

УДК 624.139

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-56-82](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-56-82)

EDN: RSJSVQ

РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ ИНЖЕНЕРНЫМИ И ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

А.Г. АЛЕКСЕЕВ^{1,2}, д-р техн. наук

¹ Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Суровые климатические условия Российской Федерации предопределяют сезонное промерзание грунта и развитие криогенных процессов, негативно влияющих на фундаменты и заглубленные сооружения. Величина сил морозного пучения существенно зависит от глубины промерзания грунта, что делает оценку глубины промерзания грунта весьма актуальной.

Цель. Расчет и оценка глубины сезонного промерзания грунтов инженерными и численными методами.

Материалы и методы. Выполнялись расчеты глубины промерзания грунта по двум площадкам, сложенным супесями и суглинками. Инженерные расчеты выполнялись по четырем методикам, изложенным в следующих нормативных документах: «Рекомендации по теплотехническим расчетам и прокладке трубопроводов в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов», «Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах», «Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов», «Рекомендации по прогнозу теплового состояния мерзлых грунтов», а численные – в программных комплексах Frost 3D и Борея 3D. Экспериментальные площадки расположены в Тымовском районе Сахалинской области, где прокладывался трубопровод Сахалин-2.

Результаты. Результаты исследований показали, что инженерные методики дают завышенные результаты при использовании в оценке искомой глубины промерзания грунта большого спектра климатических и грунтовых параметров: температура воздуха, высота и плотность снежного покрова, скорость ветра, коэффициенты конвективного теплообмена, суммарная солнечная радиация, альbedo поверхности, максимальная упругость водяных паров и др. В то же время использование формулы Стефана с ограниченным набором входных параметров дает близкие по значениям результаты. Численные методы показали близкие результаты между собой, но на 32–47 % больше, чем результаты инженерных расчетов при оголенной поверхности грунта.

Выводы. Предлагается проведение научных исследований динамики изменения глубины промерзания грунта в полевых условиях и сопоставление с результатами инженерных и численных расчетов для совершенствования данных методик.

Ключевые слова: глубина сезонного промерзания грунта, инженерные и численные методы расчета, высота снежного покрова, климатические параметры

Для цитирования: Алексеев А.Г. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов инженерными и численными методами. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):56–82. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-56-82](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-56-82)

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.06.2024

Поступила после рецензирования 18.07.2024

Принята к публикации 25.07.2024

CALCULATION OF SEASONAL SOIL FREEZING DEPTH BY ENGINEERING AND NUMERICAL METHODS

A.G. ALEKSEEV^{1,2}, Dr. Sci. (Engineering)

¹Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

Abstract

Introduction. Provided by severe climatic conditions in the Russian Federation, seasonal soil freezing and emerging cryogenic processes cause frost heaving that negatively affect foundations and buried structures. As the magnitude of frost heaving forces significantly depends on the soil freezing depth, the assessment of soil freezing depth becomes very relevant.

Aim. Calculation and estimation of the depth of seasonal soil freezing by engineering and numerical methods.

Materials and methods. Calculations of soil freezing depth were performed for two sites composed of sandy loam and loam. Engineering calculations were performed according to four methods set forth in the normative documents, namely *Recommendations on Thermal Engineering Calculations and Pipeline Laying in Areas with Deep Seasonal Soil Freezing*, *Handbook on Construction on Permafrost Soils*, *Recommendations on Accounting and Prevention of Deformations and Forces of Soil Frost Heaving*, *Recommendations on Forecasting the Thermal State of Permafrost Soils*. Numerical calculations were performed in the Frost 3D and Borey 3D software systems. The experimental sites are located in the Tymovsky district of Sakhalin Oblast, where the Sakhalin-2 pipeline was laid.

Results. The engineering methods for calculating the required depth of soil freezing give overestimated results when using a large range of climatic and soil parameters: air temperature, snow cover height and density, wind speed, convective heat transfer coefficients, total solar radiation, surface albedo, maximum elasticity of water vapor, etc. At the same time, the use of Stephan's formula with a limited set of input parameters gives results close in values. The numerical methods showed close results among themselves, though 32–47 % more than the results of engineering calculations at bare ground surface.

Conclusions. Research on the dynamics of soil freezing depth in field conditions is suggested to be carried out and compared with the results of engineering and numerical calculations to improve these methods.

Keywords: seasonal soil freezing depth, engineering and numerical calculation methods, snow cover height, climatic parameters

For citation: Alekseev A.G. Calculation of seasonal soil freezing depth by engineering and numerical methods. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):56–82. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-56-82](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-56-82)

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 20.06.2024

Revised 18.07.2024

Accepted 25.07.2024

Территория Российской Федерации содержит различные климатические и геологические зоны, характеризующиеся различными свойствами, но, несмотря на это, практически вся подвержена сезонному промерзанию грунта. Промерзание грунта вызывает развитие морозного пучения влажных песчаных и глинистых грунтов, приводя к деформированию поверхности грунта и сооружений, расположенных в промерзающем грунте. Прогнозирование глубины и скорости промерзания грунта в условиях изменения климата и неоднородности грунтов является важной научно-практической задачей [1–12].

Имеющиеся на сегодня инженерные методы нашли отражение в нормативной документации как федерального [13, 14], так и отраслевого уровня [15–18], кроме того, разработаны и успешно применяются несколько российских программных комплексов, в меньшей степени – зарубежных [1]. На глубину промерзания влияют факторы климатического направления (температура воздуха, высота и плотность снежного покрова, скорость ветра, коэффициенты конвективного теплообмена, суммарная солнечная радиация, альбедо поверхности, максимальная упругость водяных паров и др.), а также геологические параметры (тип грунта в разрезе, физические и теплофизические свойства грунта). Определение данных параметров вызывает трудности, что в конечном счете влияет на результат. Поэтому выбор эффективного метода оценки величины глубины промерзания, опирающийся на базовый, легко определяемый набор входных параметров, является актуальным вопросом.

Анализ эффективности определения сезонного промерзания грунтов выполнялся на основе расчетов по четырем инженерным методикам и в двух программных комплексах. Расчеты велись для Тымовского района Сахалинской области, где прокладывался трубопровод Сахалин-2. Выполнялись расчеты для оголенной поверхности и поверхности грунта, находящейся под слоем снега, для двух типов грунта: супеси текучей (ПК1181 и 1190) и суглинка мягкопластичного (ПК1185 и 1202+50).

Инженерный расчет глубины промерзания грунта под слоем снега велся по четырем источникам: «Рекомендации по теплотехническим расчетам и прокладке трубопроводов в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов» [15]; «Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах» [16]; «Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов» [17]; «Рекомендации по прогнозу теплового состояния мерзлых грунтов» [18], а также в двух программных комплексах – Frost 3D и Борей 3D.

1. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов по «Рекомендациям по теплотехническим расчетам и прокладке трубопроводов в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов» [15]

1.1. Расчеты для пикетов ПК1181 и 1190

1.1.1. Исходные данные

В связи с тем, что метеорологические данные наблюдений за период не менее 10 лет для данного района – Тымовского (Сахалинская область) отсутствуют, данные о температуре воздуха приняты по близлежащему району острова Сахалин – г. Кировское. Высота снежного покрова принята различной, для сравнительного анализа: $h_c = 0; 0,14; 1,12$ и $1,58$ м.

На данных пикетах ПК1181 и 1190 с поверхности залегают супеси текущие, имеющие следующие физические характеристики: $W = 0,339$; $W_1 = 0,286$; $W_p = 0,232$; $I_p = 5,4$; $I_L > 1$; $\rho = 1,66$ г/см³; $\rho_d = 1,20$ г/см³; $\rho_s = 2,69$ г/см³; $e = 1,24$; $S_r = 0,81$.

Расчетные значения коэффициентов теплопроводности и объемной теплоемкости мерзлого и талого грунтов λ_p , C_f и λ_{th} , C_{th} принимались по [13] в зависимости от плотности минерального скелета грунта ρ_d и суммарной влажности грунта W_{tot} .

Суммарная влажность грунта W_{tot} для участков, где предусматривается вертикальная планировка местности согласно [15] п. 2.2.13 для суглинков и супесей, принималась равной $W_{tot} \approx W_p$.

Тогда для супеси при $W_{tot} = W_p = 0,232$ и $\rho_d = 1,20$ г/см³ коэффициенты теплопроводности и объемной теплоемкости равны:

для мерзлого грунта: $\lambda_f = 1,80$ Вт/м °С = $1,54$ ккал/мч °С; $C_f = 2100$ кДж/м³ °С = 500 ккал/м³ °С;

для талого грунта: $\lambda_{th} = 1,71$ Вт/м °С = $1,48$ ккал/мч °С; $C_{th} = 2945$ кДж/м³ °С = 701 ккал/м³ °С.

Величина удельной теплоты замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта определяется в соответствии с [13] по формуле:

$$Z_v = Z_0 (W_{tot} - W_w) \rho_d, \quad (1)$$

где $Z_0 = 3,35 \times 10^4$ Дж/н (80 ккал/кг) – скрытая теплота плавления льда (замерзания воды);

ρ_d – плотность сухого грунта (скелета грунта), кг/м³;

W_w – весовое содержание незамерзшей воды при данной температуре грунта, д. е. Приближенно W_w для незасоленного грунта можно принять равным:

$$W_w = K_n W_p, \quad (2)$$

где W_p – влажность на границе пластичности (раскатывания), д. е.;

K_n – коэффициент, принимаемый по [13] в зависимости от числа пластичности грунта I_p и температуры грунта T , °С.

