

Л.Н. Хрусталев

**ЭЛЕКТРОННОЕ ПОСОБИЕ
ПО РАСЧЕТУ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ
С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ**

(для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению 511000 «Геология»
и специальности 011400 «Гидрогеология и инженерная геология»)

г. Александров
2020

УДК 55
ББК 26.35
ISBN 978-5-6044794-1-4
Х95

Хрусталеv Л.Н. Электронное пособие по расчету теплового взаимодействия инженерных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами. - Чехов: ЦОиНК. - 2020. - 34с.

ISBN 978-5-6044794-1-4



9 785604 479414

©Хрусталеv. Л.Н., 2020
©ЦОиНК (ИП Трусова Л.А.), оформление, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	5
Описание расчетов, используемых в макросах.	6
Макрос 1. Определение времени образования заданного радиуса промерзания талого грунта вокруг замораживающей колонки.	6
Макрос 2. Оттаивание многолетнемерзлых грунтов вокруг нагревателя (электролитического или закрытой паровой иглы).	7
Макрос 3. Оттаивание многолетнемерзлых грунтов пропусканием через них электротока или пара).....	8
Макрос 4. Расчет модуля вентиляции проветриваемого подполья, устраиваемого под зданием с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии.....	9
Макрос 5. Расчет устанавливаемой под зданием трубчатой охлаждающей системы.....	11
Макрос 6. Оттаивание под зданием с полами по грунту на участке, где слой сезонного промерзания сливается с многолетнемерзлыми грунтами.	14
Макрос 7. Оттаивание мерзлого грунта под зданием с полами по грунту на участке, где слой сезонного промерзания не сливается с многолетнемерзлыми грунтами.....	15
Макрос 8. Определение глубины предварительного оттаивания под зданием.	16
Макрос 9. Расчет глубины оттаивания ММГ под зданием с полами по грунту и установленным по его периметру охлаждающим контуром.....	18
Макрос 10. Стабилизация начального положения кровли ММГ в основании здания с помощью вентилируемого подполья... ..	19
Макрос 11. Расчет оттаивания грунта вокруг подземного трубопровода.....	24

Макрос 12. Расчет глубины оттаивания многолетнемерзлых грунтов под подземным трубопроводом с охлаждающим контуром.....	25
Макрос 13. Расчет мощности рабочего (защитного) слоя автомобильных и железных дорог.....	27
Макрос 14. Расчет глубины оттаивания ММГ под дорогой с охлаждающим контуром и теплоизоляцией на откосах и гребне.....	28
Макрос 15. Расчет глубины оттаивания ММГ под дорогой с теплоизоляцией на поверхности земляного полотна.....	30
Макрос 16. Определение времени образования заданного радиуса оттаивания многолетнемерзлого грунта вокруг добычной скважины.....	32
Приложения.....	34

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга является электронной интерпретацией расчетной части книги автора Основы геотехники в криолитозоне: Учебник – Изд-во МГУ, 2005. 544 с. , касающейся прогноза теплового взаимодействия инженерных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами, а также книги автора Инновационные строительные технологии и конструкции в области распространения многолетнемерзлых грунтов: Монография – Изд-во РУСАЙНС, 2019. 152 с., касающейся той же тематики. В ней пользователь найдет 16 компьютерных программ (макросов) написанных на языке Visual Basic Application с использованием платформы Excel 2007 (VBA Excel). Чтобы их посмотреть, следует на листе Excel, соответствующего выбранному макросу, в командной строке нажать клавишу «Разработчик» и далее клавишу «Visual Basic». Программы готовы к практическому применению, для чего пользователь должен выполнить всего две крайне простых операции: заполнить своими исходными данными желтое поле на листе Excel и сделать один клик мышкой на кнопке, помещенной в верхней части листа. Результат расчета можно будет прочитать на сером поле этого листа.

Что касается самих формул, по которым производится расчет, то их вывод дается в перечисленных книгах, если он сделан автором, или там же приводятся ссылки на литературу, где этот метод излагается.

Автор надеется, что эта книга позволит сэкономить массу полезного времени всех, кто занимается указанными выше расчетами.

Доступ к электронной версии пособия и расчетным макросам осуществляется по ссылке:

<https://yadi.sk/d/qzeU6oALRArTVg>

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МАКРОСАХ

Макрос 1. Определение времени образования заданного радиуса промерзания талого грунта вокруг замораживающей колонки.

Цель расчета – определить время промерзания t_f в зависимости от заданного радиуса r_f . Расчет осуществляется по ниже следующей цепочке формул.

$$t_f = \frac{L_v \cdot (r_f^2 - r_s^2)}{A(r_f)}, \quad (1.1)$$

$$A(r_f) = \lambda_f \cdot (T_{bf} - T_{in}) \cdot \frac{\operatorname{li}\left(\frac{r_f}{r_p} \cdot e^b\right) - \operatorname{li}\left(\frac{r_s}{r_p} \cdot e^b\right)}{\frac{r_f - r_p}{2 \cdot r_p} \cdot e^b} - 1.07 \cdot \lambda_{th} \cdot (T_0 - T_{bf}), \quad (1.2)$$

$$b = \lambda_f \cdot R_{in} / r_p, \quad (1.3)$$

где $\operatorname{li}(x)$ – интегральный логарифм, $\operatorname{li}(x) = \int_0^x \frac{du}{\ln(u)}$; r_f – заданный

радиус промерзания, м; r_p, r_s – радиус замораживающей колонки и скважины, в которую она погружена, м; λ_f, λ_{th} – коэффициент теплопроводности мерзлого и талого грунта, Вт/(м⁰С); L_v – удельные затраты тепла на промораживание талого грунта, Вт·ч/м³; T_{in}, T_0, T_{bf} – температура, соответственно, рабочего тела колонки, талого грунта, промерзания грунта, °С; R_{in} – внутреннее термическое сопротивление колонки теплообмену, определяется в зависимости от способа замораживания по формулам (3.7) – (3.9) Учебника, м²·°С/Вт; t_f – определяемое расчетом время замораживания, ч.

Макрос 2. Оттаивание многолетнемерзлых грунтов вокруг нагревателя (электролитического или закрытой паровой иглы).

Цель расчета – определить время оттаивания t_{th} в зависимости от заданного радиуса r_{th} . Расчет осуществляется по ниже следующей цепочке формул.

$$t_{th} = \frac{L_v \cdot (r_{th}^2 - r_s^2)}{A(r_{th})}, \quad (2.1)$$

$$A(r_{th}) = \lambda_f \cdot (T_{in} - T_{bf}) \cdot \frac{li\left(\frac{r_{th}}{r_p} \cdot e^b\right) - li\left(\frac{r_s}{r_p} \cdot e^b\right)}{\frac{r_{th} - r_p}{2 \cdot r_p} \cdot e^b} - 1.07 \cdot \lambda_{th} \cdot (T_0 - T_{bf}), \quad (2.2)$$

$$b = \lambda_f \cdot R_{in} / r_p, \quad (2.3)$$

где $li(x)$ – интегральный логарифм, $li(x) = \int_0^x \frac{du}{\ln(u)}$; r_{th} – заданный радиус оттаивания, м; r_p, r_s – радиус нагревателя и скважины, в которую он погружен, м; λ_f, λ_{th} – коэффициент теплопроводности мерзлого и талого грунта, Вт/(м⁰С); L_v – удельные затраты тепла на оттаивание мерзлого грунта, Вт·ч/м³; T_{in} – температура рабочего тела нагревателя, принимается 99 и 130 °С, соответственно, для воды и пара; T_0, T_{bf} – температура, соответственно, мерзлого грунта и его оттаивания, °С; R_{in} – внутреннее термическое сопротивление нагревателя теплообмену, принимается 0.009 и 0.04 м²·°С/Вт, соответственно, для воды и пара; t_{th} – определяемое расчетом время оттаивания, ч.

