cdot 107.475 + 0.004 \cdot \text{ctg}(40^\circ) \cdot \\ (2.237 - 1) \cdot 1.5] \cdot 190 = 85.5 \text{ МН},$$

где  $\rho_i$  – плотность ледяного образования, принимаем 940 кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, 9.81 м/с<sup>2</sup>;  $\psi_u$  – пористость ледяного образования, принимаем 0.6;  $h_u$  – расчетная высота ледяного образования, принимаем 1.5 м;  $c_u$  – зацеп между обломками ледяного образования, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным 0.004 МПа;  $b_u$  – ширина преграды, принимаем равной ширине ледяного тела острова 190 м;  $k_{u,\varphi}, k_{u,c}$  – коэффициенты горизонтальной составляющей пассивного давления ледяного образования, вычисляются по формулам:

$$k_{u,\varphi} = \left[ \frac{\cos(\varphi_u + 90 - \beta)}{\cos(90 - \beta) \cdot (1 - \sqrt{k_1})} \right]^2 = \left[ \frac{\cos(40 + 90 - 19)}{\cos(90 - 19) \cdot (1 - \sqrt{0.817})} \right]^2 = 107.476$$

$$k_{u,c} = \left[ \frac{\cos(\varphi_u + 90 - \beta + \alpha_u)}{\cos(90 - \beta) \cdot (1 - \sqrt{k_2})} \right]^2 \cdot k_3 = \left[ \frac{\cos(40 + 90 - 19 + 30)}{\cos(90 - 19) \cdot (1 - \sqrt{50.041})} \right]^2 \cdot$$

$$16.542 = 2.237;$$

$$k_1 = \frac{\sin(\varphi_u + \alpha_f) \cdot \sin(\varphi_u - \alpha_u)}{\cos(90 - \beta - \alpha_f) \cdot \cos(90 - \beta + \alpha_u)} =$$

$$\frac{\sin(40 + 6.8) \cdot \sin(40 - 30)}{\cos(90 - 19 - 6.8) \cdot \cos(90 - 19 + 30)} = 0.817;$$

$$k_2 = \frac{\sin(\varphi_u + \alpha_f) \cdot \sin \varphi_u}{\cos(90 - \beta - \alpha_f + \alpha_u) \cdot \cos(90 - \beta + \alpha_u)} =$$

$$\frac{\sin(40 + 6.8) \cdot \sin 40}{\cos(90 - 19 - 6.8 + 30) \cdot \cos(90 - 19 + 30)} = 50.041;$$

$$k_3 = \frac{\cos(90 - \beta) \cdot \cos(90 - \beta - \alpha_f)}{\cos(90 - \beta - \alpha_f + \alpha_u) \cdot \cos(90 - \beta + \alpha_u)} =$$

$$\frac{\cos(90 - 20) \cdot \cos(90 - 20 - 6.8)}{\cos(90 - 19 - 6.8 + 30) \cdot \cos(90 - 19 + 30)} = 16.542$$

где  $\varphi_u$  – угол внутреннего трения ледяного образования, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным  $40^0$ ;

$\beta$  – угол наклона передней грани острова (откоса оконтуривающей песчаной призмы) к горизонту, принимаем равным  $19^0$ , что соответствует крутизне откоса 1:3;

$\alpha_u$  – угол наклона откоса ледяного образования к горизонту, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным  $30^0$ ;

$\alpha_f$  – угол трения между льдом и сооружением, равный  $\arctg(f) = \arctg(0.12) = 6,8^0$ .

*Нагрузка от консолидированной части тороса:*  
 $F_{h,c} = k \cdot k_v \cdot R_c \cdot r_c \cdot b_c \cdot h_c = 0.4 \cdot 0.65 \cdot 2.7 \cdot 0.8 \cdot 190 \cdot 1.0 = 106.71 \text{ МН}$

где  $k$  – эмпирический коэффициент, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным 0.4;

$k_v$  – эмпирический коэффициент, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным 0.65;

$R_c$  – прочность льда на сжатие, принимаем 2.7 МПа;

$r_c$  – отношение прочностей консолидированной части и ровного льда на сжатие, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным 0.65;

$b_c$  – ширина преграды, принимаем равной ширине ледяного тела острова 190 м;

$h_c$  – расчетная толщина консолидированной части, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным 1.0 м.

*Нагрузка от подводной части тороса:*

$$F_{h,k} = 0.5 \cdot [10^{-6} \cdot (\rho_w - \rho_i) \cdot g \cdot (1 - \psi_k) \cdot (h_k - h_c)^2 \cdot k_k + c_k \cdot \text{ctg} \varphi_k \cdot (k_k - 1) \cdot (h_k - h_c)] \cdot b_k = 0.5 \cdot [10^{-6} \cdot (1040 - 940) \cdot 9.81 \cdot (1 - 0.3) \cdot (3.9 - 1.0)^2 \cdot 0.124 + 0.02 \cdot \text{ctg} 15^\circ \cdot (0.124 - 1) \cdot (3.9 - 1.0)] \cdot 190 = 20.65 \text{ МН},$$

где  $\psi_k$  – пористость ледяного образования, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным 0.3;

$\rho_w$  – плотность морской воды, принимаем 1040 кг/м<sup>3</sup>;

$h_k$  – расчетная толщина ледяного образования, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным 4.6 м;

$\varphi_k$  – угол внутреннего трения ледяного образования, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным 15<sup>0</sup>;

$b_k$  – ширина преграды, принимаем равной ширине ледяного тела острова 190 м;

$c_k$  – сцепление (с учетом зацепа), принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным 0.02 МПа;

$k_k$  – коэффициент горизонтальной составляющей пассивного давления нагромождения обломков льда, согласно СП 38.13330.2012 вычисляется по формулам:

$$k_k = \left[ \frac{\cos(\varphi_k + 90 - \beta)}{\cos(90 - \beta) \cdot (1 - \sqrt{k_4})} \right]^2 = \left[ \frac{\cos(15 + 90 - 19)}{\cos(90 - 19) \cdot (1 - \sqrt{0.0729})} \right]^2 =$$

0.124,

$$k_4 = \frac{\sin(\varphi_k + \alpha_f) \cdot \sin \varphi_k}{\cos(90 - \beta - \alpha_f) \cdot \cos(90 - \beta)} =$$

$$\frac{\sin(15 + 6.8) \cdot \sin 15}{\cos(90 - 19 - 6.8) \cdot \cos(90 - 19)} = 0,0729$$

Завершаем расчет горизонтальной ледовой нагрузки суммированием ее частей:

$$F_h = F_{h,u} + F_{h,c} + F_{h,k} = 85.5 + 106.71 + 20.65 = 209.86 \text{ МН.}$$

*Расчет устойчивости острова на плоский сдвиг.*

Вначале по формуле (5.11) определяем выталкивающую силу воды, действующую на ледяное тело:

$$F_{\text{вы}} = 1040 \cdot 9.81 \cdot 4.9 \cdot 190^2 \cdot 10^{-6} = 1804.7 \text{ МН.}$$