Температуру грунта можно определить следующим образом:

$$T = 0,4 T_{c3}, \quad (3)$$

где T_{c3} – среднезимняя температура воздуха (для г. Кировское по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» [19] $T_{c3} = -13,9$ °С).

Тогда $T = 0,4 T_{c3} = 0,4 \times (-13,9) = -5,56$ °С, по [13] $K_n = 0,28$.

$$W_w = K_n W_p = 0,28 \times 0,232 = 0,065.$$

Величина удельной теплоты замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта составила:

$$Z_v = Z_0 (W_{\text{лот}} - W_w) \rho_d = 3,35 \times 10^4 (0,232 - 0,065) \times 12\,000 = 6,7 \times 10^7 \text{ Дж/м}^3.$$

1.1.2. Методика расчета

Глубина сезонного промерзания грунта, H_m , определяется по формуле:

$$H_m = \frac{A}{K_a}, \quad (4)$$

где K_a – параметр, вычисляемый из выражения:

$$K_a = \sqrt{\frac{Z_v + C_f T_{c3}}{10^7 \lambda_f T_{c3}}}, \quad (5)$$

A – коэффициент, определяемый [15] в зависимости от приведенной температуры θ при значении τ , равной максимальной продолжительности зимнего периода;

$$\theta = \frac{T_0}{T_0 + T_m} \beta. \quad (6)$$

Учитывая, что для рассматриваемых условий величина $\tau = 6$ месяцев, то в соответствии с графиком [15] значения величины параметра A изменяются от 1,6 до 3,2, а величина приведенной температуры θ – в пределах от 0 до 0,2. Таким образом по данным Рекомендаций [1] возможно рассчитать глубину промерзания грунта в пределах приведенных значений A и θ . Это обстоятельство будет учтено в дальнейших расчетах.

T_m – минимальная среднемесячная температура воздуха за срок наблюдений 10 лет (принимается со знаком плюс) СНиП 23-01-99 [19].

β – поправочный коэффициент за влияние снежного покрова, определяемый по формуле:

$$\beta = \sqrt{1 + 2K_a S_c (1 + K_a S_c)}, \quad (7)$$

T_0 – среднегодовая температура грунта по среднегодовым значениям метеоданных, определяется по формуле:

$$T_0 = \frac{B}{12} \left(\Omega_{\text{л}} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{\text{th}}} \Omega_3 + 8,75 \times 10^{-4} \frac{S_c}{\lambda_{\text{th}}} \sqrt{Z_v \lambda_f |\Omega_3|} \right), \quad (8)$$

где B – коэффициент, учитывающий поверхностные условия. Для территорий застройки $B = 1$; для участков с естественным растительным покровом $B = 0,9$.

S_c – толщина слоя грунта в м, термическое сопротивление которого равно термическому сопротивлению снежного покрова:

$$S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c}, \quad (9)$$

h_c – средняя за зиму толщина снежного покрова в м;

λ_c – коэффициент теплопроводности снежного покрова согласно [15] принимается равным: при среднезимней толщине снежного покрова до 0,2 м – 0,25 Вт/мК; при среднезимней толщине снежного покрова до 0,4 м – 0,35 Вт/мК.

λ_f – коэффициент теплопроводности грунта в мерзлом состоянии, ккал/м×ч×град, определяется по [13];

Для данных условий S_c будет равна:

$$\text{при } h^1_c = 0,14 \text{ м, } S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,8 \frac{0,14}{0,25} = 1,0 \text{ м;}$$

$$\text{при } h^2_c = 1,12 \text{ м, } S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,8 \frac{1,12}{0,35} = 5,76 \text{ м;}$$

$$\text{при } h^3_c = 1,58 \text{ м, } S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,8 \frac{1,58}{0,35} = 8,12 \text{ м;}$$

$$\Omega_{\text{л}} = \sum T_{\text{вл}} + \frac{1}{\alpha_{\text{л}}} (\sum R_{\text{л}} - \sum E_{\text{л}}), \quad (10)$$

$$\Omega_{\text{з}} = \sum T_{\text{вз}} + \frac{1}{\alpha_{\text{з}}} (\sum R_{\text{з}} - \sum E_{\text{з}}), \quad (11)$$

$\sum T_{\text{вл}}$ и $\sum T_{\text{вз}}$ – суммы среднемесячных температур воздуха соответственно за летний и зимний периоды, °С;

$\sum R_{\text{л}}$ и $\sum R_{\text{з}}$ – суммы среднемесячных значений радиационного баланса соответственно за летний и зимний периоды, Вт/м²;

$\sum E_{\text{л}}$ и $\sum E_{\text{з}}$ – суммы среднемесячных значений затрат тепла на испарение соответственно за летний и зимний периоды, Вт/м²;

$\alpha_{\text{л}}$ и $\alpha_{\text{з}}$ – коэффициенты конвективного теплообмена для летнего и зимнего периодов, Вт/м²К, определяются по формуле:

$$\alpha = 10\sqrt{v_{\text{в}}}, \quad (12)$$

где $v_{\text{в}}$ – средняя скорость ветра, м/сек.

Для летнего периода со средней скоростью ветра, принятой по СНиП II-A. 6-72 «Строительная климатология и геофизика» [20, табл. 7], и равной 3,5 м/сек, $\alpha_{\text{л}}$ составит:

$$\alpha_{\text{л}} = 10\sqrt{v_{\text{в}}} = 10\sqrt{3,5} = 18,7;$$

для зимнего периода со средней скоростью ветра, равной 5,7 м/сек, $\alpha_{\text{з}}$ составит:

$$\alpha_{\text{з}} = 10\sqrt{v_{\text{в}}} = 10\sqrt{5,7} = 24.$$

Среднемесячные значения радиационного баланса и затрат тепла на испарение вычисляются по формулам:

$$R = (Q + q)_0 (1 - 0,6n)(1 - a) - J(1 - 0,7n^2), \quad (13)$$

$$E = u(e_0 - e)(1 + 0,8v_{\text{в}}), \quad (14)$$

где $(Q + q)_0$ – суммарная солнечная радиация на уровне моря, Вт/м², определялась по [15, табл. 7];

J – эффективное излучение при безоблачном небе, Вт/м², определяется по [15, табл. 5];

a – альбедо поверхности в долях единицы, определяется по [15, табл. 5];

n – наблюдаемая облачность в долях единицы, принимается по метеоданным для района застройки, в расчетах условно принята равной 0,5;

e_0 – максимальная упругость водяных паров, гПа, определяется по [15, табл. 6] в зависимости от средней температуры воздуха;

e – наблюдаемая абсолютная влажность воздуха, гПа, определяется по [20, табл. 4];

u – коэффициент интенсивности испарения, для территории застройки $u = 1$.

1.1.3. Результаты расчета

В соответствии с формулой (4) определяем значение параметра K_a по формуле (5):

$$K_a = \sqrt{\frac{6,7 \times 10^7 + 2100 \times 10^3 \times 13,9}{10^7 \times 1,8 \times 13,9}} = 0,62.$$

Для определения параметра A рассчитываем приведенную температуру θ по формуле (6). Для этого рассчитываем величины β по формуле (7) и T_0 по формуле (8).

При отсутствии снежного покрова – $\beta^0 = 1$.

Среднемесячные значения радиационного баланса и затрат тепла на испарение вычисляются по формулам (13) и (14) для каждого месяца года:

За январь:

$$\begin{aligned} R^I &= (Q + q)_0 (1 - 0,6n)(1 - a) - J(1 - 0,7n^2) = \\ &= 75 \times (1 - 0,6 \times 0,5)(1 - 0,5) - 70 \times (1 - 0,7 \times 0,5^2) = -32 \text{ Вт/м}^2, \\ E^I &= u(e_0 - e)(1 + 0,8v_b) = 1 \times (0,72 - 1)(1 + 0,8 \times 5,7) = -2 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

За февраль:

$$\begin{aligned} R^{II} &= 122 \times (1 - 0,6 \times 0,5) \times (1 - 0,5) - 77 \times (1 - 0,7 \times 0,5^2) = -21 \text{ Вт/м}^2, \\ E^{II} &= 1 \times (1 - 1,2) \times (1 + 0,8 \times 5,7) = -1 \text{ Вт/м}^2 \text{ и т. д.} \\ \Omega_{\text{л}} &= \sum T_{\text{вл}} + \frac{1}{\alpha_{\text{л}}} (\sum R_{\text{л}} - \sum E_{\text{л}}) = 60,9 + \frac{1}{18,7} \times (563 - 54) = 88, \\ \Omega_3 &= \sum T_{\text{вз}} + \frac{1}{\alpha_3} (\sum R_3 - \sum E_3) = -85,4 + \frac{1}{24} \times (-117 - 2) = -90. \end{aligned}$$

При отсутствии снежного покрова ($S_c^0 = 0$) T_0^0 составит:

$$T_0^0 = \frac{B}{12} \left(\Omega_{\text{л}} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{\text{th}}} \Omega_3 \right) = \frac{1}{12} \times \left(88 + \frac{1,8}{1,71} \times (-90) \right) = -0,6 \text{ } ^\circ\text{C};$$