Макрос 3. Оттаивание многолетнемерзлых грунтов пропусканьем через них электротока или пара).

Цель расчета – определить время оттаивания t_{th} в зависимости от заданного радиуса r_{th} . Расчет осуществляется по ниже-следующим формулам.

В случае пропускания через грунт электротока:

$$t_{th} = D \left\{ 0.5(1 - k_e)^2 \left[\left(\frac{r_{th}}{r_e} \right)^2 \left(\ln \frac{r_{th}}{r_e} - 0.5 \right) - \left(\frac{r_w}{r_e} \right)^2 \left(\ln \frac{r_w}{r_e} - 0.5 \right) \right] + k_e(1 - k_e) \frac{r_{th}^2 - r_w^2}{r_e^2} \ln \frac{r_{th}}{r_e} + k_e^2 \Delta \ln^2 \frac{r_{th}}{r_e} \right\} \quad (3.1)$$

$$\Delta = l_i \left(\frac{r_{th}}{r_e} \right)^2 - l_i \left(\frac{r_w}{r_e} \right)^2, \quad (3.2)$$

$$D = 1.03 \left(\ln^3 \frac{l_{e,a}}{l_e} + 5.18 \right) \rho_e r_e^2 L_v / U^2, \quad (3.3)$$

где $li(x)$ – интегральный логарифм, $li(x) = \int_0^x \frac{du}{\ln(u)}$; r_e , r_w – радиусы электрода и буровой скважины, м; k_e – отношение удельного электрического сопротивления мерзлого грунта к удельному электрическому сопротивлению талого грунта; l_e , $l_{e,a}$ – длина электрода и длина его неизолированной части, м; ρ_e – удельное электрическое сопротивление талого грунта, Ом · м; U – электрическое напряжение, В; r_{th} – задаваемый радиус оттаивания, м; L_v – удельные затраты тепла на оттаивание мерзлого грунта, Вт·ч/м³; t_{th} – определяемое время оттаивания, ч.

В случае пропускания через грунт пара:

$$t_{th} = \frac{\pi \cdot r_{th}^2 \cdot l_{e,a} \cdot L_v}{\eta \cdot L_{0,st} \cdot q_{st}}, \quad (3.4)$$

где η – эмпирический коэффициент, учитывающий потери тепла на разогрев оттаянного грунта и потери тепла в атмосферу, для пароттаивания принимается равным 0.3.; $L_{0,st}$ – теплота

парообразования, 627 Вт·ч / кг м; q_{st} – расход пара на одну иглу, кг / ч; мерзлого грунта, кг / м³; остальные обозначения даны выше.

Макрос 4. Расчет модуля вентиляции проветриваемого подполья, устраиваемого под зданием с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии.

Цель расчета – определить модуль вентиляции M и термическое сопротивление перекрытия над проветриваемым подпольем R_0 . Расчет осуществляется по нижеследующей цепочке формул.

$$M = k_n \cdot \frac{T_{in} - T_{c,a} - (T_{c,a} - T_{out}) \cdot C + \psi}{1000 \cdot R_0 \cdot k_a \cdot v_a \cdot (T_{c,a} - T_{out})} \cdot \sqrt{1 + \chi}. \quad (4.1)$$

$$T_{c,a} = T_0^1 \cdot \frac{\lambda_{th}}{\lambda_f} + \frac{T_s \cdot t_s}{t_y} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{th}}{\lambda_f}\right), \quad (4.2)$$

$$R_0 = \frac{0.9 \cdot (T_{in} - T_{cold} \cdot T_{ca} / T_{out})}{\Delta T^H \cdot \alpha_{in}}, \quad (4.3)$$

$$C = \frac{F_u}{F_c} \cdot \frac{R_0}{R_u}, \quad (4.4)$$

$$\psi = \frac{R_0}{F_c \cdot t_y} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{l_{p_i}}{R_{p_i}} (T_{p_i} - T_{c,a}) \cdot t_{p_i}. \quad (4.5)$$

где M – модуль вентиляции (отношение площади всех вентиляционных отверстий к площади здания), б.р; R_0, R_u – термическое сопротивление перекрытия над проветриваемым подпольем и цоколя здания, м²·°С/Вт; T_0^1 – расчетная температура на поверхности грунта в подполье, принимается по данным табл. 1, °С; T_{in}, T_{ca}, T_{out} – среднегодовая температура, соответственно, в помещении над подпольем, в подполье, наружного воздуха, °С; T_s, T_{cold} – среднелетняя температура наружного воздуха и наиболее холодной пятидневки, °С; t_s, t_y – продолжительность летнего

периода и года, ч; v_a – среднегодовая скорость ветра, м/с; k_{Π} – коэффициент, зависящий от расстояния между зданиями l_c и их высоты $h_{зд}$ (при $l_c \geq 5 h_{зд}$ $k_{\Pi} = 1.0$, при $l_c = 4 h_{зд}$ $k_{\Pi} = 1.2$, при $l_c = 3 h_{зд}$ $k_{\Pi} = 1.5$); 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 $k_a = 0.29$); ΔT^H – нормированный температурный перепад между температурой пола и температурой воздуха в помещении, принимается для жилых и административных помещений равным $\Delta T^H = 2.5$ °С, для промышленных цехов $\Delta T^H = 1.0$ °С; α_{in} – коэффициент теплоотдачи от поверхности пола к воздуху в помещении, $\alpha_{in} = 6.5$ Вт/(м² °С); χ – коэффициент, учитывающий аэродинамическое сопротивление на входе-выходе в подполье, принимается для подполий с открытым цоколем равным 0.0, с продухами – 1.14, с вентиляционными каналами – 3.78, наличие жалюзийной решетки на входе в продухи и каналы увеличит последние две цифры, соответственно, до 3.14 и 5.78; λ_{th}, λ_f – коэффициенты теплопроводности грунта слоя сезонного оттаивания в талом и мерзлом состоянии, Вт/(м·°С); n – число сантехнических трубопроводов в проветриваемом подполье; $T_{pi}, R_{pi}, l_{pi}, t_{pi}$ – параметры i -того трубопровода, соответственно, температура перемещаемой жидкости в °С, термическое сопротивление кольцевой теплоизоляции (м⁰С/Вт), длина (м), время работы в году (ч).

Таблица 1 Значение температур $T_0^1 - T_{bf}$

Значения $T_0 - T_{bf}$, $^{\circ}\text{C}$	Ширина здания, м	Значение $T_0^1 - T_{bf}$ в $^{\circ}\text{C}$ для фундаментов				
		Столбчатых при z_d , м			Свайных при z_d , м	
		1	3	5	7	10 и более
- 0.5	12	- 10.0	- 3.5	- 5.0	- 3.0	- 2.5
	24	- 8.0	- 2.5	- 3.5	- 2.5	- 2.0
- 1.0	12	- 10.0	- 3.0	- 4.0	- 2.5	- 1.5
	24	- 8.0	- 2.5	- 3.5	- 2.0	- 1.5
- 2.0	12	- 9.0	- 2.0	- 3.0	- 1.5	- 1.0
	24	- 7.0	- 2.0	- 3.0	- 2.0	- 1.0
- 5.0	12	- 6.6	- 1.0	- 1.0	- 1.0	- 1.0
	24	- 6.0	- 1.0	- 2.0	- 1.0	- 1.0
- 8.0	12	- 3.0	- 1.0	- 1.0	- 1.0	- 1.0
	24	- 4.0	- 1.0	- 1.0	- 1.0	- 1.0

T_0, T_{bf} – температура грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов и промерзания-оттаивания грунта, $^{\circ}\text{C}$; z_d – глубина заложения фундамента, считая от подошвы слоя сезонного оттаивания, м.

