

**Л.Н. Хрусталеv**

**ЭЛЕКТРОННОЕ ПОСОБИЕ  
ПО РАСЧЕТУ  
МЕХАНИЧЕСКОГО 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  
2021

**УДК 55**  
**ББК 26.35**  
**ISBN 978-5-6044794-7-6**  
**X95**

Хрусталеv Л.Н.  
Электронное пособие по расчету механического взаимодействия инженерных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами. – Чехов: ЦОиНК. 2021. - 39с.

ISBN 978-5-6044794-7-6



9 785604 479476

©Хрусталеv Л.Н., 2021.  
© ЦОиНК, 2021 (оформление).

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	5
Описание расчетов, используемых в макросах.....	6
Макрос 1. Расчет несущей способности свай в многолетнемерзлых грунтах (ММГ) сливающегося типа.....	6
Макрос 1а. Расчет температурного коэффициента для свайного фундамента.....	8
Макрос 2. Расчет несущей способности столбчатого фундамента на ММГ сливающегося типа .....	11
Макрос 2а. Расчет температурного коэффициента для столбчатого фундамента.....	13
Макрос 3. Расчет несущей способности столбчатого и ленточного фундамента на оттаявших и талых грунтах.....	15
Макрос 4. Расчет несущей способности свайного фундамента на оттаявших и талых грунтах.....	16
Макрос 5. Расчет осадки столбчатого и ленточного фундамента на оттаявших и талых грунтах.....	19
Макрос 6. Расчет осадки свайного фундамента на оттаявших и талых грунтах.....	20
Макрос 7. Расчет осадки консолидации предварительно оттаянного ММГ.....	22
Макрос 8. Расчет осадки фундамента на оттаивающем грунте.....	23
Макрос 9. Проверка устойчивости свайного фундамента на ММГ сливающегося типа на действие сил пучения.....	25
Макрос 10. Проверка устойчивости столбчатого фундамента на ММГ сливающегося типа на действие сил пучения.....	26
Макрос 11. Проверка устойчивости свайного фундамента на ММГ не сливающегося типа на действие сил пучения.....	27
Макрос 12. Проверка устойчивости столбчатого и ленточного фундамента на ММГ не сливающегося типа на действие сил пучения.....	29
Макрос 13. Расчет подземного нефтепровода на прочность и устойчивость.....	30

Макрос 14. Расчет наземного нефтепровода на прочность и устойчивость.....	35
Макрос 15. Расчет свайной опоры надземного трубопровода, расположенного на участке с ММГ сливающегося типа, на действие горизонтальной силы.....	37
Приложения.....	39

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга является электронной интерпретацией расчетной части книги автора Основы геотехники в криолитозоне: Учебник – Изд-во МГУ, 2005. 544 с. , касающейся прогноза механического взаимодействия инженерных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами (далее Учебник). В ней пользователь найдет 17 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 Учебнике, если он сделан автором, или там же приводятся ссылки на литературу, где этот вывод излагается. Большинство этих формул для удобства пользователя мы приводим ниже.

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/TfQ8SPCPCjRd1w>

## ОПИСАНИЕ РАСЧЕТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МАКРОСАХ

### Макрос 1. Расчет несущей способности сваи в многолетнемерзлых грунтах (ММГ) сливающегося типа.

Цель расчета – определить несущую способность сваи, расположенной под серединой и краем здания, а также под опорами ЛЭП и надземных трубопроводов. Сложность проблемы заключалась в том, что методика расчета базируется на использовании большого количества экспериментальных данных, собранных в таблицы, что крайне затрудняет написание компьютерных программ. Поэтому автор пошел по пути аппроксимации данных этих таблиц элементарными функциями на коротких отрезках входных в таблицы параметров. В результате расчет осуществляется по нижеследующей цепочке формул.

$$F_u = \gamma_T \cdot \gamma_c \cdot (R \cdot A_\phi + R_{af} \cdot A_{af}), \quad (1.1)$$

где  $\gamma_T$  – температурный коэффициент (см. макрос 1а);  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы, принимается по данным табл. 5.8 Учебника;  $R$  – расчетное давление на мерзлый грунт под нижним торцом сваи, Па;  $A_\phi$  – площадь торца сваи, м<sup>2</sup>;  $R_{af}$  – расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу на боковой поверхности смерзания в пределах длины сваи, находящейся в ММГ, Па;  $A_{af}$  – площадь поверхности смерзания сваи с вечномерзлым грунтом, м<sup>2</sup>. Параметры  $R$  и  $R_{af}$  определяются по опытным данным, приведенных в табл. 1 и 3 Приложения 3 Учебника, в зависимости от расчетных температур грунта на острие сваи  $T_z$  и ее боковой поверхности  $T_e$ . Эти зависимости мы аппроксимировали элементарными математическими функциями на конечных интервалах  $T_z$  и  $T_e$ :

Мелкие и пылеватые пески.

$$R = -228.5 \cdot T_z + 1209 \text{ в интервале } -0.5^0C \leq T_z < -10^0C, \text{ средняя ошибка аппроксимации } 1.8 \%, \text{ максимальная } - 6 \%, \quad (1.2)$$

Супеси.

$R = -500 \cdot T_z + 600$  в интервале  $-0.3^0 C \leq T_z < -1.0^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 0.0 %, максимальная – 0.0 %, (1.3)

$R = -220.9 \cdot T_z + 883$  в интервале  $-1.0^0 C \leq T_z < -10^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 2.0 %, максимальная – 4.0 %, (1.4)

Суглинки и глины.

$R = -209 \cdot T_z + 651.7$  в интервале  $-0.5^0 C \leq T_z < -10^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 1.9 %, максимальная – 2.8 %, (1.5)

Перечисленные грунты с льдистостью  $0.2 < i < 0.4$ .

$R = 644.84 \cdot (-T_z)^{0.427}$  в интервале  $-0.3^0 C \leq T_z < -10^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 2.9 %, максимальная – 4.1 %, (1.6)

Известково-песчаный раствор.

$R_{af} = 152.32 \cdot (-T_e)^{0.762}$  в интервале  $-0.3^0 C \leq T_e < -1.5^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 2.5 %, максимальная – 3.7 %, (1.7)

$R_{af} = 165 \cdot (-T_e)^{0.481}$  в интервале  $-1.5^0 C \leq T_e < -3.5^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 0.5 %, максимальная – 1.4 %, (1.8)

$R_{af} = 202.35 \cdot (-T_e)^{0.39}$  в интервале  $-3.5^0 C \leq T_e < -8^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 1.2 %, максимальная – 1.8 %, (1.9)

Песчаный.

$R_{af} = 132 \cdot (-T_e)^{0.788}$  в интервале  $-0.3^0 C \leq T_e < -1.0^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 2.7 %, максимальная – 4.4 %, (1.10)

$R_{af} = 126 \cdot (-T_e)^{0.762}$  в интервале  $-1.0^0 C \leq T_e < -4.0^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 1.9 %, максимальная – 3.3 %, (1.11)

Глинистый.

$R_{af} = 100.4 \cdot (-T_e)^{0.759}$  в интервале  $-0.3^0 C \leq T_e < -1.0^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 0.7 %, максимальная – 1.1 %, (1.12)

$R_{af} = 100 \cdot (-T_e)^{0.634}$  в интервале  $-1.0^{\circ}C \leq T_e < -6.0^{\circ}C$ , средняя ошибка аппроксимации 2.0 %, максимальная – 3.8 %, (1.13)

В свою очередь расчетные температуры  $T_z$  и  $T_e$  определяются по формулам (5.4) и (5.5) Учебника.

Примечание: При многослойном основании желтое поле макроса 1 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле (A1) для осреднения коэффициентов теплопроводности грунта и по формуле (A2) для осреднения остальных характеристик. В макросе 1 в качестве глубины осреднения принимается глубина погружения сваи, считая от подошвы слоя сезонного оттаивания  $z$ .

$$\lambda = \sum_{i=1}^n h_i / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot h_i, \quad (A1)$$

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \cdot h_i / \sum_{i=1}^n h_i, \quad (A2)$$

$\lambda_i, A_i$  – численные значения грунтовых характеристик  $i$ -го слоя;

$h_i$  – толщина  $i$ -го слоя;

$n$  – число  $i$ -х слоев в пределах глубины осреднения.