Далее по формуле (5.10) определяем пассивный отпор части оконтуривающей грунтовой призмы, подверженной сдвигу:

$$F_{\text{п}} = [(9165.6 \cdot 1800 + 24345.65 \cdot 984) \cdot 9.81 \cdot \text{tg } 21^\circ +$$

$$0.023 \cdot 33.5 \cdot 190] \cdot 10^{-6} = 152.1 \text{ МН}$$

Затем по формулам (5.8) и (5.9) определяем расчетные значения обобщенной силы воздействия и сопротивления силовому воздействию на остров.

$$F = 1.1 \cdot 209.86 - 0.9 \cdot 152.1 = 93.95 \text{ МН;}$$



$$R = [0.9 \cdot (2163.8 + 1274.91) - 1804.7] \cdot 0.12 = 154.82 \text{ МН.}$$

Полученные значения  $F$  и  $R$  подставляем в выражение (5.7):

$$1 \cdot 93.95 < 154.82 / 1.2$$

$$93.95 < 129.02$$

Условие выполняется, следовательно указанный остров сохраняет устойчивость

*Проверка достаточности защиты технологической площадки острова от захлестывания штормовой волной.*

Высота наката на откос острова штормовой волны согласно СП 38.13330.2012 определяется по формуле:

$$h_{\text{нкат}} = k_r \cdot k_p \cdot k_{sp} \cdot k_{run} \cdot h_{1\%} = 1 \cdot 0.9 \cdot 1.1 \cdot 1.2 \cdot 4.6 = 5.5 \text{ м,}$$

где  $k_r, k_p$  – коэффициенты шероховатости и проницаемости откоса, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равными, соответственно, 1 и 0.9;

$k_{sp}$  – коэффициент, равный 1.1;  $k_{run}$  – коэффициент, зависящий от пологости волны, принимаем согласно СП 38.13330.2012 равным 1.2;

$h_{1\%}$  – высота волны 1% обеспеченности, принимаем 4.6 м.

Отсчет высоты волны производится от уровня моря с учетом прилива и ветрового нагона, в нашем случае от отметки плюс 0.9 м. Таким образом, волна подымается до отметки плюс 6.4 м. Верх парапета в нашем случае находится на отметке плюс 6.5 м. Этим гарантируется защита технологической площадки острова от захлестывания волнами во время шторма.

*Ответ.* Описанная в примере конструкция ледогрунтового острова обеспечивает его тепловую и механическую устойчивость, а также его защиту от захлестывания волнами во время шторма.

## Глава 6. Добычная скважина, не оказывающая тепловое влияние на вмещающую среду

Тепловое взаимодействие нефтяных и газовых скважин с многолетнемерзлыми грунтами приводит к большим негативным последствиям. Вокруг скважин образуется ореол оттаивания многолетнемерзлых пород (ММП) на всю их мощность и оттаявший грунт зависает на скважине, приводя к продольному изгибу колонны труб и иногда к их разрыву (рис.6.1). Кроме того, вокруг скважины образуются большие воронки проседания грунта, которые требуют их постоянной засыпки. Если скважина прорезает ледяное тело, то последнее просто исчезает, превращаясь в воду. Поэтому описанные выше ледогрунтовой и ледовый остров возможны только в том случае, если разведочные и добычные скважины не будут оказывать на входящий в состав острова лед и мерзлые грунты его основания теплового влияния. Такая конструкция скважины была разработана на геологическом факультете МГУ в 2015 году [Хрусталева, Чувилин, Гунар, 2015].

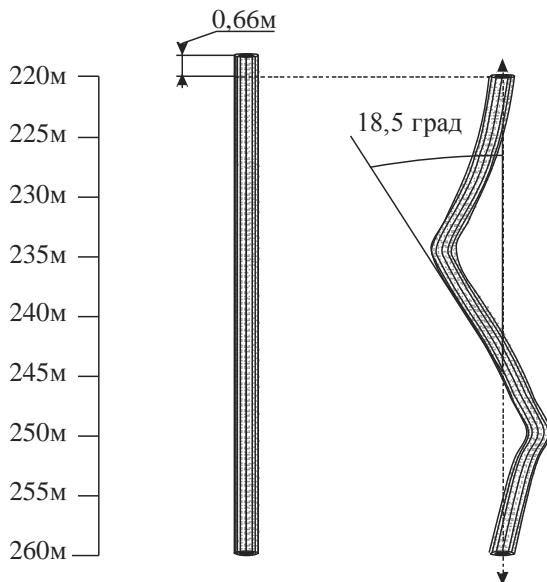


Рис 6.1 Изгиб колонны труб газовой скважины на Ямбургском месторождении по причине оттаивания ММП по результатам инструментальных измерений [Горелик, Солдатов, 2016].

## 6.1 Конструкция скважины

Конструкция скважины в пределах ледяного тела и многолетнемерзлого грунтового основания включает специальное устройство – зеротер, который аккумулирует все тепло, поступающее от транспортируемого продукта в окружающую среду и тем не допускает оттаивания льда и мерзлого грунта (рис. 6.2). Накапливаемое в зеротере тепло



Разрез по а - а

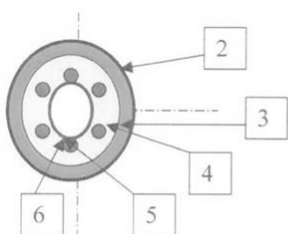


Рис. 6.2 Конструкция скважины, не оказывающей теплового влияния на вмещающую среду.

1 – цементное кольцо;  
2 – промежуточная колонна; 3 – пористая резина; 4 – антифриз;  
5 – замораживающая система; 6 – эксплуатационная колонна;  
7 – лифтовая труба.

периодически удаляется холодильной машиной. Зеротер представляет собой цилиндрическую полость, расположенную между эксплуатационной колонной и кондуктором, заполненную антифризом - водным раствором этиленгликоля с отрицательной температурой фазового перехода. Внутри зеротера размещены охлаждающие колонки, замораживающие раствор. Во избежание деформации стенок зеротера при расширении раствора при замерзании на внутренней поверхности про-

межуточной колонны находится слой пористой резины, компенсирующий увеличение объема раствора при его замерзании. Аккумуляция тепла происходит за счет оттаивания раствора, после чего он вновь замораживается. Изменяя концентрацию раствора этиленгликоля, добиваются равенства температуры его оттаивания (замерзания) температуре вмещающей среды. В этом случае разность температуры между скважиной и вмещающей средой будет равна нулю, а, следовательно, и нулю будет равен тепловой поток в эту среду в течение всего времени промерзания или оттаивания раствора.

На рис. 6.3 показана зависимость температуры замерзания-оттаивания водного раствора этиленгликоля от его концентрации.