Макрос 5. Расчет устанавливаемой под зданием трубчатой охлаждающей системы.

Целью расчета является определение параметров охлаждающей системы, соответствующих принятому значению T_0^1 (см. табл. 1). К параметрам охлаждающей системы относятся ее линейные размеры в м: радиус труб r_p , глубина заложения труб от поверхности пола здания h_p , расстояние между трубами (шаг установки) b_p , мощность подсыпки под зданием из

крупносkeletalного материала N_d , кроме того, в системах вентилируемых наружным воздухом, - минимальная скорость воздуха в трубах, при котором обеспечивается необходимый отвод тепла от здания v_{\min} в м/ч. Расчет ведется методом последовательных приближений. Вначале задаются частью параметров r_p , d_p , b_p , затем из решения совместных уравнений (5.1) – (5.11) находят T_0^1 . Если последняя соответствует принятому значению, то расчет прекращают, в противном случае корректируют расстояние между трубами b_p расчет повторяют. Завершают расчет вычислением недостающие параметры N_d и в случае вентиляционной системы охлаждения - v_{\min} .

$$T_0^1 = 0.5 \cdot T_{cp} \cdot t_w / t_y, \quad (5.1)$$

$$T_{cp} = - \frac{\lambda_{d,th} \cdot T_{in} \cdot (h_0 - y)}{\lambda_{d,f} \cdot y}, \quad (5.2)$$

$$h_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{d,th} \cdot T_{in} \cdot t_s}{L_{d,v}} \cdot (1 + 0.033 \cdot T_0^1)^2 + y^2}, \quad (5.3)$$

$$y = (y_1 + y_2) / 2, \quad (5.4)$$

$$\frac{1}{A} \cdot \ln \frac{\text{sh}\left(\pi \cdot \frac{H_0 + Y_1}{B_p}\right)}{\text{sh}\left(\pi \cdot \frac{H_0 - Y_1}{B_p}\right)} = \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad (5.5)$$

$$\frac{1}{A} \cdot \ln \frac{\text{ch}\left(\pi \cdot \frac{H_0 + Y_2}{B_p}\right)}{\text{ch}\left(\pi \cdot \frac{H_0 - Y_2}{B_p}\right)} = \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad (5.6)$$

$$A = \ln \left[\frac{2 \cdot B_p}{\pi} \cdot \text{sh}\left(\pi \cdot \frac{2 \cdot H_0 - 0.5}{B_p}\right) \right], \quad (5.7)$$

$$\beta = - \frac{\lambda_{d,th} \cdot T_{in}}{\lambda_{d,f} \cdot T_p}, \quad (5.8)$$

Термосифоны:

$$T_p = \frac{\lambda_{d,th} \cdot T_{in} + 0.5 \cdot \lambda_{d,f} \cdot A \cdot Bi \cdot (T_w + \Delta T)}{\lambda_{d,f} \cdot (1 + 0.5 \cdot A \cdot Bi)}, \quad (5.9)$$

$$Bi = \frac{2 \cdot r_p \cdot k_h}{\lambda_{d,f} \cdot R_{in}}. \quad (5.10)$$

Вентиляционные трубы:

$$T_p = T_w + \frac{\Delta T}{2}, \quad (5.11)$$

где T_{in}, T_w – температура воздуха в помещениях и среднезимняя атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; t_w, t_y – продолжительность зимы и года, час; y_1, y_2 – расстояние от условной поверхности до границы промерзания над трубами в конце зимы, соответственно, над центром трубы и в середине между трубами, м; $H_0 = \frac{h_0}{2 \cdot r_p}$; $B_p = \frac{b_p}{2 \cdot r_p}$; $Y_1 = \frac{y_1}{2 \cdot r_p}$; $Y_2 = \frac{y_2}{2 \cdot r_p}$; ΔT – разность температур на входе и выходе из вентиляционной трубы, $^{\circ}\text{C}$; $\lambda_{d,th}, \lambda_{d,f}$ – коэффициенты теплопроводности материала подсыпки, соответственно, в талом и мерзлом состоянии, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$; $L_{d,v}$ – удельные затраты тепла на промерзание-оттаивание материала подсыпки, $\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$; R_{in} – термическое сопротивление термосифонов теплообмену, определяется по формулам (3.7) – (3.9) Учебника, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; k_h – безразмерный коэффициент, учитывающий снижение тепловосприятия термосифонов в результате их горизонтального расположения, определяется по табл. 3.3 Учебника.

$$H_d = h_0 - \lambda_{d,th} \cdot R_1, \quad (5.12)$$

$$v = \frac{\lambda_{d,f} \cdot (T_{in} - T_p) \cdot B}{2 \cdot A \cdot \Delta T \cdot \rho_v \cdot C_v \cdot r_p^2 \cdot \min} \quad (5.13)$$

где B – ширина здания, м; $R_1 = 1/6.5 + R_{\text{пол}}$; $R_{\text{пол}}$ – термическое сопротивление пола здания, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; ρ_v – плотность атмосферного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_v – теплоемкость атмосферного воздуха, $\text{Вт} \cdot \text{час}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Макрос 6. Оттаивание под зданием с полами по грунту на участке, где слой сезонного промерзания сливается с многолетнемерзлыми грунтами.

Цель расчета – определить глубину оттаивания под серединой здания H_c и на произвольном от нее расстоянии H_x . Расчет осуществляется по нижеприведенным формулам и уравнениям.

$$H_c = \xi_c \cdot b_{зд}, \quad (6.1)$$

где H_c – глубина оттаивания под серединой здания, считая от поверхности грунта, м; $b_{зд}$ – ширина здания, м; ξ_c – относительная глубина оттаивания под серединой здания, определяется из интегрального уравнения (3.2)

$$J - \int_0^{\xi_c} \frac{du}{F_1(u)} = 0, \quad (6.2)$$

$$J = \frac{\lambda_{th} \cdot (T_1 - T_{bf}) \cdot t}{L_v \cdot b_{зд}^2}, \quad (6.3)$$

$$F_1(u) = \frac{1}{u^2 + 0.25} \cdot \left[\frac{1}{\pi - 2 \cdot \arctg(1/2u)} - \frac{\beta}{2 \cdot \arctg(1/2u)} \right], \quad (6.4)$$

$$\beta = - \frac{\lambda_f \cdot (T_0 - T_{bf})}{\lambda_{th} \cdot (T_1 - T_{bf})}, \quad (6.5)$$

где T_1, T_0, T_{bf} – температура, соответственно, на поверхности грунта под зданием, на глубине нулевых годовых теплооборотов; оттаивания грунта, $^{\circ}\text{C}$; λ_{th}, λ_f – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$; L_v – удельная теплота оттаивания грунта, $\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$; t – время, ч.

$$C = \frac{\left(\frac{H_c}{b_{зд}}\right)^2 - \frac{1}{4}}{\frac{H_c}{b_{зд}}}, \quad (6.6)$$

$$R = H_c - C, \quad (6.7)$$

$$H_x = C + \sqrt{R^2 - x^2}, \quad (6.8)$$

где C – расположение по вертикали расположение центра чаши оттаивания, отсчет ведется от поверхности грунта, м; R – радиус чаши оттаивания, м; H_x – глубина оттаивания на расстоянии x (по горизонтали) от середины здания.