### **Макрос 1а. Расчет температурного коэффициента для свайного фундамента.**

Цель расчета – определить температурный коэффициент  $\gamma_t$ . Этот коэффициент зависит от эквивалентной температуры грунта на боковой поверхности сваи  $T_e$ , поэтому он определяется для трех случаев: Фундамент находится под серединой здания  $T_e^c$ , фундамент находится под краем здания  $T_e^k$  и на фундамент не распространяется тепловое влияние сооружения  $T_e^f$ , например, когда он располагается под опорами надземных трубопроводов и ЛЭП. Расчет температурного коэффициента осуществляется по формуле:



$$\gamma_t = 1,15(1 + \nu^2) - 1,61\nu \sqrt{\ln(t_u/\nu)}, \quad (1.1a)$$

где  $t_u$  – длительность эксплуатации сооружения, число лет;  $\nu$  – коэффициент вариации несущей способности основания, безразмерный.

#### П р и м е ч а н и е .

1. Формула (1.1a) пригодна только для многолетнемерзлых грунтов сливающегося типа, используемых в качестве оснований зданий и инженерных сооружений по I принципу.

2. Если  $\gamma_t < 0$ , следует принимать  $\gamma_t = 0.0$ ; если  $\gamma_t > 1$ , следует принимать  $\gamma_t = 1.0$ .

Коэффициент вариации несущей способности основания вычисляется по формуле:

$$\nu = 0,45 \cdot \left[ (T_{bf} - T_0') / A \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \sigma \cdot D_e / \left[ T_{bf} - T_e - C \cdot \sqrt{(T_{bf} - T_e)} \right], \quad (1.2a)$$

где  $T_{bf}$  – температура начала замерзания грунта, °С;  $T_0'$  – среднегодовая температура многолетнемерзлого грунта на подошве слоя сезонного оттаивания, принимается для зданий по табл. 5.9 Учебника, для оснований опор линий электропередачи, антенно–мачтовых опор и трубопроводов равной температуре многолетнемерзлого грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов  $T_0, 0$ °С;  $A$  – амплитуда сезонных колебаний температуры атмосферного воздуха, °С, определяемая как полу разность значений среднемесячной температуры самого теплого и самого холодного месяца по СП 131.13330;  $D_e$  – коэффициент затухания случайных колебаний температуры с глубиной, безразмерный, определяемый по данным табл. П1 СП 25.13330.2012 в зависи-

мости от параметра  $m = z \cdot \sqrt{\frac{C_f}{\lambda_f}}$ , которая нами аппроксимирована

формулами (1.3a), (1.4a);  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение среднегодовой температуры атмосферного воздуха, °С, определяемое по табл. П2 СП 25.13330.2012;  $T_e$  – эквивалентная температура многолетнемерзлого грунта на боковой поверхности сваи, °С, определяется по формулам (1.5a) - (1.7a);

$C$  – коэффициент, град<sup>1/2</sup>, принимаемый для свайного фундамента равным 0.24.

$D_e = -0.155 \cdot \ln(m) + 1.398$  в интервале  $25 \leq m < 125$ , средняя ошибка аппроксимации 0.16% максимальная – 0.21 % (1.3а)

$D_e = -0.272 \cdot \ln(m) + 1.915$  в интервале  $125 \leq m < 300$ , средняя ошибка аппроксимации 0.71%, максимальная – 0.65 % (1.4а)

где  $z$  – глубина заложения подошвы фундамента, считая от кровли ММГ, м;  $C_f$  – объемная теплоемкость мерзлого грунта, Вт·ч/(м<sup>3</sup> °С);  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°С).

$$T_e^c = (T_0^1 - T_{bf}) \cdot \alpha + (T_0 - T_0^1) \cdot k_c + T_{bf}, \quad (1.5а)$$

$$T_e^k = (T_0^1 + T_0 - 2 \cdot T_{bf}) \cdot \frac{\alpha}{2} + (T_0 - T_0^1) \cdot k_k + T_{bf}, \quad (1.6а)$$

$$T_e^f = (T_0 - T_{bf}) \cdot \alpha + T_{bf}, \quad (1.7а)$$

где  $\alpha$  – безразмерный параметр, определяемый по табл. 5.10 Учебника в зависимости от параметра  $m$ , которая нами аппроксимирована формулами (1.8а), (1.9а);  $k_c, k_k$  – безразмерные параметры определяемые по табл. 5.11 в зависимости от отношения  $z_0 = z/B$  ( $B$  – ширина здания, м), которая нами аппроксимирована формулами (1.10а) – (1.11а).

$\alpha = 0.062 \cdot m^{0.498}$  в интервале  $25 \leq m < 175$ , средняя ошибка аппроксимации 2.17%, максимальная – 3.33%., (1.8а)

$\alpha = 0.387 \cdot m^{0.139}$  в интервале  $175 \leq m < 350$ , средняя ошибка аппроксимации 0.55%, максимальная – 0.82%., (1.9а)

$k_c = 0.2 \cdot z_0 + 0.005$  в интервале  $0,05 \leq z_0 < 0,2$ , средняя ошибка аппроксимации 0.0%, максимальная – 0.0%., (1.10а)

$k_c = 0.5 \cdot z_0 + 0.03$  в интервале  $0,2 \leq z_0 < 0,5$ , средняя ошибка аппроксимации 0.0%, максимальная – 0.0%., (1.11а)

$k_c = 0.245 \cdot \ln(z_0) + 0.446$  в интервале  $0.5 \leq z_0 < 2.0$ , средняя ошибка аппроксимации 1.13%, максимальная – 1.36%., (1.12а)

$k_k = 0.2 \cdot z_0 + 0.02$  в интервале  $0,05 \leq z_0 < 0.2$ , средняя ошибка аппроксимации 0.0%, максимальная – 0.0%., (1.13а)

$k_k = 0.335 \cdot z_0 + 0.008$  в интервале  $0.2 \leq z_0 < 0.5$ , средняя ошибка аппроксимации 1.59%, максимальная – 2.78%., (1.14а)

$k_k = 0.27 \cdot z_0^{0.729}$  в интервале  $0.5 \leq z_0 < 2$ , средняя ошибка аппроксимации 2.36%, максимальная – 3.57%., (1.15а)

## **Макрос 2. Расчет несущей способности столбчатого фундамента в многолетнемерзлых грунтах сливающегося типа.**

Цель расчета – определить несущую способность фундамента, расположенного под серединой и краем здания, а также под опорами ЛЭП и надземных трубопроводов. Сложность проблемы заключалась в том, что методика расчета базируется на использовании большого количества экспериментальных данных, собранных в таблице 2 Приложения 3 Учебника, что крайне затрудняет написание компьютерных программ. Поэтому автор пошел по пути аппроксимации данных этой таблицы элементарными функциями на коротких отрезках входных в таблицу параметров. В результате расчет осуществляется по нижеследующей цепочке формул.

$$F_u = \gamma_T \cdot \gamma_c \cdot R \cdot A_\phi, \quad (2.1)$$

где  $\gamma_T$  – температурный коэффициент (см. макрос 2а);  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы, принимается по данным табл. 5.8 Учебника;  $R$  – расчетное давление на мерзлый грунт под подошвой фундамента, Па;  $A_\phi$  – площадь подошвы фундамента, м<sup>2</sup>; Параметры  $R$  определяются по опытным данным в зависимости от максимальной температуры грунта на подошве фундамента  $T_m$ . Эти зависимости мы аппроксимировали элементарными математическими функциями на конечных интервалах  $T_m$  :

Крупнообломочные грунты и пески крупные и средние.

$R = 1235.21 \cdot (-T_m)^{0.414}$  в интервале  $-0.5^0 C \leq T_m < -10^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 1.44 %, максимальная – 3.74 % (2.2)

Пески мелкие и пылеватые.

$R = 929.83 \cdot (-T_m)^{0.479}$  в интервале  $-0.5^0 C \leq T_m < -8^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 1.79 %, максимальная – 4.7 % (2.3)

Супеси.

$R = 700.64 \cdot (-T_m)^{0.551}$  в интервале  $-0.5^0 C \leq T_m < -8^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 2.2 %, максимальная – 4.35 % (2.4)

Суглинки и глины.

$R = 217.8 \cdot (-T_m) + 341$  в интервале  $-0.5^0 C \leq T_m < -4^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 1.34 %, максимальная – 2.93 % (2.5)

$R = 167.5 \cdot (-T_m) + 540$  в интервале  $-4^0 C \leq T_m < -8^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 0.74 %, максимальная – 1.05 % (2.6)

Перечисленные грунты с льдистостью  $0.2 < i < 0.4$ ..