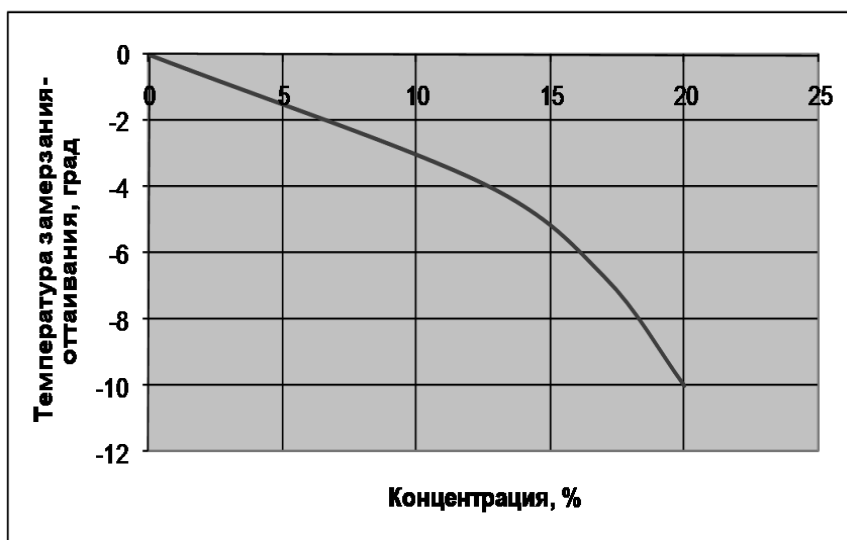


Рис. 6.3 Зависимость температуры замерзания-оттаивания водного раствора этиленгликоля от его концентрации.

Цикл работы зеротера состоит из оттаивания раствора этиленгликоля под действием тепла от транспортируемого продукта и его замораживания холодильной машиной (рис. 6.4).

Включение и выключение холодильной машины производится автоматически. Циклы следуют один за другим, поэтому скважина не оказывает теплового влияния на вмещающую скважину среду в течение всего периода эксплуатации.

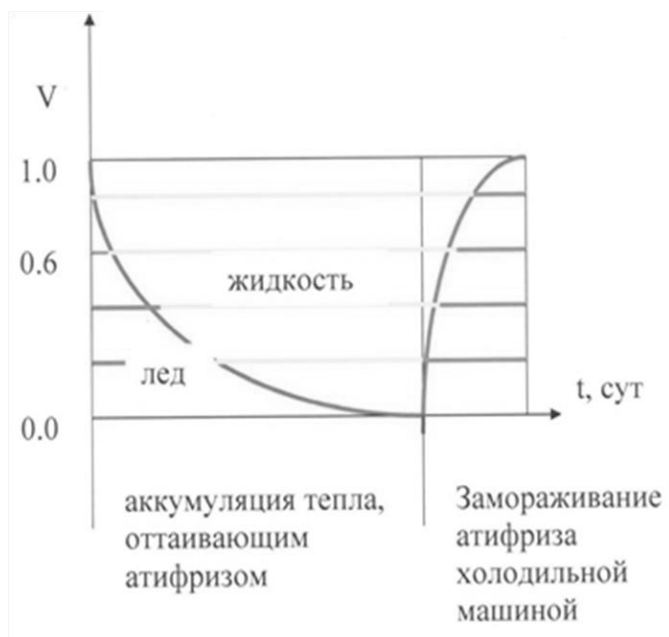


Рис. 6.4 Соотношение между льдом и жидкостью в зеротере (в дол. ед.) в пассивный и активный периоды работы холодильной машины.

ние всего периода эксплуатации скважины. Замораживание антифриза ведется холодильными станциями холодопроизводительностью 175000 – 550000 ккал/ч. Расчеты, проведенные для холодильная станция АВ – 300/360 холодопроизводительностью 300000 ккал/ч, свидетельствуют, что затраты энергии на замораживание антифриза составляют от 974 кВт·ч при мощности многолетнемерзлой толщи 100 м до 3894 кВт·ч при мощности мерзлой толщи 500 м, при этом время, затраченное на замораживание составляет 3 суток в первом случае и 11 суток во втором.

Марки холодильных станций, которые могут быть использованы в составе описанной добычной скважины или куста добычных скважин приведены в табл. 6.1.

Марки холодильных станций для замораживания антифриза

| Характеристика                         | Марки       |            |         |              |         |         |
|--|-------------|------------|---------|--------------|---------|---------|
|  | Передвижные |            |         | Стационарные |         |         |
|  | ПНС-100     | АВ-300/360 | ПХС-100 | ДАОН-175     | ДАО-275 | ДАО-550 |
| Холодопроизводительность $10^3$ ккал/ч | 260         | 300        | 350     | 175          | 275     | 550     |
| Мощность электродвигат, кВт            | 210         | 210        | 210     | 320          | 320     | 630     |
| Потребляемое напряжение, Вольт         | 380         | 380        | 380     | 6000         | 6000    | 6000    |
| Вес станции, т                         | 3.1         | 4.5        | 2.8     | 10.3         | 10.0    | 17.0    |

## 6.2 Расчет зеротера

Целью расчета является определение времени на оттаивание антифриза в зеротере и его последующее замораживание. Расчет осуществляется по эмпирическим формулам, полученным нами методом математического моделирования теплового взаимодействия скважина – антифриз – замораживающая колонка. Моделирование производилось по разработанной на кафедре геокриологии компьютерной программе «WARM» (Емельянов и др., 1994), позволяющей решать 2-х мерные осесимметричные задачи Стефана.

Размеры зеротера определялись размером кольца между эксплуатационной колонной, радиус которой назначался  $r_H = 0.09$  м, и пористой резиной с радиусом  $r_K = 0.15$  м. Между ними симметрично устанавливались 4 замораживающие колонки радиусом  $r_e = 0.03$  м каждая.

В качестве антифриза принят водный раствор этиленгликоля разной концентрации, при которой температура его плавления составляла  $-0.5$ ,  $-2.0$  и  $-5.0$  °С. Физические и теплофизические свойства этого раствора в зависимости от температуры плавления приведены в табл. 6.2. При моделировании принимались граничные условия первого и второго родов. На внешней поверхности эксплуатационной колонны – температура флюида 10, 20 и 30 °С; на внешней поверхности замораживающей колонки – температура рассола  $-40$  °С; на поверхности резинового кольца – нулевой тепловой поток. В последнем случае предполагалось, что теплообмен зеротера с окружающей средой отсутствует в силу равенства температуры среды температуре плавления анти-

Таблица 6.2

## Физические и теплофизические свойства водного раствора этиленгликоля

| $T_{\text{бт}}, ^\circ\text{C}$ | $\xi, \%$ | $\rho_{\text{th}}, \text{кг/м}^3$ | $\lambda_{\text{th}},$<br>$\text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$ | $\lambda_f,$<br>$\text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$ | $C_{\text{th}},$<br>$\frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$ | $C_f,$<br>$\frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$ | $L_v,$<br>$\frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3}$ |
|---------------------------------|-----------|-----------------------------------|---|---|--|--|---|
| -0.5                            | 1.15      | 1000                              | 0.560   | 2.218   | 997  | 485  | 93116   |
| -2.0                            | 4.6       | 1005                              | 0.558   | 2.212   | 977  | 475  | 93465   |
| -4.0                            | 8.4       | 1010                              | 0.547   | 2.168   | 967  | 470  | 93930   |
| -5.0                            | 12.2      | 1015                              | 0.535   | 2.121   | 945  | 460  | 94395   |
| -7.0                            | 16.0      | 1020                              | 0.512   | 2.030   | 927  | 451  | 94860   |

Условные обозначения:  $T_{\text{бт}}$  – температура плавления антифриза;  $\xi$  – концентрация раствора;  $\rho_{\text{th}}$  – плотность антифриза в жидком состоянии;  $\lambda_{\text{th}}, \lambda_f$  – теплопроводность антифриза в жидком и твердом состояниях;  $C_{\text{th}}, C_f$  – теплоемкость антифриза в жидком и твердом состояниях;  $L_v$  – удельная теплота плавления антифриза.