Макрос 7. Оттаивание мерзлого грунта под зданием с полами по грунту на участке, где слой сезонного промерзания не сливается с многолетнемерзлыми грунтами.

Цель расчета – определить глубину оттаивания под серединой здания H_c и на произвольном от нее расстоянии H_x . Расчет осуществляется по нижеприведенным формулам и уравнениям.

$$H_c = \xi_c \cdot b_{зд}, \tag{7.1}$$

где H_c – глубина оттаивания под серединой здания, считая от поверхности грунта, м; $b_{зд}$ – ширина здания, м; ξ_c – относительная глубина оттаивания под серединой здания, определяется из интегрального уравнения (4.2)

$$J - \int_0^{\xi_c} \frac{du}{F(u)} = 0, \tag{7.2}$$

$$J = \frac{\lambda_{tth} \cdot (T_1 - T_{bf}) \cdot t}{L_v \cdot b_{зд}^2}, \tag{7.3}$$

$$F(u) = \frac{1}{\pi} \cdot (F_1 - F_2), \tag{7.4}$$

где

$$F_1 = \frac{1}{u} \cdot \left[\arctg \frac{\exp(0.5 \cdot \delta) - \cos(\delta \cdot u)}{\sin(\delta \cdot u)} - \arctg \frac{\exp(-0.5 \cdot \delta) - \cos(\delta \cdot u)}{\sin(\delta \cdot u)} \right];$$

$$F_2 = \delta \cdot \left[\frac{1 - \exp(0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)}{1 + \exp(\delta) - 2 \cdot \exp(0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)} - \frac{1 - \exp(-0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)}{1 + \exp(-\delta) - 2 \cdot \exp(-0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)} \right];$$

$\delta = \frac{\pi}{5 \cdot u - 4 \cdot \xi_0}$; $\xi_0 = \frac{H_0}{b_{зд}}$; T_1 – расчетная температура поверхности грунта под зданием, определяется по формуле (8.4) при $T_0 = T_{bf}$, °C; T_{bf} – температура таяния грунта, °C; t – время, ч; λ_{tth} – коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/(м·°C);

L_v – удельная теплота таяния грунта, Вт.ч/м³; H_0 – начальное положение кровли многолетнемерзлых грунтов, м.

$$H_x = 0.765 \cdot (1.106 - 0.354 \cdot \alpha) \cdot (0.978 + 0.118 \cdot \beta) \cdot \xi_0^{0.011} \cdot H_c, \quad (7.5)$$

где $\alpha = x/b_{зд}$; $\beta = H_c/b_{зд}$; x – расстояние по горизонтали от середины здания, м.

Макрос 8. Определение глубины предварительного оттаивания под зданием.

Цель расчета – определить глубину предварительного оттаивания под зданием H_0 , при которой последующее оттаивание многолетнемерзлого грунта в процессе эксплуатации не превысит допустимой величины ΔH . Последняя определяется по формуле:

$$\Delta H = \frac{s_u - s_p}{\Delta}, \quad (8.1)$$

s_u – предельно допустимая осадка здания, определяется по данным приложения 5 Учебника, м; s_p – осадка ленточного или столбчатого фундамента, определяется по формуле (5.49) Учебника, м; Δ – просадочность мерзлых грунтов при оттаивании (таблицы 2.5 и 2.6 Учебника), б.р.

Кроме того, начальная глубина залегания кровли ММГ H должна превосходить глубину заложения фундамента не менее чем на мощность зоны сжатия грунта, которая принимается равной 2 м., $H_0 \geq l + 2\text{м.}$

Начальное расположение кровли ММГ определяется по формуле (8.2):

$$H_0 = [k_\beta(\xi_0 + \Delta\xi_c) - \Delta\xi_c] \cdot b_{зд}, \quad (8.2)$$

где $\Delta\xi_c = \frac{\Delta H}{b_{зд}}$; k_β – поправочный коэффициент, учитывающий отток тепла в ММГ и определяемый по данным табл. 5.1 Учебника,

данные которой могут быть аппроксимированы формулой (5.2а); ξ_0 – параметр, определяемый из интегрального уравнения (5.3).

$$k_\beta = (0.476 - 0.299 \cdot \ln \beta) \cdot I_{th}^{-0.183}, \quad (8.2a)$$

где $I_{th} = \frac{\lambda_{th} \cdot (T_1 - T_{bf}) \cdot t_3}{L_v \cdot b_{3д}^2}$; $L_v = 93 \cdot \rho_{d,f} \cdot (w_{tot} - w_w)$; λ_{th} – коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/(м·°С); $\rho_{d,f}$ – плотность многолетнемерзлого грунта в сухом состоянии, кг/м³; w_{tot} , w_w – суммарная влажность многолетнемерзлого грунта и количество незамерзшей воды в нем, д.е.; $\beta = \frac{\lambda_f \cdot (T_{bf} - T_0)}{\lambda_{th} \cdot (T_1 - T_{bf})}$; λ_f – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°С); T_{bf} – температура таяния грунта, °С; T_0 – температура грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов, для участков с не слитой мерзлотой принимается равной T_{bf} ; T_1 – расчетная температура на поверхности грунта под зданием, определяется по формуле (8.4).

$$\int_{\xi_0}^{\xi_c} \frac{du}{F(u)} - I_{th} = 0, \quad (8.3)$$

где $F(u) = \frac{1}{\pi} \cdot (F_1 - F_2)$;

$$F_1 = \frac{1}{u} \cdot \left[\arctg \frac{\exp(0.5 \cdot \delta) - \cos(\delta \cdot u)}{\sin(\delta \cdot u)} - \arctg \frac{\exp(-0.5 \cdot \delta) - \cos(\delta \cdot u)}{\sin(\delta \cdot u)} \right];$$

$$F_2 = \delta \cdot \left[\frac{1 - \exp(0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)}{1 + \exp(\delta) - 2 \cdot \exp(0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)} - \frac{1 - \exp(-0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)}{1 + \exp(-\delta) - 2 \cdot \exp(-0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)} \right];$$

$$\delta = \frac{\pi}{5 \cdot u - 4 \cdot \xi_0}; \quad \xi_0 = \frac{H_0}{b_{3д}}; \quad \xi_c = \xi_0 + \Delta \xi_c;$$

$$T_1 = \frac{a_1 \cdot T_{in} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{th}} \cdot a_2 \cdot T_0}{a_1 + a_2}, \quad (8.4)$$

где T_{in} – температура воздуха в помещении, °С; a_1, a_2 – вспомогательные безразмерные коэффициенты.

$$a_1 = b_{3д} / \left(\frac{1}{\alpha_{in}} + R_1 \right), \quad (8.5)$$

$$a_2 = \frac{2 \cdot \lambda_{th}}{\pi} \cdot \ln \frac{b_{30} - \delta_{ц}}{\delta_{ц}}, \quad (8.6)$$

где R_1 – термическое сопротивление пола здания, лежащего на поверхности грунта, Вт/(м²·°C); α_{in} – коэффициент теплообмена между воздухом в помещении и поверхностью пола, принимается равным 6.5 м²·°C/Вт; $\delta_{ц}$ – полуширина цокольного ограждения, м (при его отсутствии принимается равной 0.4 м).

Макрос 9. Расчет глубины оттаивания ММГ под зданием с полами по грунту и установленным по его периметру охлаждающим контуром.