$R = 182.1 \cdot (-T_m) + 221$  в интервале  $-0.5^0 C \leq T_m < -4^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 1.89 %, максимальная – 4.01 % (2.7)

$R = 159 \cdot (-T_m) + 350$  в интервале  $-4^0 C \leq T_m < -8^0 C$ , средняя ошибка аппроксимации 0.0 %, максимальная – 0.0 % (2.8)

В свою очередь максимальная температура  $T_m$  определяется по формулам:

Под серединой здания

$$T_m = -(T_0^1 - T_{bf}) \cdot e^{-k \cdot z} + \frac{2}{\pi} \cdot (T_0^1 - T_0) \cdot \arctg\left(\frac{B}{2 \cdot z}\right) + T_0, \quad (2.9)$$

Под краем здания

$$T_m = -\frac{T_0^1 + T_0 - 2 \cdot T_{bf}}{2} \cdot e^{-k \cdot z} + \frac{1}{\pi} \cdot (T_0^1 - T_0) \cdot \arctg\left(\frac{B}{z}\right) + T_0, \quad (2.10)$$

Под опорами надземных трубопроводов и ЛЭП

$$T_m = -(T_0 - T_{bf}) \cdot e^{-k \cdot z} + T_0, \quad (2.11)$$

где  $k = \sqrt{\frac{\pi \cdot C_f}{\lambda_f \cdot t_y}}$ ;  $C_f$  – объемная теплоемкость мерзлого грунта,

Вт·ч/(м<sup>3</sup> °С);  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°С);  $t_y$  – продолжительность года, 8760 ч;

$z$  – глубина заложения подошвы фундамента в м, считая от подошвы слоя сезонного оттаивания;  $T_0^1, T_0, T_{bf}$  – расчетная температура, соответственно, поверхности грунта под зданием, на глубине нулевых годовых теплооборотов, промерзания-оттаивания грунта, °С.

**Примечание:** При многослойном основании желтое поле макроса 2 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле (A1) для осреднения коэффициентов теплопроводности грунта и по формуле (A2) для осреднения остальных характеристик (см. приложение к макросу 1). В макросе 2 в качестве глубины осреднения принимается глубина погружения подошвы фундамента, считая от подошвы слоя сезонного оттаивания  $z$ .

## **Макрос 2а. Расчет температурного коэффициента для столбчатого фундамента.**

Цель расчета – определить температурный коэффициент  $\gamma_t$ . Этот коэффициент зависит от максимальной температуры грунта на глубине заложения подошвы фундамента, поэтому он определяется для трех случаев: Фундамент находится под

серединой здания, фундамент находится под краем здания и на фундамент не распространяется тепловое влияние сооружения, например, когда он располагается под опорами надземных трубопроводов и ЛЭП. Расчет температурного коэффициента осуществляется по формуле:

$$\gamma_t = 1,15(1 + \nu^2) - 1,61\nu \sqrt{\ln(t_u/\nu)}, \quad (2.1a)$$

где  $t_u$  – длительность эксплуатации сооружения, число лет;  $\nu$  – коэффициент вариации несущей способности, безразмерный.

#### П р и м е ч а н и е.

1. Формула (2.1a) пригодна только для многолетнемерзлых грунтов сливающегося типа, используемых в качестве оснований зданий и инженерных сооружений по I принципу.

2. Если  $\gamma_t < 0$ , следует принимать  $\gamma_t = 0.0$ ; если  $\gamma_t > 1$ , следует принимать  $\gamma_t = 1.0$ .

Коэффициент вариации несущей способности основания вычисляется по формуле:

$$\nu = 0,45 \cdot \left[ (T_{bf} - T_0') / A \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \sigma \cdot D_m / \left[ T_{bf} - T_m - C \cdot \sqrt{(T_{bf} - T_m)} \right], \quad (2.2a)$$

где  $T_{bf}$  – температура начала замерзания грунта, °С;  $T_0'$  – среднегодовая температура многолетнемерзлого грунта на подошве слоя сезонного оттаивания, принимается для зданий по табл. 5.9 Учебника, для оснований опор линий электропередачи, антенно-мачтовых опор и трубопроводов равной температуре многолетнемерзлого грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов  $T_0, 0$ °С;  $A$  – амплитуда сезонных колебаний температуры атмосферного воздуха, °С, определяемая как полуразность значений среднемесячной температуры самого теплого и самого холодного месяца по СП 131.13330;  $D_m$  – коэффициент затухания случайных колебаний температуры с глубиной, безразмерный, определяемый по табл. П.1 СП 25.13330.2012 в зависимости от

параметра  $m = z \cdot \sqrt{\frac{C_f}{\lambda_f}}$ , которую мы аппроксимировали формулами (2.3a) – (2.6a);  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение

среднегодовой температуры атмосферного воздуха, °С, определяемое по табл. П2 СП 25.13330.2012;  $T_m$  – максимальная температура многолетнемерзлого грунта на глубине заложения подошвы фундамента, °С, определяется по формулам (2.9) – (2.11);  $C$  – коэффициент, град<sup>1/2</sup>, принимаемый в зависимости от вида грунта под подошвой фундамента: 0,0 – для крупнообломочных и песчаных грунтов; 0,19 – для супесей и 0,29 – для суглинков и глиен.

$D_m = -0.005 \cdot m + 0.926$  в интервале  $25 \leq m < 75$ , средняя ошибка аппроксимации 1.53% максимальная – 2.42 % (2.3а)

$D_m = -0.003 \cdot m + 0.763$  в интервале  $75 \leq m < 125$ , средняя ошибка аппроксимации 0.51% максимальная – 0.65 % (2.4а)

$D_m = -0.296 \cdot \ln(m) + 1/822$  в интервале  $125 \leq m < 175$ , средняя ошибка аппроксимации 1.53% максимальная – 2.42 % (2.5а)

$D_m = 28.33 \cdot m^{-0.887}$  в интервале  $175 \leq m < 300$ , средняя ошибка аппроксимации 1.53% максимальная – 2.42 % (2.3а)

где  $z$  – глубина заложения подошвы фундамента, считая от кровли ММГ, м;  $C_f$  – объемная теплоемкость мерзлого грунта, Вт·ч/(м<sup>3</sup> °С);  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°С).

### **Макрос 3. Расчет несущей способности столбчатого и ленточного фундамента на талых грунтах.**

Цель расчета – определить несущую способность фундамента. Последняя определяется по формуле:

$$F_u = \gamma_c \cdot R \cdot b \cdot l, \quad (3.1)$$

где  $\gamma_c$  – коэффициент условия работы, определяется по данным табл. 5.13 Учебника, б.р.;

$R$  – допускаемое давление на грунт, кПа;  $b, l$  – ширина и длина подошвы фундамента, м.

$$R = g \cdot \rho_{th} \cdot b \cdot M_1 / 1000 + c_{th} \cdot M_2, \quad (3.2)$$

$$M_1 = \frac{\pi}{4 \cdot (ctg \varphi_{th} + \varphi_{th} - \pi / 2)}, \quad (3.3)$$

$$M_2 = \frac{\pi \cdot ctg \varphi_{th}}{ctg \varphi_{th} + \varphi_{th} - \pi / 2}, \quad (3.4)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $9.81 \text{ м/с}^2$ ;  $\rho_{th}$  – плотность грунта,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c_{th}$  – сцепление грунта,  $\text{кПа}$ ;  $\varphi_{th}$  – угол внутреннего трения грунта,  $\text{рад}$ .

Примечание: При многослойном основании желтое поле макроса 3 заполняется грунтовыми характеристиками первого считая от подошвы фундамента слоя.

#### **Макрос 4. Расчет несущей способности свайного фундамента в талых грунтах.**

Цель расчета – определить несущую способность фундамента. Последняя определяется по формуле:

$$F_u = \gamma_{cR} \cdot R \cdot A + \gamma_{cf} \cdot f_c \cdot u \cdot z, \quad (4.1)$$

где  $\gamma_{cR}, \gamma_{cf}$  – коэффициенты условия работы грунта соответственно под нижним концом и боковой поверхностью сваи, определяются по табл.7.4 СП 24.13330.2011 в зависимости от способа погружения сваи, б.р.;  $A$  – площадь поперечного сечения нижнего торца сваи,  $\text{м}^2$ ;  $u, z$  – периметр и глубина погружения сваи,  $z$  отсчитывается от подошвы слоя сезонного промерзания грунта,  $\text{м}$ ;  $R, f_c$  – расчетные сопротивления грунта под нижним концом сваи и по ее боковой поверхности в  $\text{кПа}$ , принимаются по данным табл. 1 и 2 Приложения 4 Учебника, которые автором аппроксимированы нижеследующими элементарными математическими выражениями:



### Нижний торец сваи

Крупные пески и глинистые грунты твердой консистенции.