при толщине снежного покрова $h_c^1 = 0,14 \text{ м}$ – $S_c^1 = 1,0 \text{ м}$

$$T_0^1 = \frac{B}{12} \left(\Omega_{\text{л}} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{\text{th}}} \Omega_3 + 8,75 \times 10^{-4} \frac{S_c^1}{\lambda_{\text{th}}} \sqrt{Z_v \lambda_f |\Omega_3|} \right) =$$

$$= \frac{1}{12} \times \left(88 + \frac{1,8}{1,71} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{1,0}{1,71} \times \sqrt{6,7 \times 10^7 \times 1,8 \times |-90|} \right) = 3,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

при $h_c^2 = 1,12 \text{ м}$ – $S_c^2 = 5,76 \text{ м}$

$$T_0^2 = \frac{1}{12} \times \left(88 + \frac{1,8}{1,71} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{5,76}{1,71} \times \sqrt{6,7 \times 10^7 \times 1,8 \times |-90|} \right) = 25 \text{ } ^\circ\text{C};$$

при $h_c^3 = 1,58 \text{ м} - S_c^2 = 8,12 \text{ м}$

$$T_0^3 = \frac{1}{12} \times \left(88 + \frac{1,8}{1,71} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{8,12}{1,71} \sqrt{6,7 \times 10^7 \times 1,8 \times |-90|} \right) = 36 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Определение поправочного коэффициента влияния снежного покрова – β

При отсутствии снежного покрова $\beta^0 = 1$.

При $h_c^1 = 0,14 \text{ м} - S_c^1 = 1,0 \text{ м}$

$$\beta^1 = \sqrt{1 + 2K_a S_c (1 + K_a S_c)} = \sqrt{1 + 2 \times 0,62 \times 1,0 \times (1 + 0,62 \times 1,0)} = 1,7.$$

При $h_c^2 = 1,12 \text{ м} - S_c^2 = 5,76 \text{ м}$

$$\beta^2 = \sqrt{1 + 2 \times 0,62 \times 5,76 \times (1 + 0,62 \times 5,76)} = 5,8.$$

При $h_c^3 = 1,58 \text{ м} - S_c^3 = 8,12 \text{ м}$

$$\beta^3 = \sqrt{1 + 2 \times 0,62 \times 8,12 \times (1 + 0,62 \times 8,12)} = 7,8.$$

Определение приведенной температуры θ

При отсутствии снежного покрова

$$\theta^0 = \frac{T_0}{T_0 + T_m} \beta = \frac{-0,6}{-0,6 + 23,6} \times 1,0 = -0,02.$$

При $h_c^1 = 0,14 \text{ м}$

$$\theta^1 = \frac{T_0^1}{T_0^1 + T_m} \beta^1 = \frac{3,9}{3,9 + 23,6} \times 1,7 = 0,2.$$

При $h_c^2 = 1,12 \text{ м}$

$$\theta^2 = \frac{T_0^2}{T_0^2 + T_m} \beta^2 = \frac{25}{25 + 23,6} \times 5,8 = 3,0.$$

При $h_c^3 = 1,58 \text{ м}$

$$\theta^3 = \frac{T_0^3}{T_0^3 + T_m} \beta^3 = \frac{35,6}{35,6 + 23,6} \times 7,8 = 4,7.$$

Определение коэффициента A по рис. 6 [15] в зависимости от приведенных температур θ при значении $\tau = 6 \text{ мес.}$

$$A^0 = 3,1; A^1 = 1,6;$$

A^2 и A^3 – значения выходят за область графика, определение параметра A согласно [15] невозможно.

Глубина сезонного промерзания грунта, H_m , составит:
при отсутствии снежного покрова

$$H_m^0 = \frac{A^0}{K_a} = \frac{3,1}{0,62} = 5,0 \text{ м},$$

при толщине снежного покрова $h_c^1 = 0,14$ м

$$H_m^1 = \frac{A^1}{K_a} = \frac{1,6}{0,62} = 2,6 \text{ м},$$

при толщине снежного покрова $h_c^2 = 1,12$ м и $h_c^3 = 1,58$ м по [15] глубину промерзания грунта определить невозможно.

1.2. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1185 и 1202+50

1.2.1. Исходные данные

На данном пикете ПК1185 и 1202+50 с поверхности и до глубины залегают суглинки мягкопластичные, имеющие следующие физические характеристики: $W = 0,274$; $W_l = 0,333$; $W_p = 0,212$; $I_p = 12,1$; $I_l = 0,51$; $\rho = 1,85 \text{ г/см}^3$; $\rho_d = 1,42 \text{ г/см}^3$; $\rho_s = 2,68 \text{ г/см}^3$; $e = 0,874$; $S_r = 0,91$.

Суммарная влажность суглинка составит $W_{tot} = W_p = 0,212$.

Тогда при $W_{tot} = 0,212$ и $\rho_d = 1,42 \text{ г/см}^3$ коэффициенты теплопроводности и объемной теплоемкости равны:

для мерзлого грунта: $\lambda_f = 1,30 \text{ Вт/м}^\circ\text{С} = 1,11 \text{ ккал/мч}^\circ\text{С}$; $C_f = 1930 \text{ кДж/м}^3^\circ\text{С} = 460 \text{ ккал/м}^3^\circ\text{С}$;

для талого грунта: $\lambda_{th} = 1,15 \text{ Вт/м}^\circ\text{С} = 1,00 \text{ ккал/мч}^\circ\text{С}$; $C_{th} = 2550 \text{ кДж/м}^3^\circ\text{С} = 607 \text{ ккал/м}^3^\circ\text{С}$.

Температуру грунта можно определить следующим образом:

$T = 0,4T_{сз} = 0,4 \times (-13,9) = -5,56^\circ\text{С}$, по [13] K_n для суглинков равен 0,44

$$W_w = K_n W_p = 0,44 \times 0,212 = 0,093.$$

Величина удельной теплоты замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта составит:

$$Z_v = Z_0(W_{tot} - W_w)\rho_d = 3,35 \times 10^4 \times (0,212 - 0,093) \times 14\,200 = 5,7 \times 10^7 \text{ Дж/м}^3.$$

Для данных условий S_c будет равно:

$$\text{при } h_c^1 = 0,14 \text{ м} - S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,3 \times \frac{0,14}{0,25} = 0,728 \text{ м};$$

$$\text{при } h_c^2 = 1,12 \text{ м} - S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,3 \times \frac{1,12}{0,35} = 4,16 \text{ м};$$

$$\text{при } h_c^3 = 1,58 \text{ м} - S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,3 \times \frac{1,58}{0,35} = 5,87 \text{ м}.$$

Среднемесячные значения радиационного баланса, затрат тепла на испарение и коэффициенты конвективного теплообмена зависят только от климатических условий площадки строительства и не зависят от свойств грунта, поэтому рассчитанные значения этих величин для пикетов ПК1181 и 1190 характерны и для ПК1185 и 1202+50.

Расчет температуры грунта на поверхности с учетом снежного покрова

Для условий застройки снежный покров не учитывается.

При отсутствии снежного покрова ($S_c^0 = 0$) T_0^0 составит:

$$T_0^0 = \frac{B}{12} \times \left(\Omega_{\pi} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{th}} \times \Omega_3 \right) = \frac{1}{12} \times \left(88 + \frac{1,3}{1,15} \times (-90) \right) = -1,14^\circ\text{С};$$

при толщине снежного покрова $h_c^1 = 0,14 \text{ м} - S_c^1 = 0,73 \text{ м}$

$$T_0^1 = \frac{B}{12} \times \left(\Omega_{\text{л}} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{th}} \Omega_3 + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{S_c^1}{\lambda_{th}} \times \sqrt{Z_v \lambda_f |\Omega_3|} \right) =$$

$$= \frac{1}{12} \times \left(88 + \frac{1,3}{1,15} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{0,73}{1,15} \times \sqrt{5,7 \times 10^7 \times 1,3 \times |-90|} \right) = 2,6 \text{ } ^\circ\text{C};$$

при толщине снежного покрова $h_c^2 = 1,12 \text{ м} - S_c^2 = 4,16 \text{ м}$

$$T_0^2 = \frac{1}{12} \times \left(88 + \frac{1,3}{1,15} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{4,16}{1,15} \times \sqrt{5,7 \times 10^7 \times 1,3 \times |-90|} \right) = 20,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

при толщине снежного покрова $h_c^3 = 1,58 \text{ м} - S_c^3 = 5,87 \text{ м}$

$$T_0^3 = \frac{1}{12} \times \left(88 + \frac{1,3}{1,15} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{5,87}{1,15} \times \sqrt{5,7 \times 10^7 \times 1,3 \times |-90|} \right) = 29,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Определяем параметр K_a по формуле (5):

$$K_a = \sqrt{\frac{5,7 \times 10^7 + 1930 \times 10^3 \times 13,9}{10^7 \times 1,3 \times 13,9}} = 0,68;$$

Определение поправочного коэффициента влияния снежного покрова – β

При отсутствии снежного покрова $\beta^0 = 1$.