Цель расчета – определить стационарную глубину оттаивания под серединой H_c и краем здания H_k . Указанные величины находятся из решения трансцендентного уравнения (9.1).

$$0 = (T_1 - T_{bf}) \cdot f_1(x_0, y_0) + (T_c - T_{bf}) \cdot f_2(x_0, y_0) + (T_0 - T_{bf}) \cdot (1 - f_1(x_0, y_0) - f_2(x_0, y_0)), \quad (9.1)$$

где x_0, y_0 – координаты границы оттаивания, м; T_1, T_c, T_0, T_{bf} – температура, соответственно, расчетная на поверхности грунта под зданием, на охлаждающем контуре, на глубине нулевых годовых теплооборотов, оттаивания грунта, град; $f_1(x_0, y_0), f_2(x_0, y_0)$ – координатные функции.

$$f_1(x_0, y_0) = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{\sin(k \cdot B/2) - u}{v} + \operatorname{arctg} \frac{\sin(k \cdot B/2) + u}{v} \right), \quad (9.2)$$

$$f_2(x_0, y_0) = \frac{1}{\pi} \cdot \left(-\operatorname{arctg} \frac{1+u}{v} - \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{ch}(k \cdot l_e) + u}{v} + \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{ch}(k \cdot l_e) - u}{v} - \operatorname{arctg} \frac{1-u}{v} \right), \quad (9.3)$$

где $k = \frac{\pi}{Re}$ $u = \sin(k \cdot x_0/2) \cdot \operatorname{ch}(k \cdot y_0/2)$; $v = \cos(k \cdot x_0/2) \cdot \operatorname{sh}(k \cdot y_0/2)$.

$$T_c = \frac{C_1 \cdot T_e + (C_2 + 2 \cdot C_3) \cdot T_0 - C_2 \cdot T_1}{C_1 + 2 \cdot C_3}, \quad (9.4)$$

$$C_1 = \frac{\pi \cdot d_e \cdot l_e}{R_{in} \cdot \lambda_f \cdot h_e}, \quad (9.5)$$

где T_e – среднегодовая температура рабочего тела термосифона, определяется по формуле (9.8), $^{\circ}\text{C}$; d_e, l_e, h_e – соответственно, диаметр термосифона, длина его подземной части и шаг расстановки, м; R_{in} – внутреннее термическое сопротивление термосифона теплообмену, определяется по формуле (3.7) и таблице 3.2 Учебника, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; λ_f – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

$$C_2 = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{(\sin(k \cdot l_e) + \text{ch}(k \cdot (l_e - \delta))) \cdot (\text{ch}(k \cdot \delta) - \sin(k \cdot B/2))}{(\text{ch}(k \cdot (l_e - \delta)) - \sin(k \cdot B/2)) \cdot (\text{ch}(k \cdot \delta) + \sin(k \cdot B/2))} \right), \quad (9.6)$$

$$C_3 = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{(\text{ch}(k \cdot l_e) + \text{ch}(k \cdot (l_e - \delta))) \cdot (\text{ch}(k \cdot l_e) - \text{ch}(k \cdot (l_e - \delta)))}{(\text{ch}(k \cdot l_e) - \text{ch}(k \cdot (l_e - \delta))) \cdot (\text{ch}(k \cdot l_e) + \text{ch}(k \cdot \delta))} \times \frac{(\text{ch}(k \cdot (l_e - \delta)) - 1) \cdot (\text{ch}(k \cdot \delta) + 1)}{(\text{ch}(k \cdot (l_e - \delta)) + 1) \cdot (\text{ch}(k \cdot \delta) - 1)} \right), \quad (9.7)$$

где δ – толщина стенки испарителя термосифона, м; остальные обозначения приведены выше.

$$T_e = \frac{(T_{air} + 1) \cdot t_w + T_{bf} \cdot t_s}{t_w + t_s}, \quad (9.8)$$

где T_{air} – среднезимняя температура атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; t_w, t_s – продолжительность зимнего и летнего периодов, ч.

Макрос 10. 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 , где y и ΔH определяются по формулам:

$$y = d_f + 1\text{м}, \quad (10.1)$$

d_f – максимальная глубина сезонного промерзания грунта, определяется по формуле (10.10), м

$$\Delta H = \frac{s_u - s_p}{\delta}, \quad (10.2)$$

s_u – предельно допустимая осадка здания, определяется по данным приложения 5 Учебника, м; s_p – осадка свайного фундамента, определяется по формуле (5.49) Учебника, как для условного столбчатого или ленточного фундамента, при этом границы условного фундамента определяются в соответствии со схемой на рис. 5.26 Учебника, м; δ – просадочность мерзлых грунтов при оттаивании (таблицы 2.5 и 2.6 Учебника), б.р.

Кроме того, начальная глубина залегания кровли ММГ H должна превосходить длину подземной части свай не менее чем на мощность зоны сжатия грунта, которая принимается равной 2 м., $H \geq l + 2\text{м}$. В свою очередь, l определяется расчетом из двух условий – несущей способности сваи в талых грунтах и ее устойчивости на действие сил пучения, формулы (5.58) и (5.59) Учебника.

Модуль вентиляции подполья здания, возводимого способом стабилизации, определяют по формуле (10.3):

$$M = k_n \frac{T_{in} - T_{c,a} - (T_{c,a} - T_{air})C}{1000R_0k_a v_a (T_{c,a} - T_{air})} \cdot \sqrt{1 + \chi}, \quad (10.3)$$

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, °С; $T_{c,a}$ – температура воздуха в подполье, определяемая по формуле (10.6), °С; 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 по формуле (10.4); 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; χ – суммарный коэффициент потерь аэродинамического напора в вентиляционном канале или отверстии, определяется по формуле (10.5).

$$C = \frac{F_u}{F_c} \cdot \frac{R_0}{R_u}, \quad (10.4)$$

где F_u и F_c – площадь цоколя и здания в плане (пятна здания), м^2 ; R_u – термическое сопротивление теплопередаче цоколя, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

$$\chi = \sum_{j=1}^{m1} \chi_j, \quad (10.5)$$

где $m1$ – число участков; χ_j – коэффициент, учитывающий потерю аэродинамического напора на j -ом участке, принимается по данным табл. 2.

Таблица 2. Значение коэффициента, учитывающего потерю аэродинамического напора

Участок	χ_j
Вход с сужением потока	0.50
Жалюзийная решетка	2.00
Поворот потока на 90°	1.32
Выход с расширением потока	0.64

$$T_{c,a} = -\frac{\lambda_f^*}{\lambda_{th}^* \cdot \beta_f} \cdot (T_0^{min_{bf} \beta_f a}, \quad (10.6)$$

где T_0^{min} минимальная среднегодовая температура грунта возле здания на подошве слоя сезонного промерзания-оттаивания, определяется по формуле (10.7), $^{\circ}\text{C}$; T_{bf} - температура промерзания-оттаивания грунта, $^{\circ}\text{C}$; λ_{th}^* , λ_f^* - теплопроводность грунта в талом и мерзлом состояниях слоя сезонного промерзания-оттаивания, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$; β_f - безразмерный коэффициент, определяется из решения трансцендентного уравнения (10.11); σ_a - среднеквадратическое отклонение средней годовой температуры воздуха в подполье, принимается по данным натурных наблюдений, а при их отсутствии принимается равной 1°C .

$$T_0^{min} \frac{1}{t_y} \left\{ T_w(t_y - t_s) + L_v^* \cdot d_{th} \cdot \left[\frac{d_{th}}{2 \cdot \lambda_f^*} + \theta^* \cdot (1 - 1.05 \cdot k_v) \cdot R_s \right] \right\} \quad (10.7)$$