$R = 1573 \cdot \ln(z) + 1399$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 2.63 %, максимальная – 5.8 %, (4.2)

Средние пески.

$R = 2280 \cdot z^{0.242}$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 1.93 %, максимальная – 5.2 %, (4.3)

Мелкие пески.

$R = 100 \cdot z + 1700$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 5\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 0.0 %, максимальная – 0.0 %, (4.4)

$R = 61.22 \cdot z + 1979$  в интервале  $5\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 0.21 %, максимальная – 0.34 %, (4.5)

Пылеватые пески и глинистые грунты тугопластичной консистенции.

$R = 397.6 \cdot \ln(z) + 673.9$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 5\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 1.0 %, максимальная – 2.0 %, (4.6)

$R = 32.44 \cdot z + 1160$  в интервале  $5\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 0.87 %, максимальная – 1.7 %, (4.7)

Глинистый грунт полутвердой консистенции.

$R = 327.1 \cdot z + 958.5$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 7\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 2.27 %, максимальная – 3.76 %, (4.8)

$R = 93.87 \cdot z + 2604$  в интервале  $7\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 0.77 %, максимальная – 1.22 %, (4.9)

Глинистый грунт мягкопластичной консистенции.

$R = 99.96 \cdot z + 242$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 7\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 2.34 %, максимальная – 3.41 %, (4.10)

$R = 17.4 \cdot z + 302.6$  в интервале  $7\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 1.55 % , максимальная – 2.47 % , (4.11)

Глинистый грунт текучепластичной консистенции.

$R = 11.73 \cdot z + 195.9$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 7\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 1.62 % , максимальная – 1.74 % , (4.12)

$R = 5.142 \cdot z + 226.3$  в интервале  $7\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 1.02 % , максимальная – 2.21 % , (4.13)

### Боковая поверхность сваи

Крупные и средние пески а также глинистые грунты твердой консистенции.

$f_c = 34 \cdot z^{0.201}$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 0.85 % , максимальная – 2.9 % , (4.14)

Мелкие пески и глинистые грунты полутвердой консистенции.

$f_c = 23 \cdot z^{0.225}$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 0.6 % , максимальная – 1.44 % , (4.15)

Пылеватые пески и глинистые грунты тугопластичной консистенции.

$f_c = 12.317 \cdot z^{0.257}$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 1.94 % , максимальная – 2.39 % , (4.16)

Глинистые грунты мягкопластичной консистенции.

$f_c = 2 \cdot \ln(z) + 4.2$  в интервале  $3\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 1.7 % , максимальная – 2.94 % , (4.17)

Глинистые грунты текучепластичной консистенции.

$f_c = 2.02 \cdot \ln(z) + 0.14$  в интервале  $2\text{м} \leq z < 10\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 1.42% , максимальная – 2.86 % , (4.18)

$f_c = 0.946 \cdot \ln(z) + 2.535$  в интервале  $10\text{м} \leq z < 20\text{м}$ , средняя ошибка аппроксимации 0.45% , максимальная – 0.7 % , (4.19)

Примечание: Программа разработана для однородного или двухслойного основания. В последнем случае первым от поверхности слоем является слой в пределах всей боковой поверхности сваи, вторым – под ее торцом.

### **Макрос 5. Расчет осадки столбчатого и ленточного фундамента на однородных оттаявших и талых грунтах.**

Цель расчета – определение осадки. Последняя вычисляется методом эквивалентного слоя, предложенного Н.А. Цытовичем, и осуществляется по формуле:

$$s = A\omega \cdot a \cdot p_0 \cdot b_\phi, \quad (5.1)$$

где  $A\omega$  – коэффициент эквивалентного слоя, определяется по данным табл. 5.19 Учебника, в зависимости от отношения  $m = l_\phi / b_\phi$  которую автор аппроксимировал семейством элементарных математических выражений (см. ниже), б.р.;  $l_\phi, b_\phi$  –

длина и ширина подошвы фундамента, м;  $a = \frac{1 - 2 \cdot \mu_0^2 / (1 - \mu_0)}{E_0}$  –

коэффициент сжимаемости, 1/Па;  $\mu_0$  – коэффициент относительной поперечной деформации, б.р.;  $E_0$  – модуль общей деформации, Па;  $p_0$  – среднее дополнительное давление на грунт под подошвой фундамента, определяется по формуле (5.2), Па.

$$p_0 = \frac{F}{l_\phi \cdot b_\phi} - g \cdot \rho_{th} \cdot h_\phi, \quad (5.2)$$

где  $F$  – нагрузка на фундамент, принимается равной  $F \leq F_u / \gamma_n$ , Н;  $F_u$  – несущая способность грунтов основания, вычисляется по программе (см. макрос 3), Па;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению сооружения, принимается 1.2, 1.15, 1.10 соответственно для сооружений первого, второго и третьего классов капитальности, б.р.;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_{th}$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $h_\phi$  – глубина заложения подошвы фундамента, считая от поверхности грунта, м.

### Коэффициент эквивалентного слоя

Галька и гравий.

$$A\omega = 0.548 \cdot \ln(m) + 0.867 \quad \text{средняя ошибка аппроксимации} \\ 1.02 \% , \text{ максимальная} - 2.58 \% , \quad (5.3)$$

Пески.

$$A\omega = 0.576 \cdot \ln(m) + 0.918 \quad \text{средняя ошибка аппроксимации} \\ 0.91 \% , \text{ максимальная} - 2.34 \% , \quad (5.4)$$

Супеси и суглинки.

$$A\omega = 0.607 \cdot \ln(m) + 0.966 \quad \text{средняя ошибка аппроксимации} \\ 0.91 \% , \text{ максимальная} - 2.42 \% , \quad (5.5)$$

Глины.

$$A\omega = 0.756 \cdot \ln(m) + 1.211 \quad \text{средняя ошибка аппроксимации} \\ 1.04 \% , \text{ максимальная} - 2.34 \% , \quad (5.6)$$

Примечание: При многослойном основании желтое поле макроса 5 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле (A2) (см. приложение к макросу 1). В макросе 5 в качестве глубины осреднения принимается глубина, равная двойной ширине подошвы фундамента, отсчитываемая от подошвы фундамента.

### **Макрос 6. Расчет осадки свайного фундамента на оттаявших и талых грунтах.**

Цель расчета – определение осадки. Последняя вычисляется методом эквивалентного слоя, предложенного Н.А. Цытовичем, и осуществляется по формуле:

$$s = A\omega \cdot a \cdot p_0 \cdot b_\phi, \quad (6.1)$$

где  $A\omega$  – коэффициент эквивалентного слоя, определяется по данным табл. 5.19 Учебника, в зависимости от отношения

$m = l_{\phi} / b_{\phi}$  которую автор аппроксимировал семейством элементарных математических выражений (см. выражения (5.3) – (5.6)), б.р.;  $l_{\phi}, b_{\phi}$  – длина и ширина подошвы условного фундамента, вычисляемые по формулам (6.2), (6.3), м;  
 $a = \frac{1 - 2 \cdot \mu_0^2 / (1 - \mu_0)}{E_0}$  – коэффициент сжимаемости, 1/Па;  $\mu_0$  – ко-

эффициент относительной поперечной деформации, б.р.;  $E_0$  – модуль общей деформации, Па;  $p_0$  – среднее дополнительное давление на грунт под подошвой условного фундамента, определяется по формуле (6.4), Па.

$$l_{\phi} = l_p - 0.4m + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(0.25 \cdot \varphi), \quad (6.2)$$

$$b_{\phi} = b_p - 0.4m + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(0.25 \cdot \varphi), \quad (6.3)$$

где  $l_p, b_p$  – длина и ширина свайного ростверка, м;  $L$  – длина сваи, считая от поверхности грунта, м;  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, рад.

$$p_0 = \frac{n \cdot F_u}{l_{\phi} \cdot b_{\phi}}, \quad (6.4)$$

где  $n$  – число свай в ростверке;  $F_u$  – несущая способность сваи в Н, определяется по программе (см. макрос 4).

Примечание: При многослойном основании желтое поле макроса 6 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле (A2) (см. приложение к макросу 1). В макросе 6 в качестве глубины осреднения параметра  $\varphi$  принимается глубина погружения свай в грунт, параметра  $a$  – глубина, равная двойной ширине подошвы условного фундамента, отсчитываемая от нижнего торца свай.