фриза. В качестве начальных условий принималась температура плавления антифриза. Моделирование продолжалось до тех пор пока время оттаивания и замораживания антифриза не примут постоянные значения. Результаты моделирования приведены в табл. 6.3

Данные табл. 6.3 затем были аппроксимированы аналитическими выражениями, формулы (6.1), (6.2). Результаты аппроксимации показана в колонках 6 и 7 табл. 6.3. Сопоставление этих результатов с результатами моделирования (колонки 4 и 5 ) показывает высокую точность аппроксимации.

Таблица 6.3

Результаты математического моделирования и их аппроксимации .

| $T_{bf}, ^\circ C$ | $T_{pr}, ^\circ C$ | $T_e, ^\circ C$ | Р - ты<br>моделирования |          | Р – ты<br>аппроксимации |          |
|--------------------|--------------------|-----------------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
|                    |                    |                 | $t_{th}, Ч$             | $t_f, Ч$ | $t_{th}, Ч$             | $t_f, Ч$ |
| 1                  | 2                  | 3               | 4                       | 5        | 6                       | 7        |
| -0.5               | 10.0               | -40.0           | 50.4                    | 7.2      | 49.9                    | 7.0      |
| -0.5               | 20.0               | -40.0           | 26.4                    | 9.6      | 26.3                    | 9.1      |
| -0.5               | 30.0               | -40.0           | 19.2                    | 12.0     | 18.2                    | 11.5     |
| -2.0               | 10.0               | -40.0           | 43.2                    | 7.2      | 44.1                    | 7.6      |
| -2.0               | 20.0               | -40.0           | 24.0                    | 9.6      | 24.8                    | 10.4     |
| -2.0               | 30.0               | -40.0           | 16.8                    | 12.0     | 17.6                    | 12.8     |
| -5.0               | 10.0               | -40.0           | 38.4                    | 9.6      | 37.4                    | 9.5      |
| -5.0               | 20.0               | -40.0           | 24.0                    | 14.4     | 23.1                    | 14.0     |
| -5.0               | 30.0               | -40.0           | 16.8                    | 16.8     | 17.0                    | 16.5     |

Условные обозначения.  $T_{bf}, T_{pr}, T_e$  – температура, соответственно, плавления антифриза, флюида, поступающего по скважине, и рассола, поступающего в замораживающую колонку;  $t_{th}, t_f$  – продолжительность оттаивания и замораживания антифриза.

$$t_{th} = \frac{C_{th} \cdot r_H^2}{\lambda_{th}} \cdot \left( 0.376 \cdot \frac{L_v}{C_{th} \cdot (T_{pr} - T_{bf})} + 0.114 \right), \quad (6.1)$$

$$t_f = \frac{C_f \cdot r_e^2}{\lambda_f} \cdot \exp \left( A + B \cdot \ln \frac{L_v}{C_f \cdot (T_{bf} - T_e)} \right), \quad (6.2)$$



где  $t_{th}, t_f$  – продолжительность оттаивания и замораживания антифриза, ч;  $T_{bf}, T_{pr}, T_e$  – температура, соответственно, плавления антифриза, флюида, поступающего по скважине, и рассола, поступающего в замораживающую колонку,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $r_H, r_e$  – радиус эксплуатационной колонны и замораживающей колонки, м;  $\lambda_{th}, \lambda_f$  – теплопроводность антифриза в жидком и твердом состояниях,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $C_{th}, C_f$  – теплоемкость антифриза в жидком и твердом состояниях,  $\text{Вт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $L_v$  – удельная теплота плавления антифриза,  $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ ; А, В – безразмерные параметры, определяемые по табл. 6.4 в зависимости от безразмерной температуры, которая находится по формуле:

$$\Delta = \frac{\lambda_{th} \cdot (T_{pr} - T_{bf})}{\lambda_f \cdot (T_{bf} - T_e)}, \quad (6.3)$$

Таблица 6.4

Значения безразмерных параметров А, В.

| Безразмерные параметры | Интервал изменения $\Delta$ |           |           |
|------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|
|                        | 0.20-0.45                   | 0.45-0.75 | 0.75-1.00 |
| А                      | 0.926                       | 0.142     | 0.983     |
| В                      | 1.671                       | 2.337     | 1.954     |

Примечание: Формулы (6.1), (6.2) работают при отношении  $\frac{r_H}{r_e} = 3$ ,  $r_k = r_H + 2 \cdot r_e$  и четырех замораживающих колонках, симметрично расположенных по кругу.

*Пример расчета.*

Постановка задачи: Нефтяная скважина прорезает мерзлую толщу с температурой  $-4.0^{\circ}\text{C}$ . Скважина имеет зеротер, расположенный между эксплуатационной колонной и промежуточной. Радиус эксплуатационной колонны  $r_H = 0.09$  м, радиус резинового кольца вокруг внутрен-

ней стенки промежуточной колонны  $r_K = 0.15$  м. В зеротере симметрично по кругу расположены 4 замораживающие колонки радиусом  $r_e = 0.03$  м. Температура нефти, поступающей по скважине в пределах мерзлой толщи  $T_{pr} = 10$  °С. Температура рассола, поступающего к замораживающим колонкам  $T_e = -20$  °С. Антифриз, температура плавления которого соответствует температуре грунта  $T_{bf} = -4.0$  °С, имеет следующие теплофизические свойства (табл. 5.2):  $\lambda_{th} = 0.547$  Вт/(м·°С),  $\lambda_f = 2.168$  Вт/(м·°С);  $C_{th} = 967$  Вт·ч/(м<sup>3</sup>·°С),  $C_f = 470$  Вт·ч/(м<sup>3</sup>·°С);  $L_v = 93930$  Вт·ч/м<sup>3</sup>.

Требуется определить время, потребное на оттаивание антифриза  $t_{th}$  и его последующее замораживание  $t_f$

Последовательность расчета: 1) По формуле (6.3) определяем безразмерную температуру

$$\Delta = \frac{0.547 \cdot (10 + 4)}{2.168 \cdot (-4 + 20)} = 0.221. \quad 2) \text{ По табл. 6.4 находим соответствующие } \Delta \text{ безразмерные параметры } A=0.926, B=1.671.$$

3) По формуле (6.1) определяем время на оттаивание антифриза

$$t_{th} = \frac{967 \cdot 0.09^2}{0.547} \left( 0.376 \cdot \frac{93930}{967 \cdot (10 + 4)} + 0.114 \right) = 39.0 \text{ ч.}$$

4) По формуле (6.2) определяем время на замораживание антифриза

$$t_f = \frac{470 \cdot 0.03^2}{2.168} \left( 0.926 + 1.671 \cdot \ln \frac{93930}{470 \cdot (-4 + 20)} \right) = 33.5 \text{ ч}$$

*Ответ:*  $t_{th} = 39.0$  ч,  $t_f = 33.5$  ч

# Глава 7. Геокриологические барьеры для хранения радиоактивных отходов

## 7.1 Мерзлый грунт – идеальная среда для хранения радиоактивных отходов

Мерзлый грунт, как известно, является практически водонепроницаем, что создает благоприятные условия для создания идеальных геологических барьеров вокруг подземных хранилищ не выделяющих низко активных радиоактивных отходов (РАО). Это позволяет размещать хранилища РАО неглубокого заложения не только в глинистых грунтах и монолитной скале, но и в песчаных грунтах и трещиноватых скальных породах, что расширяет ареал применения подземных способов захоронения. Кроме того, малые значения коэффициента молекулярной диффузии радионуклидов в мерзлых грунтах (табл. 7.1) предопределяют относительно небольшие размеры этих барьеров.