где t_y - продолжительность года, 8760 ч; t_s - продолжительность летнего периода, ч; T_w - среднезимняя температура атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; L_v^* - удельная теплота фазового перехода грунтовой влаги в слое сезонного промерзания-оттаивания, определяется по формуле (10.8), $\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$; d_{th} - глубина сезонного оттаивания, определяется по формуле (10.9), м; θ^* - 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 ветра менее 5 м/с $\theta^* = 1.0$; k_v - коэффициент вариации снежных отложений (определяется по данным натурных наблюдений, а при их отсутствии принимается равным 0.2); R_s - среднее зимнее термическое сопротивление снежного покрова, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

$$L_v^* = 93 \cdot \rho_d \cdot w + 0.5 \cdot (C_{th} \cdot T_s - C_f \cdot T_w), \quad (10.8)$$

где ρ_d – плотность сухого грунта слоя сезонного промерзания-оттаивания, кг/м³, w – влажность грунта, дол. ед.; C_{th}, C_f – теплоемкость грунта в талом и мерзлом состоянии, ВТ.ч/(м³.°С); T_s – среднелетняя температура атмосферного воздуха, °С.

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th}^* \cdot (T_s - T_{bf}) \cdot t_s}{L_v^*}}. \quad (10.9)$$

$$d_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f^* \cdot (T_{bf} - T_w) \cdot (t_y - t_s)}{L_v^*}}. \quad (10.10)$$

$$a \cdot I_f^b - \xi_f = 0, \quad (10.11)$$

где $a = 0.518 \cdot \ln(\beta_f) + 0.404$; $b = 0.505 \cdot \beta_f^{-0.2}$; $I_f = -\frac{\lambda_f \cdot T_0^{min_3}}{L_v^* \cdot b_{зд}^2}$;

$\xi_f = \frac{y}{b_{3д}}$; t_3 – время эксплуатации здания, ч; $b_{зд}$ – ширина здания,

м.

Начальное расположение кровли ММГ определяется по формуле (10.12):

$$H = \xi_0 \cdot b_{зд}, \quad (10.12)$$

где ξ_0 – параметр, определяемый из интегрального уравнения (10.13):

$$\int_{\xi_0}^{\xi_c} \frac{du}{F(u)} - I_{th} = 0, \quad (10.13)$$

где $F(u) = \frac{1}{\pi} \cdot (F_1 - F_2)$;

$$F_1 = \frac{1}{u} \cdot \left[\arctg \frac{\exp(0.5 \cdot \delta) - \cos(\delta \cdot u)}{\sin(\delta \cdot u)} - \arctg \frac{\exp(-0.5 \cdot \delta) - \cos(\delta \cdot u)}{\sin(\delta \cdot u)} \right];$$

$$F_2 = \delta \cdot \left[\frac{1 - \exp(0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)}{1 + \exp(\delta) - 2 \cdot \exp(0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)} - \frac{1 - \exp(-0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)}{1 + \exp(-\delta) - 2 \cdot \exp(-0.5 \cdot \delta) \cdot \cos(\delta \cdot u)} \right];$$

$$\delta = \frac{\pi}{5 \cdot u - 4 \cdot \xi_0}; \quad \xi_0 = \frac{H}{b_{зд}}; \quad \xi_c = \xi_0 + \Delta \xi_c; \quad \Delta \xi_c = \Delta H / b_{зд};$$

$I_{th} = \frac{\lambda_{th} \cdot (T_{c,a} + 1.05 \cdot \sigma_a) \cdot t_{э}}{L_v \cdot b_{зд}^2}$; $L_v = 93 \cdot \rho_{d,f} \cdot (w_{tot} - w_w)$; λ_{th} – коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/(м·°С); $\rho_{d,f}$ – плотность многолетнемерзлого грунта в сухом состоянии, кг/м³; w_{tot} , w_w – суммарная влажность многолетнемерзлого грунта и количество незамерзшей воды в нем, д.е.; остальные обозначения даны выше.

Макрос 11. Расчет оттаивания грунта вокруг подземного трубопровода.

Цель расчета – определить глубину оттаивания грунта под серединой трубопровода H_c и на расстоянии x от его середины H_x (отсчет глубины ведется от дневной поверхности), а также радиус оттаивания вокруг трубопровода r_{th} на момент времени t_{th} . Расчет осуществляется по нижеследующей цепочке формул.

$$H_c = \xi \cdot r_{ins}, \quad (11.1)$$

где r_{ins} – радиус трубопровода с кольцевой теплоизоляцией, м; ξ – безразмерная глубина оттаивания под серединой трубопровода, определяется из интегрального уравнения (11.2).

$$J_t - \int_{m+1}^{\xi t} \frac{du}{F_4(u)} = 0, \quad (11.2)$$

$$J_t = \frac{\lambda_{th} \cdot (T_{ins} - T_{bf}) \cdot t_{th}}{L_v \cdot r_{ins}^2}, \quad (11.3)$$

$$F_4(u) = \frac{4 \cdot n}{u^2 - n^2} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot \ln(m+n) - \ln\left(\frac{u+n}{u-n}\right)^2} - \frac{\beta_T}{\ln\left(\frac{u+n}{u-n}\right)^2} \right], \quad (11.4)$$

$$\beta_T = - \frac{\lambda_f \cdot (T_0 - T_{bf})}{\lambda_{th} \cdot (T_{ins} - T_{bf})}, \quad (11.5)$$

$$m = h_p / r_{ins}, \quad n = \sqrt{m^2 - 1}, \quad (11.7)$$

$$r_{th} = \frac{H_c^2 - (h_p^2 + r_{ins}^2)}{H_c}, \quad (11.8)$$

$$y_A = \frac{H_c^2 + h_p^2 - r_{ins}^2}{2 \cdot H_c}, \quad (11.9)$$

$$H_x = y_A + \sqrt{r_{th}^2 - x^2}, \quad (11.10)$$

Где r_{ins} – радиус трубопровода с кольцевой изоляцией, м; h_p – расстояние от поверхности грунта до центра трубопровода, м; T_{ns}, T_0, T_{bf} – температура, соответственно, на поверхности кольцевой изоляции, на глубине нулевых годовых теплооборотов, °С; λ_{th}, λ_f – коэффициент теплопроводности талого и мерзлого грунта, Вт/(м·°С); L_v – удельная теплота таяния грунта, Вт.час/м³; y_A – расположение центра ореола оттаивания по вертикали (считая от поверхности грунта) под серединой трубопровода, м.

Макрос 12. Расчет глубины оттаивания многолетнемерзлых грунтов под подземным трубопроводом с охлаждающим контуром.