## Макрос 7. Расчет осадки консолидации предварительно оттаянного грунта.

Цель расчета – определение осадки предварительно оттаянного слоя грунта под действием собственного веса, которая произойдет после передачи на основание полезной нагрузки (осадки консолидации). Эта осадка зависит от времени выдержки этого слоя после его оттаивания до указанного события и определяется по нижеследующей цепочке формул:

$$s_{\text{con}} = s_g - s_t, \quad (7.1)$$

где  $s_{\text{con}}, s_g, s_t$  – осадка соответственно консолидации, предельная, за время выдержки, м.

$$s_g = g \cdot a \cdot H_{p,th}^2 \cdot \rho_{sb} / 2, \quad (7.2)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $a$  – коэффициент сжимаемости грунта, 1/Па;  $H_{p,th}$  – глубина предварительного оттаивания, считая от поверхности грунта, м;  $\rho_{sb}$  – плотность грунта, взвешенного в воде, кг/м<sup>3</sup>.

$$s_t = s_g \cdot U_{z,r}, \quad (7.3)$$

где  $U_{z,r}$  – степень консолидации при возможности оттока воды по вертикали и горизонтали, б.р.

$$U_{z,r} = 1 - (1 - U_z) \cdot (1 - U_r), \quad (7.4)$$

где  $U_z, U_r$  – степень консолидации при возможности оттока воды только по вертикали и только по горизонтали, б.р.

$$U_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot C_v \cdot t}{4 \cdot H_{p,th}^2}\right), \quad (7.5)$$

где  $C_v$  – коэффициент консолидации, м<sup>2</sup>/ч;  $t$  – время выдержки, ч.

$$C_v = \frac{k_\phi}{g \cdot a \cdot \rho_{sb}}, \quad (7.6)$$

где  $k_\phi$  – коэффициент фильтрации предварительно оттаянного грунта, м/ч.

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{k_0 \cdot C_v \cdot t}{l_d^2 \cdot (0.5 \cdot \ln \frac{l_d}{r_d} - 0.37)}\right), \quad (7.7)$$

где  $k_0$  – безразмерный коэффициент, принимаемый равным 0 при отсутствии вертикального дренажа, 1 – при его наличии, 10 – при использовании для осушения грунта электроосмоса;  $l_d, r_d$  – полу расстояние между вертикальными дренами и радиус вертикальной дрены, м.

**Примечание:** При многослойном основании желтое поле макроса 7 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле (A2) (см. приложение к макросу 1). В макросе 5 в качестве глубины осреднения принимается глубина, равная двойной ширине подошвы фундамента, отсчитываемая от подошвы фундамента.

## Макрос 8. Расчет осадки фундамента на оттаивающем грунте.

Цель расчета – определение осадки оттаивающего грунта под действием полезной нагрузки и собственного веса. Программа рассчитывает три возможных случая: а) фундамент расположен на ММГ сливающегося типа; б) фундамент расположен на ММГ не сливающегося типа; в) фундамент расположен на предварительно оттаянных грунтах. Расчет осуществляется по формуле:

$$s = \begin{cases} \delta \cdot (H - h_\phi), & \text{случай а} \\ \delta \cdot (H - H_0) + s_p, & \text{случай б} \\ \delta \cdot (H - H_0) + s_p + s_{con}, & \text{случай в} \end{cases} \quad (8.1)$$

где  $\delta$  - относительная сжимаемость мерзлого грунта при оттаивании, определяется испытанием, при его отсутствии для предварительных расчетов может быть найдена по его льдосодержа-

нию  $g_i$  по формулам (8.2), (8.3), б.р.;  $s_p$  – осадка слоя талого грунта, мощностью  $H_0 - h_\phi$  под полезной нагрузкой, рассчитывается по программе (макрос 5 или 6), м;  $s_{con}$  – осадка консолидации предварительно оттаянного грунта, рассчитывается по программе (макрос 7), м;  $H_0$  – глубина залегания кровли ММГ к моменту передачи на них полезной нагрузки, считая от поверхности грунта, м;  $H$  – глубина залегания кровли ММГ к концу эксплуатации сооружения, считая от поверхности грунта, м;  $h_\phi$  – глубина залегания подошвы фундамента, считая от поверхности грунта, м.

$$\delta = 0.000134 \cdot g_i - 0.025, \text{ в интервале } 200 \text{ кг/м}^3 \leq g_i < 485 \text{ кг/м}^3, \\ \text{средняя ошибка аппроксимации } 2.44 \% , \text{ максимальная } - 5.88 \% , \quad (8.2)$$

$$\delta = 0.002222 \cdot g_i - 1.038, \text{ в интервале } 485 \text{ кг/м}^3 \leq g_i < 917 \text{ кг/м}^3, \\ \text{средняя ошибка аппроксимации } 0.13 \% , \text{ максимальная } - 0.83 \% , \quad (8.3)$$

где  $g_i = \rho \cdot w_{tot} \cdot (1 - w_w / w_{tot})$ ;  $\rho$  – плотность ММГ, кг/м<sup>3</sup>;  $w_{tot}, w_w$  – суммарная влажность ММГ и количество незамерзшей воды в нем, д.е.

Примечание: При многослойном основании желтое поле макроса 8 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле (A2) (см. приложение к макросу 1). В макросе 8 в качестве глубины осреднения принимается глубина, равная глубина залегания кровли ММГ к концу эксплуатации сооружения, считая от глубины залегания подошвы фундамента в случае «а» и от глубины залегания кровли ММГ к моменту передачи на них полезной нагрузки в случае «б» и «в».



## Макрос 9. Проверка устойчивости свайного фундамента на ММГ сливающегося типа на действие сил пучения.

Цель расчета – определение силы пучения и силы, удерживающей фундамент от выпучивания. Эти силы определяются по нижеприведенным формулам:

$$F_{fh} = \gamma_{af} \cdot \tau_{fh} \cdot u_p \cdot d_{th}, \quad (9.1)$$

$$F_{c,k,p}^y = F_{c,k,p} + R_{af} \cdot u_p \cdot z, \quad (9.2)$$

где  $F_{fh}$  – сила пучения, кН;  $\gamma_{af}$  – коэффициент, зависящий от материала сваи, принимается равным 1 для бетона, 0.7 для стали и 0.9 для дерева, б.р.;  $\tau_{fh}$  – удельная касательная сила пучения, принимается по данным табл. 7.8 СП 25.13330.2012, которую мы аппроксимировали выражениями (9.3), (9.4), кПа;  $u_p$  – периметр сваи, м;  $d_{th}$  – глубина сезонного оттаивания, м;  $F_{c,k,p}^y, F_{c,k,p}$  – сила удерживающая сваю от выпучивания и полезная нагрузка на сваю, расположенную соответственно под серединой и краем здания и под опорой надземного трубопровода и ЛЭП, кН;  $R_{af}$  – расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу на боковой поверхности смерзания в пределах длины сваи, находящейся в ММГ, определяются в зависимости от расчетных температур грунта на ее боковой поверхности  $T_e$  по формулам (1.7) – (1.9) в кПа, а сами расчетные температуры – по формулам (1.5а) – (1.7а) в  $^{\circ}\text{C}$ ;  $z$  – глубина погружения сваи в ММГ, считая от подошвы слоя сезонного оттаивания, м.

$$\tau_{fh} = -1.5 \cdot d_{th} + 116.6, \text{ в интервале } I_L \leq 0.5, \text{ средняя ошибка аппроксимации } 2.55 \%, \text{ максимальная } - 3.78 \%, \quad (9.3)$$

$$\tau_{fh} = -20 \cdot d_{th} + 150, \text{ в интервале } I_L > 0.5, \text{ средняя ошибка аппроксимации } 0.0 \%, \text{ максимальная } - 0.0 \%, \quad (9.4)$$

**Примечание 1:** Для упрощения расчетов мелкие и пылеватые пески в слое сезонного оттаивания со степенью влажности

$S_r$  заменены условным глинистым грунтом с коэффициентом консистенции равным  $I_L = 0.526 \cdot S_r$ .

**Примечание 2:** При многослойном основании желтое поле макроса 9 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формулам (A1) и (A2) (см. приложение к макросу 1). В макросе 9 в качестве глубины осреднения параметра  $I_L$  принимается глубина, равная мощности слоя сезонного оттаивания, параметров  $C, \lambda$  - глубина погружения сваи в ММГ, считая от подошвы слоя сезонного оттаивания.