При толщине снежного покрова $h_c^1 = 0,14 \text{ м} - S_c^1 = 0,73 \text{ м}$

$$\beta^1 = \sqrt{1 + 2K_a S_c (1 + K_a S_c)} = \sqrt{1 + 2 \times 0,68 \times 0,73 \times (1 + 0,68 \times 0,73)} = 1,6;$$

при толщине снежного покрова $h_c^2 = 1,12 \text{ м} - S_c^2 = 4,16 \text{ м}$

$$\beta^2 = \sqrt{1 + 2 \times 0,68 \times 4,16 \times (1 + 0,68 \times 4,16)} = 4,8;$$

при толщине снежного покрова $h_c^3 = 1,58 \text{ м} - S_c^3 = 5,87 \text{ м}$

$$\beta^3 = \sqrt{1 + 2 \times 0,68 \times 5,87 \times (1 + 0,68 \times 5,87)} = 6,4.$$

Определение приведенной температуры θ

При отсутствии снежного покрова

$$\theta^0 = \frac{T_0}{T_0 + T_m} \beta = \frac{-1,14}{-1,14 + 23,6} 1,0 = -0,1;$$

при толщине снежного покрова $h_c^1 = 0,14 \text{ м}$

$$\theta^1 = \frac{T_0^1}{T_0^1 + T_m} \beta^1 = \frac{2,6}{2,6 + 23,6} 1,6 = 0,2;$$

при толщине снежного покрова $h_c^2 = 1,12 \text{ м}$

$$\theta^2 = \frac{T_0^2}{T_0^2 + T_m} \beta^2 = \frac{20,4}{20,4 + 23,6} 4,8 = 2,1;$$

при толщине снежного покрова $h_c^3 = 1,58$ м

$$\theta^3 = \frac{T_0^3}{T_0^3 + T_m} \beta^3 = \frac{29,3}{29,3 + 23,6} 6,4 = 3,5.$$

Определение коэффициента А по рис. 6 [15] в зависимости от приведенных температур θ при значении $\tau = 6$ мес.

$$A^0 = 3,3; A^1 = 1,6;$$

A^2 и A^3 – значения выходят за область графика, определение параметра A согласно [15] невозможно.

Глубина сезонного промерзания грунта, H_m , составит:
 при отсутствии снежного покрова

$$H_m^0 = \frac{A^0}{K_a} = \frac{3,3}{0,68} = 4,8 \text{ м};$$

при толщине снежного покрова $h_c^1 = 0,14$ м

$$H_m^1 = \frac{A^1}{K_a} = \frac{1,6}{0,68} = 2,3 \text{ м};$$

при толщине снежного покрова $h_c^2 = 1,12$ м и $h_c^3 = 1,58$ м по [15] глубину промерзания грунта определить невозможно.

2. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов по «Справочнику по строительству на вечномерзлых грунтах» [16]

2.1. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1181 и 1190

Нормативная глубина сезонного промерзания грунта, d_{fn} , м, в соответствии с [16] определяется по формуле:

$$d_{fn} = \sqrt{\frac{2\lambda_f (T_{bf} - T_{f,m}) t_{f,m}}{q_2}} + S^2 - S, \quad (15)$$

где

$$q_2 = L_v - 0,5C_f(T_{f,m} - T_{bf}), \quad (16)$$

здесь L_v – теплота замерзания грунта, Дж/м³ (ккал/м³), определяемая по [13] при температуре грунта $T = 0,5(T_{f,m} - T_{bf})$, °С, см. формулу (1);

$T_{f,m}$, $t_{f,m}$ – соответственно средняя по многолетним данным температура воздуха за период отрицательных температур (равна –13,9 °С) и продолжительность этого периода (4392 ч), принимаемые по [19];

T_{bf} – температура начала замерзания грунта, °С, определяемая по [13], для супеси равна 0,1 °С;

S – толщина слоя грунта, термическое сопротивление которого равно термическому сопротивлению снега, определяется по формуле (9);

w_{tot} – суммарная влажность грунта, принимается равной естественной влажности грунта, равной 0,34;

λ_c – коэффициент теплопроводности снежного покрова, принимается равным 0,25 ккал/мч °С.

$$q_2 = z_0(w_{tot} - w_w)\rho_d - 0,5C_f(T_{f,m} - T_{bf}) = 80\,000 \times (0,34 - 0,065) \times 1,2 - 0,5 \times 500 \times (13,9 - 0,1) = 29\,850 \text{ ккал/м}^3.$$

Глубина сезонного промерзания грунта, d_{fn} , составит:
при отсутствии снежного покрова:

$$d_{fn}^0 = \sqrt{\frac{2\lambda_f(T_{bf} - T_{f,m})t_{f,m}}{q_2}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,54 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{29\,850}} = 2,5 \text{ м};$$

при толщине снежного покрова $h_c^1 = 0,14$ м

$$d_{fn}^1 = \sqrt{\frac{2\lambda_f(T_{bf} - T_{f,m})t_{f,m}}{q_2} + S^2} - S = \sqrt{\frac{2 \times 1,54 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{29\,850} + \left(1,54 \times \frac{0,14}{0,25}\right)^2} - 1,54 \times \frac{0,14}{0,25} = 1,78 \text{ м};$$

при $h_c^2 = 1,12$ м

$$d_{fn}^2 = \sqrt{\frac{2 \times 1,54 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{29\,850} + \left(1,54 \times \frac{1,12}{0,25}\right)^2} - 1,54 \times \frac{1,12}{0,25} = 0,44 \text{ м};$$

при $h_c^3 = 1,58$ м

$$d_{fn}^3 = \sqrt{\frac{2 \times 1,54 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{29\,850} + \left(1,54 \times \frac{1,58}{0,25}\right)^2} - 1,54 \times \frac{1,58}{0,25} = 0,32 \text{ м}.$$

2.2. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1185 и 1202+50

При значении q_2 , равном

$$q_2 = z_0(w_{tot} - w_w)\rho_d - 0,5C_f(T_{f,m} - T_{bf}) = 80\,000 \times (0,274 - 0,093) \times 1,42 - 0,5 \times 460 \times (13,9 - 0,1) = 23\,735,6 \text{ ккал/м}^3,$$

глубина сезонного промерзания грунта, d_{fn} , составит:
при отсутствии снежного покрова

$$d_{fn}^0 = \sqrt{\frac{2\lambda_f(T_{bf} - T_{f,m})t_{f,m}}{q_2}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,11 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{23\,735,6}} = 2,38 \text{ м};$$

при $h_c^1 = 0,14$ м

$$d_{fn}^1 = \sqrt{\frac{2\lambda_f (T_{bf} - T_{f,m}) t_{f,m}}{q_2} + S^2} - S = \sqrt{\frac{2 \times 1,11 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{23\,735,6} + \left(1,11 \times \frac{0,14}{0,25}\right)^2} - 1,11 \times \frac{0,14}{0,25} = 1,84 \text{ м};$$

при $h_c^2 = 1,12 \text{ м}$

$$d_{fn}^2 = \sqrt{\frac{2 \times 1,11 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{23\,735,6} + \left(1,11 \times \frac{1,12}{0,25}\right)^2} - 1,11 \times \frac{1,12}{0,25} = 0,72 \text{ м};$$

при $h_c^3 = 1,58 \text{ м}$

$$d_{fn}^3 = \sqrt{\frac{2 \times 1,11 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{23\,735,6} + \left(1,11 \times \frac{1,58}{0,25}\right)^2} - 1,11 \times \frac{1,58}{0,25} = 0,54 \text{ м}.$$

3. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов по «Рекомендациям по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов» [17]

3.1. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1181 и 1190

Значение нормативной глубины сезонного промерзания грунта определяем расчетным путем по [14]:

$$d_{fn} = d_0 \sqrt{M_t}, \tag{17}$$

где d_0 – величина, равная для супесей 0,28 м;

M_t – безразмерный коэффициент, численно равный сумме абсолютных значений среднемесячных отрицательных температур за зиму в данном районе, принимаемых по [19].

Данные о температуре воздуха приняты по близлежащему району – п. Кировское.

Среднемесячные отрицательные температуры воздуха (T_m , °C) в зимний период по многолетним данным представлены в табл. 1.

Расчетная среднемесячная температура воздуха при продолжительности зимнего периода $\tau = 183$ будет равна $T_0 \approx -13,9$ °C.

Таблица 1

Температуры приземного воздуха для п. Кировское

Table 1

Surface air temperatures for the Kirovskoye settlement

Температура приземного воздуха, °C												
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Средняя
-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3	-2,04

Нормативная глубина сезонного промерзания глинистого грунта по [14] равна:

$$d_{fn} = 0,28 \times \sqrt{(9,1 + 19,3 + 23,6 + 19,7 + 12 + 1,7)} = 2,6 \text{ м.}$$

Расчетная глубина сезонного промерзания грунта, d_f , м, равна:

$$d_f = k_h \times d_{fn}, \quad (18)$$

где k_h – коэффициент, учитывающий влияние теплового режима сооружения, принимаемый равным 1,0 по [14].

Определение глубины промерзания грунта под слоем снега

$$d_{fi} = \sqrt{d_f^2 + S_c^2} - S_c, \quad (19)$$

где S_c – толщина эквивалентного слоя грунта, находится по формуле:

$$S_c = \lambda_f \left(\frac{1}{\alpha_c} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right) \quad (20)$$

λ_f – теплопроводность мерзлого грунта, равна 1,80 Вт/м °С;

α_c – коэффициент теплоотдачи свободной поверхности, равен 23 Вт/м °С;

δ_c – толщина снега, м;

λ_c – теплопроводность снега, составляет 0,25 Вт/м °С.