Таблица 7.1

**Значения коэффициента молекулярной диффузии наиболее подвижного радионуклида - стронция 90 в мерзлых и талых грунтах.**

| Среда                       | Температура, °С | Коэф. диффузии               |   | Источник информации   |
|-----------------------------|-----------------|------------------------------|---|-----------------------|
|                             |                 | см <sup>2</sup> /с           | м <sup>2</sup> /ч                               |                       |
| Все виды дисперсных грунтов | -4              | $(1.0-8.0) \times 10^{-9}$   | $3.5 \times 10^{-10}$ -<br>$2.8 \times 10^{-9}$ | [Белова и др., 1971]  |
| Все виды дисперсных грунтов | -2              | $(1.6 - 4.2) \times 10^{-8}$ | $5.6 \times 10^{-9}$ -<br>$1.5 \times 10^{-8}$  | [Росянов и др., 1971] |
| Песок                       | -7              | $4.6 \times 10^{-7}$         | $1.7 \times 10^{-7}$                            | [Ершов и др., 1999]   |
| Супесь                      | -7              | $2.0 \times 10^{-7}$         | $7.2 \times 10^{-8}$                            | [Ершов и др., 1999]   |
| Суглинок                    | -7              | $4.0 \times 10^{-8}$         | $1.4 \times 10^{-8}$                            | [Ершов и др., 1999]   |
| Глина                       | -7              | $(1.2-3.9) \times 10^{-7}$   | $4.3 \times 10^{-8}$ -<br>$1.4 \times 10^{-7}$  | [Ершов и др., 1999]   |
| Суглинок                    | > 0             | $1.85 \times 10^{-7}$        | $6.4 \times 10^{-8}$                            | [Прохоров, 1965]      |

Если хранилища располагаются вне криолитозоны и мерзлые барьеры вокруг них создаются и поддерживаются искусственно, о чем речь пойдет ниже, то размеры барьера имеют первостепенное значение

для выбора способа захоронения. Определим их, исходя из решения линейной задачи диффузии в предположении, что инженерные барьеры вышли из строя и экологическая защита осуществляется только за счет мерзлого геологического барьера.

Решение задачи массопереноса в квазиоднородном массиве при отсутствии фильтрационного потока имеет вид [Шестаков, 1979]:

$$\frac{C(x, \tau) - C_{\phi}}{C_p - C_{\phi}} = 0,5 \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot \tau}} \right) \right], \quad (7.1)$$

где  $C(x, \tau)$  - концентрация радионуклида, дол. ед.;  $C_{\phi}$  - фоновая концентрация радионуклида, дол. ед.;  $C_p$  - концентрация радионуклида у стенки могильника, дол. ед.;

$x$  - расстояние от источника загрязнения, м;  $\tau$  - время диффузии, час;  $D$  - эффективный коэффициент молекулярной диффузии, м<sup>2</sup>/ч.

По формуле (7.1) легко определить максимальное расстояние, на которое распространяется загрязнение за время экологической опасности могильника. Для этого левую часть уравнения надо приравнять нулю и решить полученное уравнение относительно  $x$ . Результаты расчета приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

**Проникновение радионуклида стронций 90 в мерзлый грунт в метрах**

| Грунт  | Коэффициент Диффузии, м <sup>2</sup> /ч | Время, лет |      |      |      |      |
|--------|---|------------|------|------|------|------|
|        |   | 25         | 50   | 100  | 150  | 300  |
| Песок  | $1.7 \times 10^{-7}$                    | 1.39       | 1.96 | 2.78 | 3.40 | 4.81 |
| Супесь | $7.2 \times 10^{-8}$                    | 0.90       | 1.28 | 1.81 | 2.21 | 3.13 |
| Суглин | $1.4 \times 10^{-8}$                    | 0.40       | 0.56 | 0.80 | 0.98 | 1.38 |
| Глина  | $1.4 \times 10^{-7}$                    | 1.26       | 1.78 | 2.52 | 3.09 | 4.37 |

Из данных табл. 7.2 следует, что наибольшее проникновение радионуклида в мерзлый грунт происходит в песках и за 300 лет (обычный срок экологической опасности приповерхностного хранилища) не превосходит 5.0 м, наименьшее – в суглинках, которое за то же самое время не превосходит 1.5 м. Низкая проницаемость последних позволяет использовать их для создания противодиффузионных экранов. Убедившись в низкой проницаемости мерзлых грунтов, перейдем к рассмотрению конструкции хранилища.

## 7.2 Существующая конструкция хранилища РАО

В настоящее время низко активные твердые и предварительно отверженные РАО обычно размещаются в приповерхностных хранилищах, расположенных в талых глинистых грунтах или монолитной скале. Хранилище представляет собой подземный прямоугольный резервуар размером в плане 5.0 x 19.2 м. Резервуар погружен в грунт на глубину 4.6 м., имеет железобетонные стены, днище и перекрытие. Толщина стен и перекрытия 0.3 м., днища – 0.5 м. Со стороны грунта стены имеют гидроизоляцию из рубероида и кирпичную обкладку. Над перекрытием хранилища устроена подсыпка из глинистого грунта толщиной 1.3 м. В плане гребень подсыпки выступает за внешний контур хранилища на 1.5 м., крутизна откоса подсыпки 1: 1. Подсыпка уложена на слой асфальтобетона толщиной 0.1 м. по песчаной подготовке толщиной 0.3 м. Асфальтобетоном покрыто само хранилище и прилегающая к нему территория на расстоянии 10 м от могильника. За пределами покрытия, примыкая к нему, располагается дренажная канава для сбора поверхностных вод, глубина канавы 0.4 м, ширина – 0.5 м. Помещенные в хранилище радиоактивные отходы находятся в цементных матрицах или пластиковых мешках, пространство между которыми заполнено песчано-цементным раствором.

Недостатком хранилища такой конструкции является его повышенная экологическая опасность для окружающей среды, обусловленная возможностью проникновения в железобетонный резервуар грунтовых вод в результате морозной деструкции бетона под действием многочисленных циклов его сезонного промерзания-оттаивания и естественного старения. Этому способствует также увеличение на 3-4 порядка фильтрационных свойств окружающих хранилище глинистых грунтов из-за появления в них макро пористости в результате сезонного промерзания-оттаивания [Потрашков, Хрусталеv, 1961]. Грунтовые воды вымывают радионуклиды из РАО и выносят их в окружающую среду, о чем свидетельствует повышенный радиационный фон у многих существующих хранилищ такого рода.

При расположении хранилища вне криолитозоны для ликвидации этого недостатка нами предлагается размещать приповерхностное хранилище в искусственно созданном саркофаге из многолетнемерзлого грунта.