Цель расчета – определить глубину оттаивания под серединой трубопровода H_c (отсчет глубины производится от поверхности грунта) в зависимости от параметров охлаждающего контура. Расчет осуществляется по эмпирической формуле, полученной автором методом математического моделирования теплового взаимодействия подземного трубопровода с охлаждающим контуром и с вмещающими их мерзлыми грунтами. Постановка задачи, результаты моделирования, методика их аппроксимации элементарными математическими функциями и

аппроксимирующая зависимость представлены на страницах 52 – 57 Монографии. Здесь же мы приводим только окончательный результат.

$$H_c = \xi^\phi \cdot r_{ins}, \quad (12.1)$$

$$\xi^\phi = 2.559 \cdot \alpha^{0.407} \cdot \beta^{-0.013} \cdot (0.486 \cdot \ln \gamma + 2.114) \cdot (0.003 \cdot \ln \delta + 0.996), \quad (12.2)$$

$$\alpha = -\frac{\lambda_{th} \cdot (T_{ins} - T_{bf})}{\lambda_f \cdot (T_e - T_{bf})}; \quad \beta = \frac{T_0 - T_{bf}}{T_e - T_{bf}}; \quad \gamma = \frac{r_e}{r_{ins}}; \quad \delta = \frac{h_p}{r_{ins}}; \quad (12.3)$$

где T_{ins} – температура поверхности кольцевой изоляции, определяется по формулам

(3.12) – (3.15) Учебника, $^{\circ}\text{C}$; T_e – среднегодовая температура поверхности испарителя парожидкостного термосифона, определяется по формуле (12.4), $^{\circ}\text{C}$; T_0, T_{bf} – температура грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов и оттаивания грунта, $^{\circ}\text{C}$; r_{ins}, r_e, h_p – соответственно, радиус трубопровода с кольцевой теплоизоляцией, радиус термосифона, глубина заложения трубопровода, м.

ПРИМЕЧАНИЕ: Моделирование производилось при постоянных значениях соотношений $\frac{h_e}{r_e} = 47.244, \frac{l_e}{r_e} = 86.614, \frac{R_e}{r_e} = 31.496$, где h_e, l_e, R_e – соответственно, шаг расстановки термосифонов по обе стороны трубопровода, длина испарителя термосифона (подземной части), расстояние по горизонтали между серединой трубопровода и термосифоном.

И только при этих соотношениях справедлива выведенная аппроксимирующая зависимость.

$$T_e = \frac{(T_w + 1) \cdot t_w + T_{bf} \cdot t_s}{t_w + t_s}, \quad (12.4)$$

где T_w – среднезимняя температура атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{C}$;
 t_w, t_s – продолжительность зимнего и летнего периода, ч.

Макрос 13. Расчет мощности рабочего (защитного) слоя автомобильных и железных дорог.

Рассматривается 4-слойное дорожное сооружение. Первый от дневной поверхности слой в автомобильных дорогах представлен дорожным покрытием и балластной призмой в железных дорогах. Второй – подготовкой под покрытие. Третий – рабочий (защитный). Четвертый – основанием дороги. Основание в насыпях представлено кондиционным грунтом, в выемках и нулевых местах при отсутствии вырезки – естественным грунтом, при наличии – кондиционным. Целью расчета является определение мощности рабочего (защитного) слоя h_{wo} при наличии теплофизических характеристик всех 4-х слоев. Расчет осуществляется по нижеследующей цепочке формул.

$$h_{wo} = B - A, \quad (13.1)$$

$$B = H_3 + \sum_{i=1}^2 h_i \cdot (1 - H_3/H_i), \quad (13.2)$$

$$A = \min \left\{ \begin{array}{l} s_u [B / (\delta_4 \cdot H_4) - 1] \\ h_u \cdot B / (f_{c,4} \cdot H_4) \end{array} \right. , \quad (13.3)$$

$$H_i = (1 + 0,033T_{0,i}) \cdot (2\lambda_{th,i} \cdot \Omega_s / L_{v,i})^{1/2}, \quad (13.4)$$

$$T_{0,i} = (\Omega_w + \frac{\lambda_{th,i}}{\lambda_{f,i}} \cdot \Omega_s) / (t_w + t_s), \quad (13.5)$$

$$L_{v,i} = L_{w,i} + 0,5 \cdot \left(C_{th,i} \cdot \frac{\Omega_s}{t_s} - C_{f,i} \cdot \frac{\Omega_w}{t_w} \right), \quad (13.6)$$

$$L_{w,i} = L_0 \cdot \rho_{d,i} \cdot w_{tot,i}, \quad (13.7)$$

где H_i – максимально возможная глубина сезонного оттаивания i -го слоя подсыпки в предположении, что он бесконечен, м;
 h_i – мощность i -го слоя подсыпки, м; δ_4 – максимально возможная

относительная осадка грунтов основания при оттаивании (определяется по данным табл. 2.5, 2.6 Учебника); $f_{c,4}$ - модуль пучения промерзающих грунтов основания (определяется по данным табл. 7.3 Учебника); s_u - предельно допустимая деформация поверхности дороги при оттаивании (определяется по данным табл. 2 Приложения 5 Учебника), м; h_u - предельно допустимая деформация поверхности дороги при пучении, м, принимается для дорог I и II категорий равной 0,02, III категории - 0,025, IV и V категорий - 0,35; $\lambda_{th,i}$ - коэффициент теплопроводности талого грунта i -то слоя, Вт/(м °С); $L_{w,i}$ - удельные затраты тепла на оттаивание - промерзание содержащейся в i - том слое воды, Вт·ч/м³; $L_{v,i}$ - удельные затраты тепла на сезонное оттаивание—промерзание i -го слоя, Вт·ч/м³; Ω_s - сумма градусочасов на дневной поверхности в летний период с поправками на солнечную инсоляцию и инфильтрацию атмосферных осадков (определяется по формулам (7.6)—(7.12) Учебника); Ω_w - сумма градусочасов атмосферного воздуха в зимний период; t_s, t_w - продолжительность летнего и зимнего периода, ч; L_0 - удельная теплота фазовых превращений воды при замерзании-оттаивании, $L_0 = 93$ Вт·ч/кг; $\rho_{d,i}$ - плотность сухого мерзлого грунта i - го слоя, кг/м³; $w_{tot,i}$ - суммарная влажность мерзлого грунта i - го слоя; $C_{th,i}$ и $C_{f,i}$ - объемная теплоемкость талого и мерзлого грунта i - го слоя, Вт·ч/(м³ С).

Макрос 14. Расчет глубины оттаивания ММГ под дорогой с охлаждающим контуром и теплоизоляцией на откосах и гребне.

Цель расчета – определить глубину оттаивания под бровкой откоса насыпи h_0 (отсчет глубины производится от гребня

насыпи), который не должен превышать высоту насыпи H . Расчет осуществляется по эмпирической формуле, полученной автором методом математического моделирования теплового взаимодействия насыпи с охлаждающим контуром и с мерзлыми грунтами ее основания. Постановка задачи, результаты моделирования, методика их аппроксимации элементарными математическими функциями и аппроксимирующая зависимость представлены на страницах 58 – 61 Монографии. Здесь же мы приводим только окончательный результат.

$$h_{\phi} = \xi_{\phi}^{\phi} \cdot H, \quad (14.1)$$

$$\xi_{\phi}^{\phi} = 1.125 \cdot \alpha^{0.081} \cdot \beta^{0.052} \cdot (1.054 - 0.034 \cdot \gamma) \cdot \delta^{0.212} \cdot (1.464 \cdot \varepsilon + 0.964) \cdot (0.009 \cdot \ln \eta + 0.999), \quad (14.2)$$

$$\alpha = -\frac{2\lambda_{th} \cdot (T_{de} - T_{bf}) \cdot L}{\lambda_f \cdot (T_{or} - T_{bf}) \cdot B}; \quad \beta = \frac{T_e - T_{bf}}{T_{or} - T_{bf}}; \quad \gamma = \frac{T_0 - T_{bf}}{T_{or} - T_{bf}}; \quad \delta = \frac{h_e}{H}; \quad \varepsilon = \frac{r_e}{h_e}; \quad \eta = \frac{B}{H}, \quad (14.3)$$

где λ_{th}, λ_f – коэффициенты теплопроводности грунта земляного полотна, Вт/(м·°C);

T_{or}, T_{de} – соответственно, расчетная температура поверхности гребня насыпи и расчетная температура поверхности откоса, определяемые по формулам (15.4), (15.5), °C; T_0, T_{bf} – температура грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов в естественных условиях и температура промерзания-оттаивания грунта земляного полотна, определяемые изысканиями, °C; T_e – среднегодовая температура поверхности испарителя термосифона, определяемая по формуле (12.4), °C; L – длина откоса насыпи, определяется по формуле (14.4), м; H – высота насыпи, м; B – ширина гребня насыпи, м; h_e, r_e – шаг расстановки термосифонов и радиус их испарителя, м; h_{ϕ} – максимальная глубина оттаивания под бровкой откоса, считая от гребня насыпи, м.

$$L = H \cdot \sqrt{1 + n^2}, \quad (14.4)$$

где n – заложение откоса, д.е.