### **Макрос 10. Проверка устойчивости столбчатого фундамента на ММГ сливающегося типа на действие сил пучения.**

Цель расчета – определение силы пучения и силы, удерживающей фундамент от выпучивания. Эти силы определяются по нижеприведенным формулам:

$$F_{fh} = \gamma_{af} \cdot \tau_{fh} \cdot u_{\kappa} \cdot d_{th}, \quad (10.1)$$

$$F_{c,k,p}^y = F_{c,k,p} + R_{sh} \cdot u_{\delta} \cdot z, \quad (10.2)$$

где  $F_{fh}$  – сила пучения, кН;  $\gamma_{af}$  – коэффициент, зависящий от материала фундаментной колонны, принимается равным 1 для бетона, 0.7 для стали и 0.9 для дерева, б.р.;  $\tau_{fh}$  – удельная касательная сила пучения, принимается по данным табл. 7.8 СП 25.13330.2012, которую мы аппроксимировали выражениями (9.3), (9.4), кПа;  $u_{\kappa,\delta}$  – периметр соответственно фундаментной колонны и фундаментного башмака, м;  $d_{th}$  – глубина сезонного оттаивания, м;  $F_{c,k,p}^y, F_{c,k,p}$  – сила удерживающая фундамент от выпучивания и полезная нагрузка на фундамент, расположенный соответственно под серединой и краем здания и под опорой надземного трубопровода и ЛЭП, кН;  $R_{sh}$  – расчетное сопротивление мерзлого грунта сдвигу грунта по грунту в пределах длины фундамента, находящегося в ММГ, определяются в зави-

симости от расчетных температур грунта на боковой поверхности фундамента  $T_e$  по данным табл. В.4 СП 25.13330.2012, которые нами аппроксимированы выражениями (10.3) – (10.4) в кПа, а сами расчетные температуры – по формулам (1.5а) – (1.7а) в  $^{\circ}\text{C}$ ;  $z$  - глубина погружения сваи в ММГ, считая от подошвы слоя сезонного оттаивания, м.

$$R_{sh} = 164.844 \cdot (-T_e)^{0.526}, \text{ песчаный грунт, средняя ошибка аппроксимации } 1.95 \% , \text{ максимальная } - 4.6 \% , \quad (10.3)$$

$$R_{sh} = 112.505 \cdot (-T_e)^{0.555}, \text{ глинистый грунт, средняя ошибка аппроксимации } 3.61 \% , \text{ максимальная } - 6.25 \% , \quad (10.4)$$

Примечание: При многослойном основании желтое поле макроса 10 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формулам (А1) и (А2) (см. приложение к макросу 1). В макросе 10 в качестве глубины осреднения параметра  $I_L$  принимается глубина, равная мощности слоя сезонного оттаивания, параметров  $C, \lambda$  - глубина погружения фундамента в ММГ, считая от подошвы слоя сезонного оттаивания.

### **Макрос 11. Проверка устойчивости свайного фундамента на ММГ не сливающегося типа на действие сил пучения.**

Цель расчета – определение силы пучения и силы, удерживающей сваю от выпучивания. Эти силы определяются по нижеприведенным формулам:

$$F_{fh} = \gamma_{af} \cdot \tau_{fh} \cdot u \cdot d_f, \quad (11.1)$$

$$F_{c,k,p}^y = F_{c,k,p} + \gamma_m \cdot f_c \cdot u \cdot z, \quad (11.2)$$

где  $F_{fh}$  – сила пучения, кН;  $\gamma_{af}$  – коэффициент, зависящий от материала сваи, принимается равным 1 для бетона, 0.7 для стали и 0.9 для дерева, б.р.;  $\tau_{fh}$  – удельная касательная сила пучения, принимается по данным табл. 7.8 СП 25.13330.2012, которую мы

аппроксимировали выражениями (9.3), (9.4), кПа;  $u$  – периметр сваи, м;  $d_f$  – глубина сезонного промерзания, м;  $F_{c,k,p}^y$ ,  $F_{c,k,p}$  – сила удерживающая фундамент от выпучивания и полезная нагрузка на сваю, расположенную соответственно под серединой и краем здания и под опорой надземного трубопровода и ЛЭП, кН;  $\gamma_m$  – безразмерный коэффициент, принимаемый равным 0.8 в случае предварительно оттаянного грунта и 1 – талого;  $f_c$  – расчетные сопротивления грунта по ее боковой поверхности сваи в кПа, принимаются по данным табл. 1 Приложения 4 Учебника, которые автором аппроксимированы выражениями (4.14) – (4.19);  $z$  – глубина погружения сваи в ММГ, считая от подошвы слоя сезонного оттаивания, м.

Примечания:

1. Если слой сезонного промерзания представлен мелким и пылеватым песком со степенью влажности  $S_r$ , то последний пересчитывается на условный показатель консистенции  $I_L 1 = 0.526 \cdot S_r$  и далее песок рассматривается как глинистый грунт с тем же значением  $\tau_{fn}$ .

2. Если грунт, расположенный непосредственно под подошвой слоя сезонного промерзания, представлен песчаным грунтом, то он заменяется условным глинистым грунтом с тем же значением  $f_c$ . Показатель консистенции условного грунта принимается: песок крупный и средний  $I_L 2 = -0.01$ , песок мелкий  $I_L 2 = 0.24$ , песок пылеватый  $I_L 2 = 0.49$ .

3. При многослойном основании желтое поле макроса 11 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле (A2) (см. приложение к макросу 1). В макросе 11 в качестве глубины осреднения параметра  $I_L 1$  принимается глубина, равная мощности слоя сезонного промерзания,  $I_L 2$  – глубина погружения фундамента в ММГ, считая от подошвы слоя сезонного промерзания.

## Макрос 12. Проверка устойчивости столбчатого и ленточного фундамента на ММГ не сливающегося типа на действие сил пучения.

Цель расчета – определение силы пучения и силы, удерживающей фундамент от выпучивания. Эти силы определяются по нижеприведенным формулам:

$$F_{fh} = \gamma_{af} \cdot \tau_{fh} \cdot u_k \cdot d_f, \quad (12.1)$$

$$F_{c,k,p}^y = F_{c,k,p} + \gamma_m \cdot f_c \cdot u_b \cdot z, \quad (12.2)$$

где  $F_{fh}$  – сила пучения, кН;  $\gamma_{af}$  – коэффициент, зависящий от материала фундаментной колонны, принимается равным 1 для бетона, 0.7 для стали и 0.9 для дерева, б.р.;  $\tau_{fh}$  – удельная касательная сила пучения, принимается по данным табл. 7.8 СП 25.13330.2012, которую мы аппроксимировали выражениями (9.3), (9.4), кПа;  $u_k$  – периметр фундаментной колонны, м;  $u_b$  – периметр фундаментного башмака, м;  $d_f$  – глубина сезонного промерзания, м;  $F_{c,k,p}^y, F_{c,k,p}$  – сила удерживающая фундамент от выпучивания и полезная нагрузка на фундамент, расположенный соответственно под серединой и краем здания и под опорой надземного трубопровода и ЛЭП, кН;  $\gamma_m$  – безразмерный коэффициент, принимаемый равным 0.8 в случае предварительно оттаянного грунта и 1 – талого;  $f_c$  – расчетные сопротивления грунта по грунту в кПа, принимаются по данным табл. 1 Приложения 4 Учебника, которые автором аппроксимированы выражениями (4.14) – (4.19);  $z$  – глубина погружения фундамента в ММГ, считая от подошвы слоя сезонного оттаивания, м.

### Примечания:

1. Если слой сезонного промерзания представлен мелким и пылеватым песком со степенью влажности  $S_r$ , то последний пересчитывается на условный показатель консистенции  $I_L 1 = 0.526 \cdot S_r$  и далее песок рассматривается как глинистый грунт с тем же значением  $\tau_{fh}$ .

2. Если грунт, расположенный непосредственно под подошвой слоя сезонного промерзания, представлен песчаным грунтом, то он заменяется условным глинистым грунтом с тем же значением  $f_c$ . Показатель консистенции условного грунта принимается: песок крупный и средний  $I_L 2 = -0.01$ , песок мелкий  $I_L 2 = 0.24$ , песок пылеватый  $I_L 2 = 0.49$ .

3. При многослойном основании желтое поле макроса 12 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле (A2) (см. приложение к макросу 1). В макросе 12 в качестве глубины осреднения параметра  $I_L 1$  принимается глубина, равная мощности слоя сезонного промерзания, параметра  $I_L 2$  – глубина погружения фундамента в ММГ, считая от подошвы слоя сезонного промерзания.

### **Макрос 13. Расчет подземного трубопровода на горячих и теплых участках на прочность и устойчивость.**

Цель расчета – проверка предельных условий на прочность трубопровода в продольном направлении и на его общую устойчивость в продольном направлении, а также на отсутствие пластических деформаций в продольном и кольцевом направлениях и на недопустимость всплытия.