### 7.3 Предлагаемая конструкция хранилищ РАО в саркофаге из мерзлого грунта

Предлагаемая конструкция хранилища представляет собой приповерхностный железобетонный резервуар с помещенными в него радиоактивными отходами [Хрусталеv и др., 2004]. Над резервуаром расположен противодиффузионный экран из мерзлого суглинка толщиной 1.4 м по верх него - песчаная подсыпка, выступающая в плане за контур резервуара на 9.5 м. В подсыпке расположены горизонтальные парожидкостные термосифоны, а по периметру железобетонного резервуара – вертикальные парожидкостные термосифоны до глубины, превышающей глубину дна резервуара на 2.0 м. Диаметр термосифонов 0.052 м, шаг их расстановки - 1.0 м. Гребень и откосы подсыпки покрыты слоем теплоизоляции из пенополистирола толщиной 0.2 м. По периметру подсыпки имеется дренажная канава (рис.7.1)

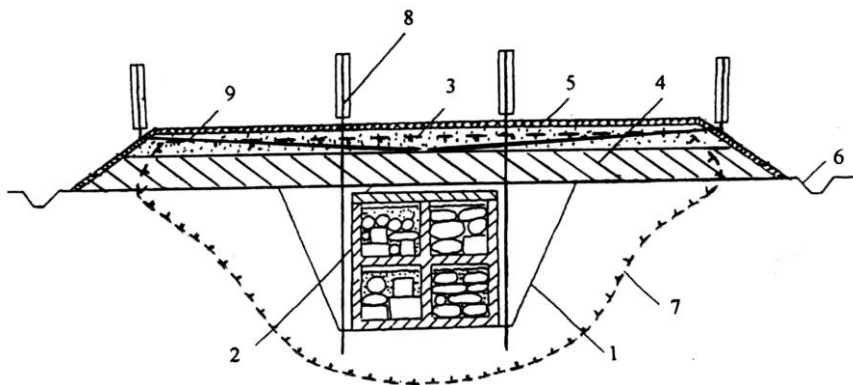


Рис. 7.1. Конструкция хранилища радиоактивных отходов: 1 – траншея, 2 – хранилище РАО, 3 – песок, 4 – суглинок, 5 – теплоизолятор, 6 – дренажная канава, 7 – граница многолетнемерзлых грунтов, 8 – вертикальные термосифоны, 9 – горизонтальные термосифоны.

В процессе хранения РАО автоматически за счет охлаждения массива грунта в зимнее время горизонтальными и вертикальными парожидкостными термосифонами создается гидроизоляционный барьер из многолетнемерзлого грунта, размеры которого с каждой новой зимой увеличиваются. В летнее время, когда термосифоны не работают, теплоизолятор, расположенный по гребню и откосам подсыпки, удерживает границу сезонного оттаивания грунта в теле подсыпки и железобетонного резервуара.

бетонный резервуар оказывается навсегда захороненным в многолетнемерзлом грунте. Будучи захороненным в многолетнемерзлом грунте он не подвержен действию атмосферных осадков и грунтовых вод, находится при стабильной отрицательной температуре, которая существенно замедляет процессы старения бетона. Это обеспечивает повышение экологической безопасности предлагаемого хранилища для окружающей среды и увеличение его долговечности.

## **7.4 Результаты математического моделирования теплового взаимодействия хранилища РАО с вмещающей средой**

Сотрудниками кафедры геокриологии геологического факультета МГУ проведено математическое моделирование теплового взаимодействия железобетонного хранилища РАО с вмещающей его грунтовой средой в шести районах средней полосы, где размещаются могильники РАО (гг. Сергиев Посад Московской области, Санкт-Петербург, Саратов, Нижний Новгород, Казань, Мурманск). Оно производилось численным методом по разработанной на кафедре программе Heat, являющейся развитием ранее разработанной программы Warm [Емельянов и др., 1994]. В качестве граничных условий принимались данные наблюдений по метеостанциям указанных выше городов, а физические и теплофизические свойства пород принимались из справочников в соответствии с описанием геологических разрезов в местах расположения существующих вблизи этих городов хранилищ. На рис. 7.2 показана динамика промерзания грунта вокруг хранилища РАО в районе г. Сергиев Посад.

Верхняя часть геологического разреза площадки хранилища сложена покровными суглинками, пористыми, с прослоями и линзами супесей, мощностью 0,2-3,5 м. Ниже залегают отложения морены московского оледенения, представленные плотными суглинками, средними, песчанистыми с прослоями и линзами песка, с включениями гальки, гравия и валунов осадочных и изверженных пород. По консистенции суглинки твердые и полутвердые с естественной влажностью 10-20 % и общей мощностью 30-40 м. В толще суглинков отмечаются прослои пылеватой супеси с включением гальки и гравия. Мощность прослоев до 4 – 5 м. В схематизированном виде разрез отложений показан на рис. 7.2.

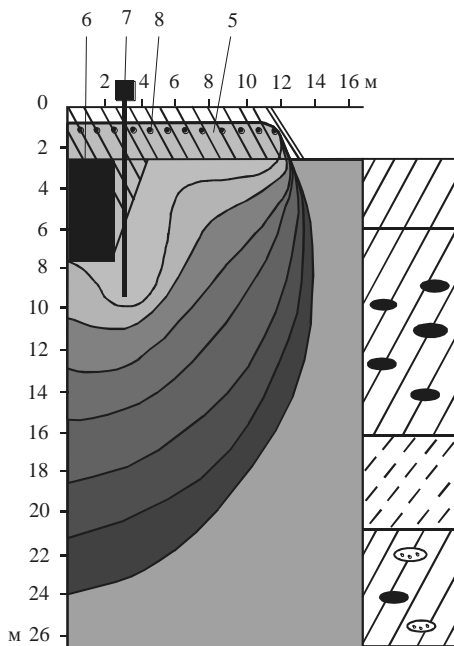
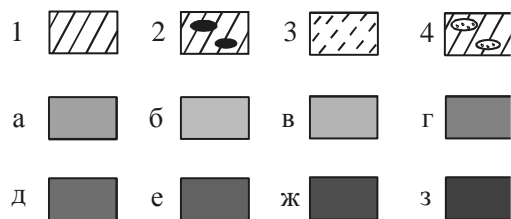


Рис. 7.2. Динамика промерзания грунтов вокруг хранилища радиоактивных отходов в районе г. Сергиев Посад.

Границы мерзлого массива показаны на конец летнего периода:

1 – суглинок; 2 – суглинок с включениями гальки, гравия, валунов; 3 – супесь пылеватая с включениями гальки, гравия; 4 – суглинок с линзами песка, включениями гальки, гравия, валунов; 5 – подсыпка; 6 – хранилище РАО; 7 – вертикальные термосифоны; 8 – горизонтальные термосифоны; а – талый грунт; б – з – мерзлый грунт, сформировавшийся через: б – 1 год после установки термосифонов; в – через 3 года; г – через 10 лет; д – через 25 лет; д – через 50 лет; черз 100 лет; черз 300 лет



Как показали расчеты, уже через год после начала работы термосифонов вокруг хранилища формируется зона мерзлых грунтов, захватывающая практически весь объем хранилища (рис. 7.2). Со временем процесс охлаждения продолжает развиваться. Через 50 лет формируется значительная область мерзлого грунта, которая достигает глубины 11,0 м от подошвы хранилища и распространяется по горизонтали за контур хранилища на 10,0 м. Через 300 лет зона промерзания от подошвы хранилища достигает 16,5 м и распространяется за контур хранилища на расстояние до 11,5 м.