Глубина сезонного промерзания грунта, d_{fn} , составит:

при толщине снежного покрова $h_c^1 = 0,14$ м

$$S_c^1 = \lambda_f \left(\frac{1}{\alpha_c} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right) = 1,8 \times \left(\frac{1}{23} + \frac{0,14}{0,25} \right) = 1,09 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^1 = \sqrt{d_f^2 + (S_c^1)^2} - S_c^1 = \sqrt{2,6^2 + 1,09^2} - 1,09 = 1,73 \text{ м;}$$

при $h_c^2 = 1,12$ м

$$S_c^2 = 1,8 \times \left(\frac{1}{23} + \frac{1,12}{0,25} \right) = 8,14 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^2 = \sqrt{2,6^2 + 8,14^2} - 8,14 = 0,41 \text{ м;}$$

при $h_c^3 = 1,58$ м

$$S_c^3 = 1,8 \times \left(\frac{1}{23} + \frac{1,58}{0,25} \right) = 11,45 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^3 = \sqrt{2,6^2 + 11,45^2} - 11,45 = 0,29 \text{ м.}$$

3.2. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1185 и 1202+50

Нормативная глубина сезонного промерзания глинистого грунта по [14] равна:

$$d_{fn} = 0,23 \times \sqrt{(9,1 + 19,3 + 23,6 + 19,7 + 12 + 1,7)} = 2,13 \text{ м.}$$

Глубина сезонного промерзания грунта, d_{fn} , составит:

при $h_c^1 = 0,14 \text{ м}$

$$S_c^1 = \lambda_f \left(\frac{1}{\alpha_c} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right) = 1,3 \times \left(\frac{1}{23} + \frac{0,14}{0,25} \right) = 0,78 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^1 = \sqrt{d_{fn}^2 + (S_c^1)^2} - S_c^1 = \sqrt{2,13^2 + 0,78^2} - 0,78 = 1,48 \text{ м;}$$

при $h_c^2 = 1,12 \text{ м}$

$$S_c^2 = 1,3 \times \left(\frac{1}{23} + \frac{1,12}{0,25} \right) = 5,88 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^2 = \sqrt{2,13^2 + 5,88^2} - 5,88 = 0,37 \text{ м;}$$

при $h_c^3 = 1,58 \text{ м}$

$$S_c^3 = 1,3 \times \left(\frac{1}{23} + \frac{1,58}{0,25} \right) = 8,27 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^3 = \sqrt{2,13^2 + 8,27^2} - 8,27 = 0,27 \text{ м.}$$

4. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов по «Рекомендациям по прогнозу теплового состояния мерзлых грунтов» [18]

4.1. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1181 и 1190

Нормативная глубина сезонного промерзания грунта, d_{fn} , м, определяется в соответствии с [18] по формуле:

$$d_{fn} = \sqrt{\frac{2 \times 720 \lambda_f \sum (-T_{f,m})}{q_2} + (\lambda_f R_c)^2} - \lambda_f R_c - \frac{\lambda_{th} |T_T| \sqrt{\tau_f}}{q_2 \sqrt{\pi \frac{\lambda_{th}}{C_{th}}}}, \quad (21)$$

где q_2 , T_{bf} , λ_f , λ_c – те же обозначения, что и в расчете 2;

$\sum (-T_{f,m})$ – сумма среднемесячных температур за период промерзания, принимается по [19] и составляет -85,4;

λ_{th} – коэффициент теплопроводности талого грунта, для супеси $\lambda_{th} = 1,71 \text{ Вт/мК} = 1,48 \text{ ккал/мч}^\circ\text{С}$;

C_{th} – объемная теплоемкость талого грунта, для супеси $C_{th} = 2945 \text{ кДж/м}^3\text{К} = 701 \text{ ккал/м}^3\text{С}$;

τ_f – продолжительность периода промерзания, для данных климатических условий принимается по [19] и составляет 4392 ч;

R_s – термическое сопротивление снега при промерзании, принимается по [18, рис. 8] в зависимости от толщины снежного покрова;

T_T – среднеинтегральное значение температуры в талой зоне при промерзании, определяется по [18] в зависимости от температуры грунта t_{rp} , определяемой по [18, рис. 2] в зависимости от термического сопротивления теплоизоляции и сумм температур за летний $\sum(+T_{th,m}) = 60,9$ и зимний $\sum(-T_{f,m}) = 85,4$ периода.

При толщине снежного покрова $h_c^1 = 0,14$ м и термическом сопротивлении теплоизоляции $R_s^1 = 0,4$ при $\lambda_{th} = \lambda_f$ температура грунта по [18, рис. 2] $t_{rp} = -2$ °С. Понижение среднегодовой температуры грунта для соотношения $\lambda_f/\lambda_{th} = 1,04$ в соответствии с [18, рис. 3] будет равно $-0,4$ °С. Таким образом, истинное значение среднегодовой температуры грунта будет равно: $t_{rp} = -2 + (-0,4) = -2,4$ °С. T_T по [18] равен $T_T^1 = 5,4$ °С.

При толщине снежного покрова $h_c^2 = 1,12$ м и термическом сопротивлении теплоизоляции $R_s^2 = 2,1$ при $\lambda_{th} = \lambda_f$ температура грунта по [18, рис. 2] $t_{rp} = -2,5$ °С. Понижение среднегодовой температуры грунта для соотношения $\lambda_f/\lambda_{th} = 1,04$ в соответствии с [18, рис. 3] будет равно $-0,4$ °С. Таким образом, истинное значение среднегодовой температуры грунта будет равно: $t_{rp} = -2,5 + (-0,4) = -2,9$ °С, $T_T^2 = 7$ °С.

При толщине снежного покрова $h_c^3 = 1,58$ м и термическом сопротивлении теплоизоляции $R_s^3 = 3,5$ при $\lambda_{th} = \lambda_f$ температура грунта по [18, рис. 2] $t_{rp} = 1$ °С. Понижение среднегодовой температуры грунта для соотношения $\lambda_f/\lambda_{th} = 1,04$ в соответствии с [18, рис. 3] будет равно $-0,4$ °С. Таким образом, истинное значение среднегодовой температуры грунта будет равно: $t_{rp} = 0,4 + (-0,4) = 0$ °С, $T_T^3 = 1$ °С.

Глубина сезонного промерзания грунта, d_{fn} , составит:
при отсутствии снежного покрова;

$$d_{fn} = \sqrt{\frac{2 \times 720 \lambda_f \sum(-T_{f,m})}{q_2}} - \frac{\lambda_{th} |T_T| \sqrt{\tau_f}}{q_2 \sqrt{\pi \frac{\lambda_{th}}{C_{th}}}} =$$

$$\sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,54 \times 85,4}{29850}} - \frac{1,48 \times 5 \times \sqrt{4392}}{29850 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,48}{701}}} = 2,32 \text{ м};$$

при $h_c^1 = 0,14$ м

$$d_{fn}^1 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \lambda_f \sum(-T_{f,m})}{q_2} + (\lambda_f R_c^1)^2} - \lambda_f R_c^1 - \frac{\lambda_{th} |T_T| \sqrt{\tau_f}}{q_2 \sqrt{\pi \frac{\lambda_{th}}{C_{th}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,3 \times 85,4}{29850} + (1,3 \times 0,4)^2} - 1,3 \times 0,4 - \frac{1,15 \times 5,4 \times \sqrt{4392}}{29850 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,15}{701}}} = 1,76 \text{ м};$$

при $h_c^2 = 1,12$ м

$$d_{fn}^2 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,54 \times 85,4}{29781} + (1,54 \times 2,1)^2 - 1,54 \times 2,1 - \frac{1,48 \times 7 \times \sqrt{4392}}{29781 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,48}{701}}}} = 0,58 \text{ м};$$

при $h_c^3 = 1,58$ м

$$d_{fn}^3 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,54 \times 85,4}{29850} + (1,54 \times 3,5)^2 - 1,54 \times 3,5 - \frac{1,48 \times 1 \times \sqrt{4392}}{29850 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,48}{701}}}} = 0,52 \text{ м}.$$

4.2. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1185 и 1202+50

Глубина сезонного промерзания грунта, d_{fn} , составит:
 при отсутствии снежного покрова

$$\begin{aligned} d_{fn} &= \sqrt{\frac{2 \times 720 \lambda_f \sum(-T_{f,m})}{q_2}} - \frac{\lambda_{th} |T_T| \sqrt{\tau_f}}{q_2 \sqrt{\pi \frac{\lambda_{th}}{C_{th}}}} = \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,11 \times 85,4}{23735,6}} - \frac{1,0 \times 5 \times \sqrt{4392}}{23735,6 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,0}{607}}} = 2,20 \text{ м}, \end{aligned}$$

при $h_c^1 = 0,14$ м

$$\begin{aligned} d_{fn}^1 &= \sqrt{\frac{2 \times 720 \lambda_f \sum(-T_{f,m})}{q_2}} - \frac{\lambda_{th} |T_T| \sqrt{\tau_f}}{q_2 \sqrt{\pi \frac{\lambda_{th}}{C_{th}}}} = \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,11 \times 85,4}{23735,6} + (1,11 \times 0,4)^2 - 1,11 \times 0,4 - \frac{1,0 \times 5,4 \times \sqrt{4392}}{23735,6 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,0}{607}}}} = 1,80 \text{ м}; \end{aligned}$$