Предельное условие по проверке прочности записывается следующим образом:

$$|\sigma_{\text{lim}N}| \leq \frac{1}{\gamma_n} \sigma_{\text{tem}}, \quad (13.1)$$

где  $\sigma_{\text{lim}N}$  – суммарное продольное напряжение в трубе, Па;  $\gamma_n$  — безразмерный коэффициент надежности, принимается по данным СНиП 2.05.06—85 от 1.0 до 1.1;  $\sigma_{\text{tem}}$  — временное сопротивление стали, Па, принимается по ГОСТ ТУ 14-3-1344-85.

Суммарное продольное напряжение в трубе определяется по формуле:

$$\sigma_{limN} = 0,3\sigma_{cir} + \sigma_T + \sigma_s, \quad (13.2)$$

где  $\sigma_{cir}$  - кольцевое напряжение от внутреннего давления в трубе, Па;  $\sigma_T$ ,  $\sigma_s$ , — продольные напряжения в трубе от изменения температуры и упругого изгиба трубопровода при осадке, Па, определяемые по формулам:

$$\sigma_{cir} = 1.15 \cdot \frac{p_p \cdot d_{p,in}}{2\delta_p}, \quad (13.3)$$

$$\sigma_T = E_{st} \alpha_T \Delta T, \quad (13.4)$$

$$\sigma_s = 3 \cdot 10^5 \cdot \psi_p \cdot \sqrt{\frac{q_{ent} \cdot s}{\beta_1 \cdot d_p \cdot \delta_p}}, \quad (13.5)$$

где  $p_p$  — внутреннее давление в трубе. Па;  $d_{p,in}$  — внутренний диаметр трубы, м;  $\delta_p$  — толщина стенки трубы, м;  $E_{st}$  — модуль упругости стали,  $2 \cdot 10^{11}$  Па;  $\alpha_T$  — коэффициент линейного расширения стали,  $1,2 \cdot 10^{-5}$  1/°С;  $\Delta T$  — разность температуры стенки трубы, принимается  $\pm 40^\circ\text{C}$ ;  $d_p$  — внешний диаметр трубы, м;  $s$  — осадка трубопровода при оттаивании ВМГ, м;  $E$  — модуль линейной деформации талого грунта. Па;  $\psi_p$ ,  $\beta_1$  — безразмерные коэффициенты, определяющие работу трубы на упругом основании при изгибе, зависит от длины участка трубопровода, подверженного изгибу  $L_{sp}$ , который определяется по формуле (13.10), м;  $q_{ent}$  — суммарная весовая нагрузка на 1 м трубы, определяемая по формуле (13.8), Н/м.

Осадка трубопровода при оттаивании ММГ определяется по формуле (13.6).

$$s = \begin{cases} \delta \left( H_{th} - h_p - \frac{d_{ins}}{2} \right), & \text{ММГ сливающегося типа} \\ \delta (H_{th} - H_0), & \text{ММГ не сливающегося типа} \end{cases} \quad (13.6)$$

где  $d_{ins}$  – диаметр трубопровода с кольцевой теплоизоляцией, м;  $H_{th}$ ,  $H_0$ ,  $h_p$  – глубина соответственно оттаивания ММГ, начального расположения ее кровли и расположения центра трубопровода, считая от поверхности грунта, м;  $\delta$  – относительная сжимаемость ММГ при оттаивании, определяется по эмпирической формуле (13.7).

$$\delta = \begin{cases} 0.000134 \cdot g_i - 0.025 & \text{при } g_i < 485, \\ 0.002222 \cdot g_i - 1.038 & \text{при } g_i \geq 485, \end{cases} \quad (13.7)$$

где  $g_i$  – льдосодержание ММГ, кг/м<sup>3</sup>;

$g_i = \rho_f \cdot w_{tot} \cdot (1 - w_w / w_{tot})$ ;  $\rho_f$  – плотность ММГ, кг/м<sup>3</sup>;

$w_{tot}, w_w$  – суммарная влажность ММГ и количество незамерзшей воды внем, д.е.

$$q_{ent} = 1,1 \cdot (q_p + q_{ins} + q_{pr} + q_{ba} + q_{soil}), \quad (13.8)$$

$$\left. \begin{aligned} q_p &= \frac{\pi}{4} \rho_{st} \cdot g \cdot (d_p^2 - d_{p,in}^2) \\ q_{ins} &= \frac{\pi}{4} \rho_{ins} \cdot g \cdot (d_{ins}^2 - d_p^2) \\ q_{pr} &= \frac{\pi}{4} \rho_{pr} \cdot g \cdot d_{p,in}^2 \\ q_{soil} &= 0.88 \cdot \rho_{th} \cdot d_{ins} \cdot h_p \end{aligned} \right\}, \quad (13.9)$$

где  $q_p, q_{ins}, q_{pr}, q_{ba}, q_{soil}$  – вес соответственно трубы, теплоизоляции, продукта, балласта и грунта, лежащих на трубе, Н/м;



$\rho_{st}, \rho_{ins}, \rho_{pr}, \rho_{th}$  – плотности соответственно стали, теплоизоляции, продукта и талого грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, 9.81 м/с<sup>2</sup>.

$$L_{sp} = \sqrt[4]{\frac{384 \cdot E_{st} \cdot I_p \cdot s}{\beta_1 \cdot q_{ent}}}, \quad (13.10)$$

$$\beta_1 = 1 + 6w + 16w^2, \quad (13.11)$$

$$w = \frac{14389d_p}{L_{sp} \sqrt[3]{k_b \cdot L_{sp} \cdot d_p / \delta_p}}, \quad (13.12)$$

$$\psi_p = \frac{10 + 15 \cdot w + 6 \cdot w^2}{10 \cdot (1 + 2 \cdot w)}, \quad (13.13)$$

где  $I_p$  — экваториальный момент инерции сечения трубы:

$$I_p = \frac{\pi \cdot (d_p^4 - d_{p.in}^4)}{64}; \quad k_b \text{ — коэффициент постели, определяемый}$$

по формуле (13.14), Н/м<sup>3</sup>.

$$k_b = 0,523E / d_p, \quad (13.14)$$

Предельные условия по проверке общей устойчивости записываются следующим образом:

$$(0,2\sigma_{cir} + \sigma_T) \cdot F_p \leq N_{lim}, \quad (13.15)$$

где  $F_p = \frac{\pi}{4}(d_p^2 - d_{p.in}^2)$ ,  $N_{lim}$  — максимальные сжимающие усилия,

которые могут быть восприняты трубой без потери ее устойчивости в продольном направлении, определяются по формуле (13.16) – (13.19), Н; остальные обозначения даны выше.

$$N_{lim} = \min \begin{cases} 4,09 \cdot \sqrt[11]{p_0^2 \cdot q_H^4 \cdot F_p^2 \cdot E_{st}^5 \cdot I_p^3}, \\ 2 \cdot \sqrt{k_b \cdot d_p \cdot E_{st} \cdot I_p}, \end{cases} \quad (13.16)$$

$$p_0 = \pi \cdot d_p (p_1 \cdot tg\varphi + c), \quad (13.17)$$

$$p_1 = \frac{1.6 \cdot g \cdot \rho_{th} \cdot h_p \cdot d_p \left[ 1 + tg^2 \left( \frac{\pi}{4} - 0,5\varphi \right) \right] + q_1}{\pi \cdot d_p}, \quad (13.18)$$

$$q_1 = 0,95(q_p + q_{ins} + q_{ba}), \quad (13.18)$$

$$q_H = q_1 + 0.8 \cdot g \cdot \rho_{th} \cdot d_p \cdot \left( h_p - \frac{\pi d_p}{8} \right), \quad (13.19)$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения талого грунта, рад;  $c$  — сцепление талого грунта, Па; остальные обозначения даны выше.

Предельные условия по проверке отсутствия пластических деформаций записывается следующим образом:

$$|\sigma_{limN}| \leq \frac{1}{\gamma_n} \sigma_{fl}, \quad (13.20)$$

$$|\sigma_{cir}| \leq \frac{1}{\gamma_n} \sigma_{fl}, \quad (13.21)$$

Предельные условия по проверке отсутствия всплытия трубопровода записываются следующим образом:

$$q_{ba,w} \leq q_{ba}, \quad (13.22)$$

где  $q_{ba,w}$  — вес балласта, обеспечивающий устойчивость трубопровода против всплытия, определяется по формуле (13.23).

$$q_{ba,w} = (1.05 \cdot g \cdot \rho_w \cdot \frac{\pi \cdot d_{ins}^2}{4} - \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s \cdot (1 + w_{tot})} \cdot q_{soil} - 0.95 \cdot (q_p + q_{ins})) \cdot \rho_{ba} / (\rho_{ba} - \rho_w), \quad (13.23)$$

где  $\rho_s, \rho_w, \rho_{ba}$  — плотность соответственно минеральных частиц грунта, воды и материала балласта, кг/м<sup>3</sup>; остальные обозначения даны выше.