При этом скорость промерзания талого грунта во всех направлениях больше скорости диффузии самого подвижного радионуклида –



стронция 90 (рис. 7.3), поэтому загрязнение не может распространиться за пределы саркофага. Аналогичная картина наблюдается и в других районах.

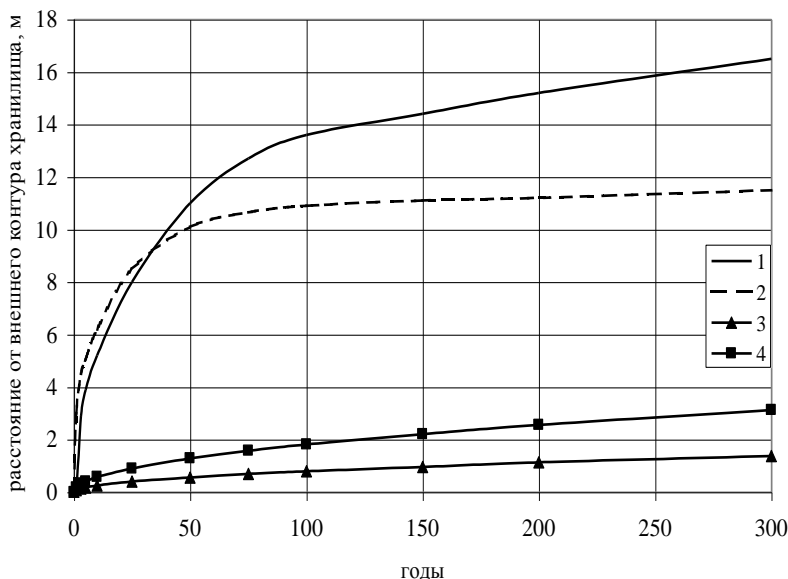


Рис. 7.3 Динамика роста массива мерзлого грунта вокруг хранилища РАО в г. Сергиев Посад и величина проникновения радионуклида стронций 90 в мерзлый грунт.

1 – рост ореола промерзания ниже подошвы хранилища; 2 – то же в сторону от хранилища; 3 – проникновение радионуклида в мерзлый суглинок; 4 – то же в мерзлую супесь.

Так, например, в районах Мурманска, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Казани и Саратова только за счет естественного "холода" удастся создать вокруг железобетонных резервуаров с РАО геологический барьер из многолетнемерзлого грунта за 1-3 зимних сезона.

Со временем размеры формирующегося массива мерзлого грунта увеличиваются как от внешней стороны хранилища, так и от его нижней образующей. Расчетное время, на которое проводилось прогнозирование, составляло для этих районов 50 лет. За этот период температурное поле, формирующееся при использовании охлаждающих

устройств, не достигает стационарного состояния, поэтому рост мерзлого массива будет продолжаться и в дальнейшем, что повлечет возрастание надежности конструкции могильника.

Однако слабым звеном новой конструкции могильника является относительно малая долговечность термосифонов (не более 100 лет) при сроке экологической опасности могильника 300 лет. Поэтому в конструкции могильника предусмотрена возможность замены термосифонов по мере их старения.

Таким образом, проведенные исследования показали, что использование мерзлых грунтов в качестве геологических барьеров вокруг подземных хранилищ низкоактивных РАО возможно не только в криолитозоне, но и в средней полосе России, при этом для создания барьеров могут использоваться все виды грунтов (песчаные и глинистые), что значительно расширяет возможную территорию расположения хранилищ. Кроме того, мы полагаем, что описанное инженерное решение создания барьера из мерзлого грунта может применяться не только для решения поставленной проблемы, но и значительно шире – для предотвращения распространения ареалов загрязнения грунта другими экологически опасными веществами. К сожалению, опыта хранения РАО в вечномёрзлых грунтах пока нет, однако многочисленные палеонтологические находки органического вещества в многолетнемерзлых грунтах, пролежавшего там без гниения многие тысячи лет, говорят о высокой надежности и большой долговечности защитных барьеров из этих грунтов.

## **7.5 Расчет геокриологических барьеров**

Целью расчета является определение места расположения термосифонов вокруг хранилища и термического сопротивления теплоизоляции, при которых скорость роста мерзлого массива вокруг хранилища будет опережать скорость проникновения радионуклида стронций 90 в окружающую среду в течение всего периода радиоактивной опасности хранящегося материала. Расчет осуществляется методом математического моделирования по любой из известных компьютерных программ решения задачи Стефана. Кратко осветим одну из них – программу «3dTERM» [Пустовойт и др., 2015]. Программа разработана институтом «Фундаментпроект» и кафедрой геокриологии МГУ им. М.В.Ломоносова в 2015 г. Программа предназначена для решения трехмерных задач и является развитием на современном уровне известной программы «WARM».

Программа «3dTERM» адаптирована для использования с современными операционными системами и компьютерами, она имеет более удобный интерфейс, высокое быстродействие и качественную графическую интерпретацию результатов счета. Принципиальным новшеством по сравнению с программой «WARM» является возможность учета фазовых переходов воды, реализующихся в спектре отрицательных температур (незамерзшая вода), что характерно практически для всех видов дисперсных пород. Программа написана на языке C++ с использованием кроссплатформенных библиотек Qt и математических библиотек BOOST и может эксплуатироваться на персональных компьютерах с архитектурой x86, x64 и операционными системами: Windows XP, и выше, Linux, MAC OSX.

## Литература

*Абросимов А.И., Гвоздик В.И., Минкин М.А.* Гравитационная тепло-водя труба. Патент на изобретение № 2387937, бюл., № X, 2010.

*Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н., Лукин М.П., Шолин В.В.* Дорожная насыпь на вечномёрзлых грунтах. Патент на изобретение № 2324032, бюл., № 13, 2008.

*Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н.* Предупреждение оттаивания мерзлоты в основании насыпей // *Дороги*, № 25, 2013, с. 32-34.

*Е.С. Ашпиз, Л.Н. Хрусталева, В.В. Макаров, О.В. Сурков.* Охлаждаемое основание сооружений. Патент на полезную модель № 143963, бюл., № 22, 2014.

*Е.С. Ашпиз, Л.Н. Хрусталева, В.В. Макаров, О.В. Сурков.* Охлаждаемое устройство для температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов. Патент на полезную модель № 143964, бюл., № 22, 2014.

*Белова Е.И., Погодин Р.И., Козотков А.Ф.* Роль диффузии в перемещении  $^{90}\text{Sr}$  по профилю почв // Информационный бюллетень по проблемам радиобиологии АН СССР, 1971. Вып. 13, с 62-65

*Войтковский К.Ф.* Расчет сооружений из льда и снега. М.: Изд-во АН СССР, 1954.136 с.

*Горелик Я.Б., Солдатов П.В.* О нарушении эксплуатационной устойчивости крепи скважин при сохранении боковой опоры на оттаивающие мерзлые породы // *Криосфера Земли* т. XX, №4, 2016. С. 93-104.

*Городецкий С.Э., Хрусталева Л.Н.* Айсберг – буровая платформа // *Наука в СССР*, № 3, 1991, с. 96-99.