при $h_c^2 = 1,12$ м

$$d_{fn}^2 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,11 \times 85,4}{23735,6} + (1,11 \times 2,1)^2 - 1,11 \times 2,1 - \frac{1,0 \times 7 \times \sqrt{4392}}{23735,6 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,0}{607}}}} = 0,70 \text{ м};$$

при $h_c^3 = 1,58$ м

$$d_{fn}^3 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,11 \times 85,4}{23735,6} + (1,11 \times 3,5)^2 - 1,11 \times 3,5 - \frac{1,0 \times 1 \times \sqrt{4392}}{23735,6 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,0}{607}}}} = 0,64 \text{ м}.$$

Результаты расчетов по четырем инженерным методикам сведены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальная глубина промерзания, определенная инженерными методами

Table 2

Maximum freezing depth determined by engineering methods

Тип грунта	Высота снежного покрова, м	Глубина промерзания, м			
		ИМ1	ИМ2	ИМ3	ИМ4
Супесь ПК1181 и 1190	0	5,0	2,50	2,60	2,32
	0,14	2,6	1,78	1,73	1,76
	1,12	–	0,44	0,41	0,58
	1,58	–	0,32	0,29	0,52
Суглинок ПК1185 и 1202+50	0	4,8	2,38	2,13	2,20
	0,14	2,3	1,84	1,48	1,80
	1,12	–	0,72	0,37	0,70
	1,58	–	0,54	0,27	0,64

5. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов в программных комплексах Борея 3D и Frost 3D

Теплотехнические расчеты выполнялись в программных комплексах Борея 3D и Frost 3D, предназначенных для расчета динамики изменений температурного поля грунтов оснований зданий и сооружений с учетом теплового влияния инженерных сооружений. Программные комплексы реализуют математический аппарат моделирования распространения температурных полей в среде с фазовыми переходами и соответствуют требованиям [13].

Процесс распространения тепла в грунте с фазовыми переходами в спектре отрицательных температур описывается дифференциальным уравнением, записанным в энтальпийной форме:

$$\frac{\delta H}{\delta \tau} = \operatorname{div}(\lambda \times \operatorname{grad} T) + f, \quad (22)$$

где $H = H(\tau, T)$ – энтальпия (теплосодержание), отнесенная к единице объема грунта;

τ – время;

$T = T(\tau)$ – температура грунта;

$\lambda = \lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности грунта;

$f = f(\tau)$ – мощность внутренних источников тепла.

Энтальпия является функцией температуры от времени и координат. С учетом теплоты фазовых переходов в грунте энтальпия описывается уравнением (2):

$$H(T_1) = \int_0^{T_1} [C(T) + Q \times \delta(T - T_{bf})] dT, \quad (23)$$

где $C = C(T)$ – теплоемкость грунта;

Q – теплота фазового перехода;

T_{bf} – температура фазового перехода;

$\delta(T - T_{bf})$ – дельта-функция.

В программах реализованы два конечно-разностных метода для решения исходного дифференциального уравнения:

- метод явной двухслойной разностной схемы;
- метод с динамическим разбиением области на подобласти с явной и неявной вычислительной схемой. В качестве неявной вычислительной схемы применен метод простой итерации. Для улучшения сходимости неявного метода применяется метод регуляризации и динамический подбор шага по времени.

Исходные данные для выполнения расчетов

В качестве исходных данных использовались следующие параметры:

- климатические условия для задания верхнего граничного условия (ГУ) модели (среднемесячная температура воздуха, скорость ветра, высота и теплопроводность снежного покрова);
- физические и теплофизические характеристики грунтов (влажность, плотность, температура фазового перехода, теплоемкость и теплопроводность в талом и мерзлом состояниях);
- начальное температурное распределение в грунтовом массиве.

На верхнем климатическом ГУ приняты значения среднемесячных температур приземного воздуха, соответствующие данным [19]. Среднемесячные значения температур воздуха приняты по ближайшей метеорологической станции, расположенной в п. Кировское, и приведены в табл. 1.

Среднемесячные значения скорости ветра и высоты снежного покрова приняты в соответствии с архивными данными и приведены в табл. 3.

Значения необходимых в качестве исходных данных физических и теплофизических свойств грунтов приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 3

Скорость ветра и высота снежного покрова

Table 3

Wind speed and snow cover height

Наименование параметра	Среднее значение по месяцам (годовое)												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Скорость ветра, м/с	2,9	2,8	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,4	2,9	3,4	3,3	3,2	2,8

Таблица 4

Физические и теплофизические свойства грунтов

Table 4

Physical and thermophysical properties of soils

Наименование грунта	$W_{tot}, \%$	$\rho_d, \text{г/см}^3$	$T_{br}, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{th}, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	$\lambda_r, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	$C_{th}, \text{МДж/(м}^3\text{}^\circ\text{C)}$	$C_r, \text{МДж/(м}^3\text{}^\circ\text{C)}$
Супесь	0,22	1,51	-1,16	1,31	1,47	2,78	2,10
Суглинок	0,28	1,37	-0,43	1,41	1,57	2,93	2,15

Таблица 5

Зависимость влажности за счет незамерзшей воды от температуры

Table 5

Dependence of moisture content due to unfrozen water on temperature

Влажности за счет незамерзшей воды, W_w , д. е.											
Температура	-0,1	-0,4	-0,6	-1,1	-2,1	-3,1	-4,1	-6,1	-8,1	-10,1	-15,1
Супесь	0,16	0,13	0,12	0,10	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06
Суглинок	0,17	0,15	0,14	0,13	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08

Создание модели и приведение ее в стационарный режим

В качестве расчетной области принят трехмерный грунтовой массив глубиной 50 м, с размерами в плане $1,0 \times 1,0$ м. Шаг сетки принят адаптивным от $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ м до $1,0 \times 1,0 \times 3,0$ м.

Прогнозные расчеты выполнялись на период 50 лет до 2071 года. Интервал выдачи результатов – 1 месяц. Изменяемым параметром в расчетах принята температура приземного воздуха, задаваемая в соответствии с трендом. Остальные параметры климатических условий, а также граничные условия приняты постоянными на весь период расчета.

В табл. 6 приведены ГУ модели.

Таблица 6

Граничные условия модели

Table 6

Boundary conditions of the model

Локация распространения ГУ	Характеристика ГУ	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
При отсутствии снега	Температура, °C	-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м²×K	18,4	17,9	18,7	18,2	17,6	16,0	15,3	16,3	18,1	20,2	19,9	19,4
При средней высоте снега 0,14 м	Температура, °C	-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м²×K	0,99	0,98	1,10	2,25	12,9	16,0	15,3	16,3	17,3	12,5	2,65	1,20
При средней высоте снега 0,23 м	Температура, °C	-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м²×K	0,62	0,61	0,69	1,45	10,8	16,0	15,3	16,3	18,1	9,89	1,70	0,75
При средней высоте снега 1,12 м	Температура, °C	-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м²×K	0,13	0,13	0,15	0,32	4,53	16,0	15,3	16,3	13,2	3,41	0,38	0,16
При средней высоте снега 1,58 м	Температура, °C	-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м²×K	0,09	0,09	0,10	0,23	3,47	16,0	15,3	16,3	11,8	2,54	0,27	0,11
Боковые и нижняя грани расчетной области	Тепловой поток, Вт/м²	0,0											

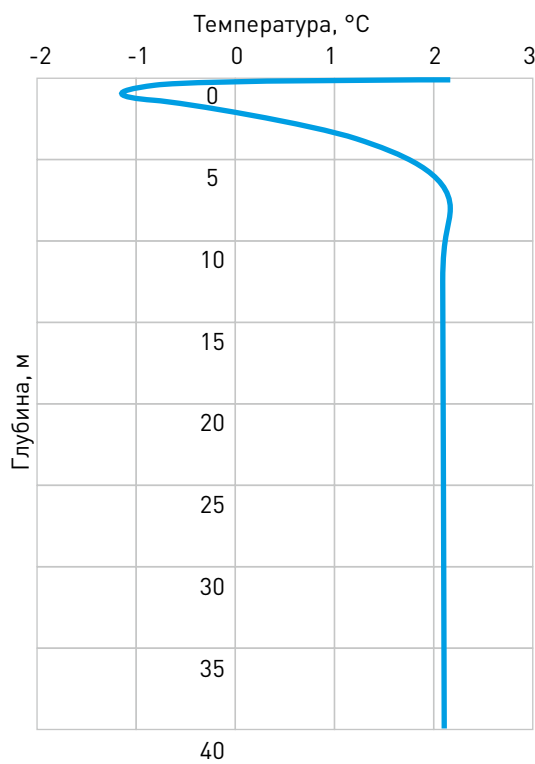


Рис. 1. График распределения температур по глубине для супеси
Fig. 1. Temperature distribution by depth for sandy loam