Примечание: При многослойном основании желтое поле макроса 13 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле (A2) (см. приложение к макросу 1). В случае ММГ сливающегося типа в качестве глубины осреднения при принимается глубина, равная глубине оттаивания ММГ, считая

от поверхности грунта, а для параметров  $ro_f, w_{tot}, w_w$ , считая от нижней образующей трубопровода. В случае ММГ не сливающегося типа в качестве глубины осреднения принимается глубина начального расположения кровли ММГ, считая от поверхности грунта, а для параметров  $ro_f, w_{tot}, w_w$  - глубина оттаивания ММГ, считая от ее кровли в начальный момент времени.

#### **Макрос 14. Расчет наземного трубопровода на горячих и теплых участках на прочность и устойчивость.**

Цель расчета – проверка предельных условий на прочность трубопровода в продольном направлении и на его общую устойчивости в продольном направлении, а также на отсутствие пластических деформаций в продольном и кольцевом направлениях.

Проверка на прочность осуществляется по методике, изложенной для подземного трубопровода, со следующими исправлениями и добавлениями.

1. Формула (13.6) преобразуется:

$$s = \begin{cases} \delta \cdot H_{th}, & \text{ВМГ сливающегося типа} \\ \delta \cdot (H_{th} - H_0), & \text{ВМГ не сливающегося типа} \end{cases}, \quad (14.1)$$

2. Формула (13.9) записывается в виде:

$$q_{soil} = \begin{cases} g \cdot \rho_{dam} \cdot d_p \frac{h_0(b_{dam} + 0.5 \cdot h_0 \cdot n_d)}{b_{dam} + h_0 \cdot n_d}, & \end{cases} \quad (14.2)$$

где  $b_{dam}$  — ширина гребня обваловки, м;  $h_0$  — высота обваловки над верхней образующей трубы, м;  $n_d$  — заложение откоса обваловки;  $\rho_{dam}$  — плотность грунта обваловки в талом состоянии, кг/м<sup>3</sup>.

3. В формуле (13.18) принимается:  $h_p = h_0 + d_p / 2$ .

4. Во всех формулах вес изоляции и балласта принимаются равными:  $q_{ins} = q_{ba} = 0$ .

Проверка на общую устойчивость наземного трубопровода заключается в проверке предельного условия (13.15). При этом максимальные сжимающие усилия, которые могут быть восприняты наземным трубопроводом без потери его устойчивости в продольном направлении, следует вычислять по формуле:

$$N_{\text{lim}} = 4.09 \cdot \sqrt[4]{\rho_0^2 \cdot q_E^4 \cdot F_p^2 \cdot E_{st}^5 \cdot I_p^3}, \quad (14.3)$$

где  $\rho_0$  — параметр, вычисляемый по формулам (13.17), в которых вместо значений  $\rho_{th}$ ,  $\varphi$ ,  $c$  следует подставить  $\rho_{dam}$ ,  $\varphi_{dam}$ ,  $c_{dam}$  — соответственно, плотность, угол внутреннего трения и сцепление грунта обваловки в талом состоянии, а в качестве  $h_p$  принять  $h_0 + d_p/2$ .

$$q_E = E_{pas} - E_{act}, \quad (14.4)$$

$$E_{pas} = 0,4 \cdot g \cdot \rho_{dam} (h_1^2 - h_2^2) \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{dam}}{2} \right) + 0,8 \cdot q_{soil} \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{dam}}{2} \right) + 2c_{dam} (h_1 - h_2) \cdot \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{dam}}{2} \right) + q_p \cdot \text{tg} \varphi_{dam} \quad (14.5)$$

$E_{act}$  для глинистых грунтов принимается равной 0.0, для песчаных — вычисляется по формуле:

$$E_{act} = 0,4 \cdot g \cdot \rho_{dam} \cdot h_1^2 \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{dam}}{2} \right) + 0,8 q_{soil} \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{dam}}{2} \right), \quad (14.6)$$

$$h_2 = h_1 - (b_{dam} + h_0/n_d - 0,5h_1) \cdot \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{dam}}{2} \right), \quad (14.7)$$

где  $q_{soil}$  — вес грунта, лежащего на трубе, вычисляется по формуле (4.62), Н/м;  $h_1$  — расстояние от дневной поверхности земли до верхней образующей трубы, м.

Проверка на недопустимость пластических деформаций материала наземного трубопровода заключается в контроле выполнения условий (13.20), (13.21).

Примечание: При многослойном основании желтое поле макроса 14 заполняется осредненными грунтовыми характеристиками. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле (А2) (см. приложение к макросу 1). В случае ММГ сливающегося типа в качестве глубины осреднения принимается глубина, равная глубине оттаивания ММГ, считая от поверхности грунта. В случае ММГ не сливающегося типа в качестве глубины осреднения для параметра  $E$  принимается глубина начального расположения кровли ММГ, считая от поверхности грунта, а для параметров  $ro_f, w_{tot}, w_w$  - глубина оттаивания ММГ, считая от ее кровли в начальный момент времени.

### **Макрос 15. Расчет опоры надземного трубопровода, расположенного на ММГ сливающегося типа, на действие горизонтальной силы.**

Цель расчета – проверка предельного условия на прочность материала сваи. В данной программе рассматриваются сваи из стальных труб с ростверком, расположенном выше поверхности грунта. Для этого случая предельное условие записывается:

$$Y \leq Y_0, \quad (15.1)$$

где  $Y$  – перемещение головы сваи под действием горизонтальной силы, определяется по формуле (15.2), м;  $Y_0$  – предельно допустимое перемещение головы сваи, определяется по формуле (15.5), м.

$$Y = \frac{l_k^2}{6EJ} \cdot \frac{1 - \cos(\delta \cdot l_k)}{\delta \cdot \sin(\delta \cdot l_k)} \cdot F_h, \quad (15.2)$$

где;  $l_k$  – изгибаемый участок сваи, определяется по формуле (15.3), м;  $EJ$  – жесткость сечения сваи, н.м<sup>2</sup>;  $\delta$  – параметр, учитывающий влияние вертикальной нагрузки, определяется по формуле (15.4), 1/м;  $F_h$  – горизонтальная нагрузка на голову сваи в уровне ростверка, зависит от давления ветра и определяется по указаниям СНиП 2.01.07-85, Н.

Для стальных труб  $EJ = E \cdot \frac{\pi}{64} (d_{out}^4 - d_{in}^4)$  ( $E$  – модуль упругости стали, Па;  $d_{out}, d_{in}$  – внешний и внутренний диаметр трубы, из которой выполнена свая, м).

$$l_k = l_0 + D_{th} + 1.5 \cdot d_{out}, \quad (15.3)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{F_v}{EJ}}, \quad (15.4)$$

$l_0$  – высота ростверка сваи над дневной поверхностью, м;  $D_{th}$  – глубина сезонного оттаивания грунта, м;  $F_v$  – вертикальная нагрузка на сваю, определяется по формуле  $F_v \leq F_u / \gamma_n$  ( $F_u$  – несущая способность сваи, определяется по программе см. макрос1, Н;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности, принимается равным 1.4).

Допустимое перемещение головы трубчатой металлической сваи определяется:

$$Y_u \leq \frac{\sigma_{fl} \cdot l^2 \cdot W}{6EJ}, \quad (15.5)$$

где  $\sigma_{fl}$  – предел текучести стали, Па;  $W$  – момент сопротивления сечения сваи, м<sup>3</sup> ( $W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_{out}^4 - d_{in}^4}{d_{out}}$ ).

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

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

<https://yadi.sk/d/TfQ8SPCPCjRd1w>

Центр образовательного и научного консалтинга  
(ЦОиНК, ИП Трусова Л.А.)  
[www.conseducenter.ru](http://www.conseducenter.ru)

Подписано в печать 09.03.2021. Формат 84х60Х1/16. Бумага офсетная  
Тираж 30 экз.

Отпечатано в ООО «Дизайн»

142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1

Email: [zakaz@oodizain.ru](mailto:zakaz@oodizain.ru)