*Джеффриз М.Дж, Роджерс Б.Т., Стьюарт Х.Р.* Строительство островов в канадской шельфовой зоне моря Бофорта // *Труды 17-й ежегодной конференции по морским технологиям*, 6-9 мая 1985 г., Хьюстон, США, 1985, с. 131-140.

*Дмитренко И.А., Хьюлеман Й.А., Кириллов С.А. и др.* Термический режим придонного слоя моря Лаптевых и процессы, его определяющие // *Криосфера Земли*, 2001, т. V, №3, с. 40-55.

*Долгих Г.М., Долгих Д.Г., Окунев С.Н., Феклистов В.Н., Величев С.П.* Система для температурной стабилизации основания сооружений на вечномёрзлых грунтах // Патент № 2416002 С1, 2011

*Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Хрусталева Л.Н., Яковлев С.В.* Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномёрзлыми грунтами WARM // Свидетельство № 940281. РосАПО, 1994.

*Ершов Э.Д., Чувилин Е.М., Смирнова О.Г.* Проводимость ионов химических элементов во льдах и мерзлых породах // *Доклады АН*. 1999, том 367, № 6, с 796-798

*Ершов Э.Д.* Общая геокриология. Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2002. 682 с.

*Кроник Я.А.* Аварийность и безопасность природно-технических систем в криолитозоне // Труды второй конференции геокриологов России. Изд-во МГУ, т. 4, 2001. С 138-146.

*Кульпин Л.Д., Савченко В.И., Обморшева Л.Б.* Особенности освоения углеводородных ресурсов мелководных заливов арктических морей // Oil & Gas Journal Russia, 2011, стр. 78-83.

*Миرونюк С.Г.* Оценка экологических последствий строительства и эксплуатации подводного перехода магистрального газопровода через Байдарацкую губу (Карское море) // Арктика: экология и экономика, 2014 г., стр. 72-78.

*Неизвестнов Я.В., Боровик О.В., Козлов С.А., Холмянский М.А.* Поддонная криолитозона Баренцева, Карского и Белого морей // Материалы Третьей конференции геокриологов России, т. 3, М., Изд-во МГУ, 2005, с. 184-190.

*Новиков И.И.* Термодинамика: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1984, с. 563-568.

Освоение низкопотенциального геотермального тепла. / Под ред. академика *В.Е. Фортова*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.- с. 31-35.

*Песоцкий Д.Г.* Программа расчета теплового взаимодействия сооружений с многолетнемерзлыми грунтами Qfrost. Свидетельство № 2016614404. Государственный реестр программ для ЭВМ, 22.04.16.

*Порхаев Г.В., Валерштейн Р.Л., Ерошенко В.Н., Миндич А.Л., Миренбург Ю.С., Хрусталеv Л.Н.* Здание, возводимое на вечномерзлых грунтах. А.С. № 480803, бюл., № 30, 1975.

*Прохоров В.М.* Зависимость скорости диффузии  $^{90}\text{Sr}$  от влажности почв // Почвоведение, 1965, № 10, с. 61-63

*Потрашков Г.Д., Хрусталеv Л.Н.* О влиянии текстуры оттаявших глинистых грунтов на их прочность и фильтрационные свойства // Изв. Сибирского отд. А.Н. СССР, № 1, 1961, с. 12-19

*Пустовойт Г.П., Барке В.В., Венкстерн А.А., Хрусталеv Л.Н.* Программа расчета промерзания и оттаивания дисперсных горных пород (грунтов) с учетом фазовых переходов влаги в диапазоне отрицательных температур (кривых незамерзшей воды) 3dTERM // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662541, 2015. Сертификат соответствия PROOCRU.0001. 11СП15

*Росьянов С.П., Виноградова В.К., Геденов Л.И.* О миграции стронция-90 по профилю почвы // Почвоведение, 1971, № 6, с. 29-34

*Смирнов В.Д., Городецкий С.Э., Хрусталеv Л.Н.* Способ создания ледяной опоры. А.С. № 914712, бюл., № 13, 1982.

*Смирнов В.Д., Городецкий С.Э., Хрусталеv Л.Н.* Способ создания ледяной опоры. А.С. № 1084364, бюл., № 13, 1984.

*Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В.* Физико-географические закономерности формирования искусственных фирново-ледяных массивов // Лёд и Снег, 2014, № 2 (126), с 113-119.

СП 58.3330.2012 Гидротехнические сооружения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003.

СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*.

Справочник по гидравлике под об. ред. *В.А. Большакова*. Киев. Высшая школа, 1972. 279 с.

*Хрусталева Л.Н., Максимов Н.Г.* Способ возведения здания, сооружения. А.С. № 673703, 1979

*Хрусталева Л.Н., Городецкий С.Э., Садовский А.В.* Способ возведения ледяной платформы. А.С. № 1092241, бюл., № 18, 1984.

*Хрусталева Л.Н., Никифоров В.В.* Стабилизация вечномёрзлых грунтов в основании зданий. Новосибирск: Наука, 1990. 209 с.

*Хрусталева Л.Н., Дмитриев С.А., Ткаченко А.В., Прозоров Л.Б., Баринов А.С., Пармузин С.Ю., Ткачев Е.И., Еришов Э.Д.* Железобетонное хранилище радиоактивных отходов // Патент № 2242813, бюл., № 35, 2004

*Хрусталева Л.Н.* Основы геотехники в криолитозоне. Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2005. 544 с.

*Хрусталева Л.Н., Чувилин Е.М., Гунар А.Ю.* Устройство для ликвидации тепловых потоков от добывающей скважины в многолетнемерзлые породы. Патент на полезную модель № 156025, бюл., № 30, 2015.

*Хрусталева Л.Н., Хилимонюк В.З., Перльштейн Г.З., Каманин Д.В.* Поверхностный фундамент сооружения, обеспечивающий сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии с одновременным обогревом сооружения // Патент № 2583025, бюл., № 12, 2016.

*Хрусталева Л.Н., Хилимонюк В.З.* Поверхностный фундамент для одноэтажного здания на многолетнемерзлых грунтах. // Патент № 2645035, бюл., № 5, 2018.

*Цытович Н.А.* К вопросу расчета фундамента сооружений, возводимых на вечной мерзлоте. Л.: Гипромез, 1928.

*Чжан А.А., Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н., Шестернев Д.М.* Новый способ защиты мерзлых грунтов основания насыпи от оттаивания // Криосфера Земли, т.22, №3. С. 67-71.

*Чжан А. А.* Расчет положения верхней границы многолетнемерзлых грунтов в теле и основании земляного полотна при наличии теплоизоляции на откосах // Криосфера Земли. 2019. т. 23, № 4. С. 54–59.

*Шестаков В.М.* Динамика подземных вод. М., Изд-во МГУ, 1979, 368 с

*Brandon D.B.* Developing mathematical models for computer control //Instrument Society of America (ISA) Journal. 1959. V. 6. № 7. P. 70-73.

**Л.Н. Хрусталеv**

**ИННОВАЦИОННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И КОНСТРУКЦИИ В ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ**

**Монография**

Подписано в печать 11.09.2019.  
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 9,5.  
Тираж 1000 экз.

ООО «Русайнс».  
117218, г. Москва, ул. Кедрова, д. 14, корп. 2.  
Тел.: +7 (495) 741-46-28.  
E-mail: [autor@ru-science.com](mailto:autor@ru-science.com)  
<http://ru-science.com>