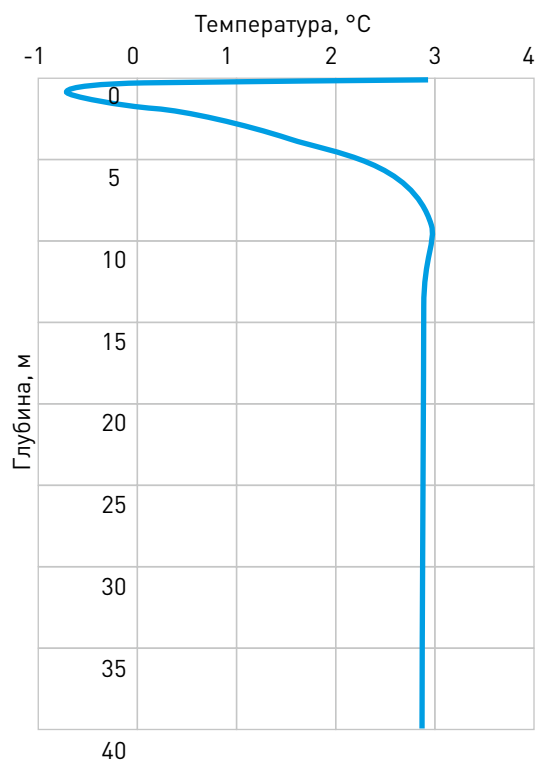


Рис. 2. График распределения температур по глубине для суглинка
Fig. 2. Temperature distribution by depth for loam

Перед началом теплотехнических расчетов модель приводилась в естественное температурное состояние, когда без влияния изменения высоты снежного покрова ГУ климата обеспечивают неизменяемость температурного состояния модели во времени.

По результатам приведения модели в стационарный режим по климатическим данным [19] и данным архивов получены начальные графики распределения температур по глубине на начало летнего периода для супеси и суглинка, которые приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

Результаты расчетов

Значения максимальной глубины промерзания при расчетах с различной высотой снежного покрова и в различных программных комплексах представлены в сводной табл. 7.

Анализ результатов проведенных расчетов показал отличие искомым величин, полученных по различным источникам друг от друга, кроме того, выявлены недостатки и трудности, с которыми может столкнуться проектировщик при расчете глубин промерзания грунтов. Расчет глубины промерзания грунта с учетом снежного покрова по «Рекомендациям по теплотехническим расчетам и прокладке трубопроводов в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов» [15] основан на методике, разработанной Г.В. Порхаевым. Расчет по этим рекомендациям с определением всех составляющих теплового баланса поверхности

Таблица 7

Максимальная глубина промерзания, определенная численными методами

Table 7

Maximum freezing depth determined by numerical methods

Тип грунта	Высота снежного покрова, м	Глубина промерзания, м	
		Борей 3D	Frost 3D
Супесь ПК1181 и 1190	0	3,29	3,41
	0,14	2,09	2,28
	0,23	1,56	1,54
	1,12	–	0,04
	1,58	–	–
Суглинок ПК1185 и 1202+50	0	3,30	3,31
	0,14	2,35	2,49
	0,23	1,91	1,88
	1,12	0,34	0,39
	1,58	–	0,06

грунта – метеорологических, радиационных, тепловых и физических свойств снега и грунта в талом и мерзлом состояниях – представляет значительные сложности и может быть выполнен лишь с той или иной степенью приближения, что осложняет применение рекомендаций на практике, особенно если учесть, что для достоверности получаемых результатов необходимо пользоваться средними многолетними данными. Кроме того, проведенные расчеты по этим рекомендациям (табл. 2, рис. 3, 4) показали, что полученная величина глубины промерзания несколько завышена и определить глубину промерзания грунта при толщине снежного покрова большего 0,15 м (для данных условий) не представляется возможным из-за невозможности определения параметра A по графику для больших слоев снега.

В основу расчетов глубины промерзания грунта в [16, 18] заложена формула Стефана. Различие в методиках заключается в том, что в [18] учитывается влияние талого грунта на глубины промерзания, несколько снижая ее, при этом существенно усложняется расчет, поэтому для упрощения расчетов и некоторого запаса предпочтительнее пользоваться расчетом по [16], кроме того, в [13] используется та же методика, но только без учета теплоизоляции (снежного покрова).

Расчет по методике, изложенной в [17], позволяет приближенно оценить глубину промерзания грунта под слоем снега и может использоваться для ориентировочных расчетов. В основе расчета лежит определение глубины промерзания грунта по [14].

Полученные величины глубин сезонного промерзания грунтов с учетом снежного покрова, рассчитанные по разным методикам, сведены в табл. 2 и представлены на рис. 3 и 4.

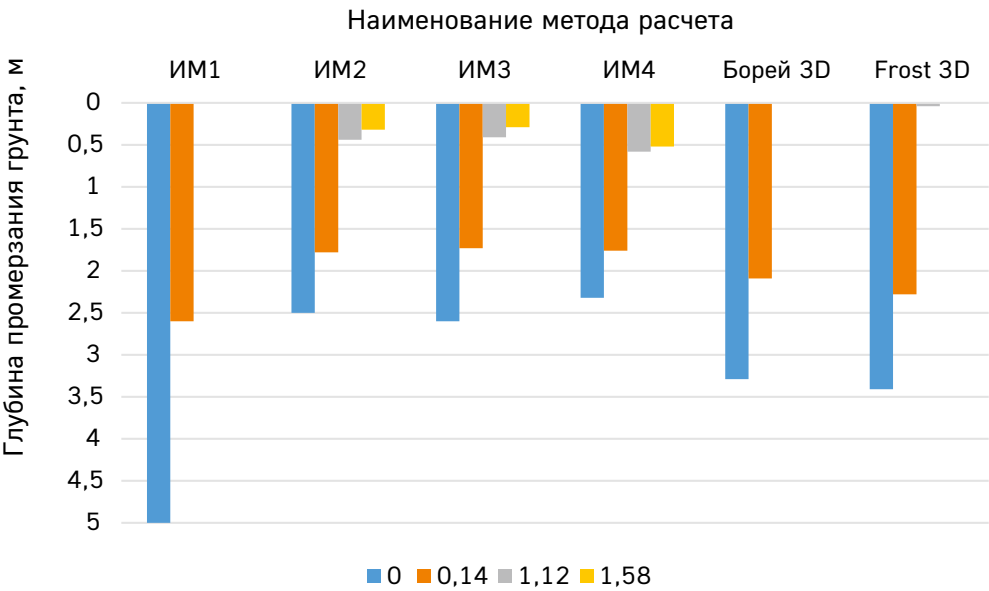


Рис. 3. Расчетные значения глубины промерзания для ПК1181 и 1190, определенные инженерными (ИМ1–ИМ4) и численными (Борея 3D и Frost 3D) методами

Fig. 3. Calculated values of freezing depth for PK 1181 and PK 1190 determined by engineering methods (EM1–EM4) and numerical methods (Borey 3D and Frost 3D)

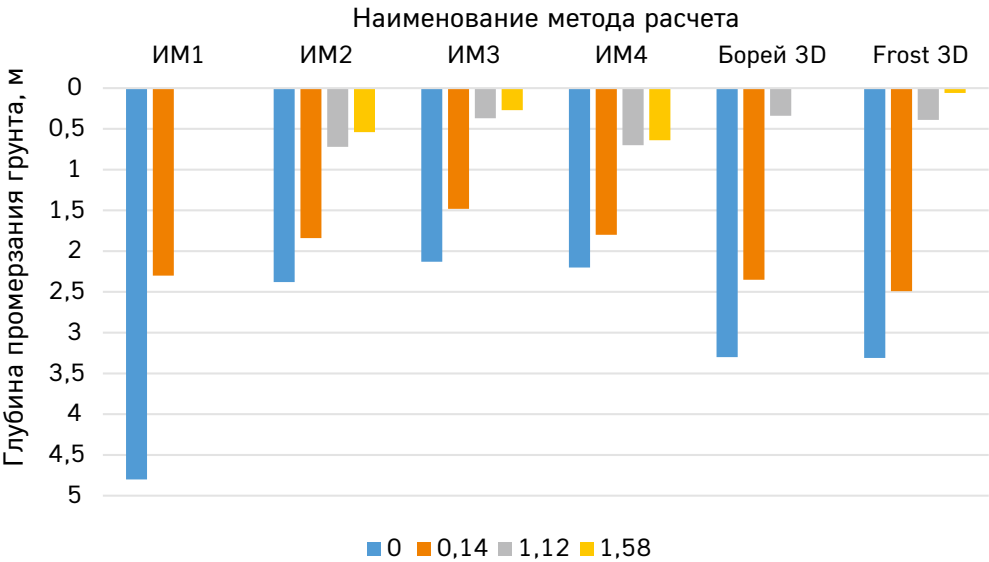


Рис. 4. Расчетные значения глубины промерзания песка, определенные инженерными (ИМ1–ИМ4) и численными (Борея 3D и Frost 3D) методами

Fig. 4. Calculated values of sand freezing depth determined by engineering methods (EM1–EM4) and numerical methods (Borey 3D and Frost 3D)

Численные расчеты имеют схожие между собой результаты. Наибольшее отличие (4 %) в величине глубины промерзания соответствует оголенной поверхности и заснеженной поверхности мощностью 0,14 м (6–9 %). При значительной высоте снежного покрова 1,12 и 1,58 м также отмечены отличия в величине расчетной глубины промерзания грунта. Программный комплекс Frost 3D определяет глубину промерзания супеси со снегом $h = 1,12$ м и суглинка с $h = 1,58$ м, программный комплекс Борея 3D не определяет промерзание грунта при данных условиях.