Макрос 15. Расчет глубины оттаивания ММГ под дорогой с теплоизоляцией на поверхности земляного полотна.

Цель расчета – определить глубину оттаивания под бровкой откоса насыпи h_δ (отсчет глубины производится от гребня насыпи), который не должен превышать высоту насыпи H . Расчет осуществляется по эмпирической формуле, полученной автором методом математического моделирования теплового взаимодействия насыпи с охлаждающим контуром и с мерзлыми грунтами ее основания. Постановка задачи, результаты моделирования, методика их аппроксимации элементарными математическими функциями и аппроксимирующая зависимость представлены на страницах 67 – 70 Монографии. Здесь же мы приводим только окончательный результат.

$$h_\delta = \xi_\delta^\phi \cdot H, \quad (15.1)$$

$$\xi_\delta^\phi = 1,1 \cdot \alpha^{0,45} \cdot \beta^{-0,213} \cdot \gamma^{0,571}, \quad (15.2)$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot \lambda_{th} \cdot (T_{de} - T_{bf}) \cdot L}{\lambda_f \cdot (T_{bf} - T_{or}) \cdot B}, \quad \beta = \frac{T_{bf} - T_0}{T_{bf} - T_{or}}, \quad \gamma = \frac{B}{H}, \quad (15.3)$$

где h_δ – глубина оттаивания земляного полотна под бровкой откоса, м; H – высота насыпи, м; λ_{th}, λ_f – коэффициенты теплопроводности грунта земляного полотна, соответственно, в талом и мерзлом состояниях, Вт/(м·°C); $T_{or}, T_{de}, T_0, T_{bf}$ – 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, $^{\circ}\text{C}$; B – ширина гребня земляного полотна, м; L – длина откоса земляного полотна, определяется по формуле (14.4), м.

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

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

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

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

$$T_{or,de} = -7,762 \cdot M + 7,68 \text{ при коэффициенте линейной корреляции } k_r = -0,957, \quad (15.5)$$

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.

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th} \cdot \Omega_s}{L_v} + (\lambda_{th} \cdot R_s)^2} - \lambda_{th} \cdot R_s, \quad (15.6)$$

$$d_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot (-\Omega_w)}{L_v} + (\lambda_f \cdot R_w)^2} - \lambda_f \cdot R_w, \quad (15.7)$$

$$R_s = \frac{1}{\alpha_s} + R_{ins}, \quad (15.8)$$

$$R_w = \frac{1}{\alpha_w} + R_{ins} + R_{snow} \quad (15.9)$$

где L_v – удельная теплота промерзания-оттаивания материала земляного полотна, Втч/м³; Ω_w – сумма градусочасов температуры атмосферного воздуха в зимний период; Ω_s – сумма градусочасов температуры поверхности земляного полотна в летний период с учетом температурной поправки на солнечную инсоляцию

и инфильтрацию атмосферных осадков, вычисляется по формулам (7.6) – (7.9) Учебника; R_s, R_w - среднелетнее и среднезимнее термическое сопротивление теплообмену на поверхности грунта в пределах гребня и откоса земляного полотна, $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; α_s, α_w - коэффициенты теплообмена на поверхности гребня и откоса, соответственно, в летнее и зимнее время, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$; R_{ins} - термическое сопротивление изоляции, укладываемой на поверхность земляного полотна, $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; R_{snow} – среднее зимнее термическое сопротивление снежного покрова на гребне и откосе, $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Макрос 16. Определение времени образования заданного радиуса оттаивания многолетнемерзлого грунта вокруг добычной скважины.

Цель расчета – определить время оттаивания t_f . Расчет осуществляется по нижеследующей цепочке формул.

$$t_{th} = \frac{L_v \cdot (r_{th}^2 - r_s^2)}{A(r_{th})}, \tag{16.1}$$

$$A(r_{th}) = \lambda_{th} \cdot (T_{bf} - T_{in}) \cdot \frac{\text{li}\left(\frac{r_{th}}{r_p} \cdot e^b\right) - \text{li}\left(\frac{r_s}{r_p} \cdot e^b\right)}{\frac{r_{th} - r_p}{2 \cdot r_p} \cdot e^b} - 1.07 \cdot \lambda_{th} \cdot (T_0 - T_{bf}), \tag{16.2}$$

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha} + \frac{r_c}{\lambda_c} \cdot \ln\left(\frac{r_c}{r_p}\right), \tag{16.3}$$

$$b = \lambda_{th} \cdot R_{in} / r_p, \tag{16.4}$$

$$L_v = L_0 \cdot \rho_f \cdot \frac{w_{tot} - w_w}{1 + w_{tot}} + C, \tag{6.5}$$

$$C = \frac{C_{th} \cdot (T_g - T_{bf})}{3.17 + 1.15 \cdot b} + C_f \cdot (T_{bf} - T_0), \tag{16.6}$$

где $\text{li}(x)$ – интегральный логарифм, $\text{li}(x) = \int_0^x \frac{du}{\ln(u)}$; r_{th} – заданный радиус оттаивания, м; r_p, r_s – радиус эксплуатационной колонны и скважины, в которую она погружена, м; λ_f, λ_{th} – коэффициент

теплопроводности мерзлого и талого грунта, Вт/(м·°С); T_{in}, T_0, T_{bf} – температура, соответственно, флюида, многолетне-мерзлого грунта, оттаивания грунта, °С; α – коэффициент конвективного теплообмена между флюидом и внутренней поверхностью эксплуатационной колонны труб, принимается для нефти равным 116 Вт/(м²·°С), для газа – 25 Вт/(м²·°С); λ_c – коэффициент теплопроводности цементного кольца, Вт/(м·°С); ρ_f – плотность породы в мерзлом состоянии, кг/м³; w_{tot}, w_w – суммарная влажность породы и количество в ней незамерзшей воды, д.е.; C_{th}, C_f – теплоемкость породы в талом и мерзлом состоянии, Вт·ч/(м³·°С); t_{th} – определяемое расчетом время оттаивания, ч.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Доступ к электронной версии пособия и расчетным макросам осуществляется по ссылке:
<https://yadi.sk/d/qzeU6oALRrTVg>

Хрусталеv Лев Николаевич

**ЭЛЕКТРОННОЕ ПОСОБИЕ
ПО РАСЧЕТУ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ
С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ**

Центр образовательного и научного консалтинга - ЦОиНК
(ИП Трусова Л.А.)

Сайт издательства www.conseducenter.ru

Тел: 8-496-727-66-37

Email: coink@conseducenter.ru, coink@bk.ru

Подписано в печать 25.06.2020. Формат 84x60X1/16. Бумага офсетная.
Тираж 30 экз.

Отпечатано в ООО «Дизайн»
142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов д.1
e-mail: zakaz@oodizain.ru