Инженерные методы ИМ2–ИМ4 дают схожие результаты для оголенной поверхности и снежного покрова высотой 0,14 м, отличаясь друг от друга на 20 %. Большие отличия (в 44 %) характерны для заснеженных площадок (1,12–1,58 м). При этом инженерные расчеты показывают существенно меньшие значения глубины промерзания по сравнению с численными расчетами (32–47 %).

Численные методы базируются на нормативных документах [13] или ИМ3 для данного исследования.

Численные расчеты определили существенно большую глубину промерзания грунта. С одной стороны, это реализует дополнительный запас, с другой – приводит к перерасходу материала (большая длина свай, наличие излишней противопучинистой обмазки и др.).

Для повышения эффективности определения глубины сезонного промерзания грунтов следует выполнить разработку нового метода и модификацию теплотехнических программных комплексов с выполнением полевых экспериментальных исследований.

Выводы

Выполнены сравнительные расчеты инженерными и численными методами по определению глубины сезонного промерзания грунта на примере двух площадок, расположенных в Сахалинской области.

Расчет глубины промерзания грунта с определением всех составляющих теплового баланса поверхности грунта – метеорологических, радиационных, тепловых и физических свойств снега и грунта в талом и мерзлом состояниях – представляет значительные сложности и может быть выполнен лишь с той или иной степенью приближения, что осложняет применение данной методологии на практике, особенно если учесть, что для достоверности получаемых результатов необходимо пользоваться средними многолетними данными.

Наиболее достоверные результаты расчетов, вошедшие в нормативные документы [13], получены по методикам, в которые заложена формула Стефана с учетом снежного покрова.

Численные расчеты для условий оголенной поверхности дают завышенные значения до 47 % по сравнению с инженерными нормативными расчетами.

Дальнейшее совершенствование как инженерных, так и численных методик расчета сезонной глубины промерзания грунта позволит обеспечить надежность фундаментов и сократить затраты на их устройство. Разработку следует вести с использованием результатов натурных замеров на нескольких типовых площадках.

Список литературы

1. Alekseev A., Gribovskii G., Vinogradova S. Analytical solution of the semi-infinite problem of soil freezing with numerical solutions in various simulation software. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;365:042059. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/365/4/042059>
2. Кудрявцев С.А. Геотехническое моделирование процесса промерзания и оттаивания сезонно промерзающих морозоопасных грунтов юга Дальнего Востока. В: Современные технологии – железнодорожному транспорту и промышленности. Труды 44-й Всерос. науч.-практ. конф. ученых транспортных вузов, инженерных работников и представителей Академии науки. Том 1. Хабаровск; 2006, с. 40–45.
3. Ким Х.Ч. Совершенствование методов расчета глубины сезонного промерзания пучинистых грунтов земляного полотна железнодорожного пути [диссертация]. Новосибирск; 2013.
4. Ермилов М.В., Болотина Ю.О., Якушев А.А. Факторы неравномерности сезонного промерзания грунтов. В: Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. материалов XIX Междунар. межвузовской науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 2016, с. 1033–1037.
5. Калашников А.В., Деменков О.В. Постановка задачи к расчету глубин сезонного промерзания-оттаивания обводненных грунтов. В: Проблемы освоения нефтегазовых месторождений приарктических территорий России. Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Вып. 3. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова; 2020, с. 32–37.
6. Ершов Э.Д., Нефедьева Ю.А., Мотенко Р.Г., Пармузин С.Ю. Прогноз изменения глубины сезонного оттаивания и промерзания грунтов под влиянием нефтяного загрязнения. Вестник Московского университета. Сер. 4: геология. 2007;(6):7–50.
7. Заболотник С.И., Заболотник П.С. Температура, сезонное протаивание и промерзание грунтов под зданиями якутской ТЭЦ и на прилегающей к ним территории. Наука и образование. 2009;(4):70–75.
8. Каркашадзе Г.Г., Бельченко Е.Л. Определение глубины сезонного промерзания грунтов при наличии многослойного утепления на поверхности. Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999;(1):24–26.
9. Li J. Macro-micro characteristics of geopolymer-stabilized saline soil in seasonal frozen soil region. Transoilcold 2023. Материалы 6-го Междунар. симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах. Москва: Дашков и К; 2023, с. 193.
10. Тукбаев Н.Э. Численное моделирование сезонного теплообмена в верхних слоях грунта без промерзания. В: Радиотехника, электротехника и энергетика: тезисы докладов 28-й Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Москва; 2022, с. 525.
11. Гудун М.А. Методика расчета сезонного промерзания деятельного слоя грунта. Динамика систем, механизмов и машин. 2014;(2):75–79.
12. Иванов К.С., Галлямов Д.Р., Дашинимаев З.Б. Исследование промерзания грунта с применением теплоизоляции из гранулированной пеностеклокерамики. Вестник Забайкальского государственного университета. 2019;25(7):34–44. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-7-34-44>
13. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах [интернет]. Москва; 2020. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117292/>
14. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* [интернет]. Москва; 2016. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14627/>
15. Рекомендации по теплотехническим расчетам и прокладке трубопроводов в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов. Москва: НИИОСП; 1975.
16. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах. Ленинград: Стройиздат; 1977.
17. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов. Москва: Стройиздат; 1986.
18. Рекомендации по прогнозу теплового состояния мерзлых грунтов. Москва: Стройиздат; 1989.
19. СНиП 23-01-99. Строительная климатология [интернет]. Москва; 2006. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294849/4294849698.pdf>
20. СНиП II-A. 6-72. Строительная климатология и геофизика [интернет]. Москва; 1973. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293828/4293828389.htm>

References

1. Alekseev A., Gribovskii G., Vinogradova S. Analytical solution of the semi-infinite problem of soil freezing with numerical solutions in various simulation software. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;365:042059. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/365/4/042059>
2. Kudryavtsev S.A. Geotechnical modeling of the process of freezing and thawing seasonally freezing frost-hazardous soils of the south of the Far East. In: Modern technologies for railway transport and industry. Proceedings of the 44th All-Russian Scientific and Practical Conference of scientists of transport universities, engineering workers and representatives of the Academy of Science. Vol. 1. Khabarovsk; 2006, pp. 40–45. (In Russian).
3. Kim H.H. Improvement of methods for calculating the depth of seasonal freezing of deep soils of the railway trackbed [dissertation]. Novosibirsk; 2013. (In Russian).
4. Ermilov M.V., Bolotina Yu.O., Yakushev A.A. Factors of uneven seasonal freezing of soils. In: Construction – formation of the environment of vital activity collection of materials of the XIX International interuniversity scientific and practical conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering (National Research University); 2016, pp. 1033–1037. (In Russian).
5. Kalashnikov A.V., Demenkov O.V. Formulation of the problem for calculating the depths of seasonal freezing-thawing of watered soils. In: Problems of development of oil and gas fields in the Arctic territories of Russia. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Iss. 3. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 2020, pp. 32–37. (In Russian).
6. Ershov E.D., Nefedieva Yu.A., Motenko R.G., Parmuzin S.Yu. Forecast of changes in the depth of seasonal thawing and freezing of soils under the influence of oil pollution. Moscow University Bulletin. Series 4. Geology. 2007;(6):7–50. (In Russian).
7. Zabolotnik S.I., Zabolotnik P.S. Temperature, seasonal thawing and freezing of soils under the buildings of the Yakut thermal power plant and in the adjacent territory. Science and Education. 2009;(4):70–75. (In Russian).
8. Karkashadze G.G., Belchenko E.L. Determination of the depth of seasonal soil freezing in the presence of multilayer insulation on the surface. Mining information and analytical bulletin. 1999;(1):24–26. (In Russian).
9. Li J. Macro-micro characteristics of geopolymer-stabilized saline soil in seasonal frozen soil region. In: Transsoilcold 2023. Proceedings of the 6th International Symposium on Construction Engineering of Ground Structures in Transport in Cold Regions. Moscow: Dashkov i K Publ.; 2023, p. 193. (In Russian).
10. Tukbaev N.E. Numerical modeling of seasonal heat transfer in the upper layers of soil without freezing. In: Radioelectronics, electrical engineering and power engineering abstracts of the Twenty-eighth international scientific and technical conference of students and postgraduates. Moscow; 2022, pp. 525. (In Russian).
11. Gudun M.A. Methodology for calculating seasonal freezing of the active soil layer. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2014;(2):75–79. (In Russian).
12. Ivanov K.S., Gallyamov D.R., Dashinimaev Z.B. Study of freezing ground with the application of heat insulation granular foamed glass ceramics. Transbaikal state university journal. 2019;25(7):34–44. (In Russian). <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-7-34-44>
13. SP 25.13330.2020. Soil bases and foundations on permafrost soils [internet]. Moscow; 2020. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117292/>. (In Russian).
14. SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures [internet]. Updated version of SNiP 2.02.01-83*. Moscow; 2016. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14627/>. (In Russian).
15. Recommendations on thermal engineering calculations and pipeline laying in areas with deep seasonal soil freezing. Moscow: NIIO SP; 1975. (In Russian).
16. Handbook on construction on permafrost soils. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1977. (In Russian).
17. Recommendations on accounting and prevention of deformations and forces of frost heaving of soils. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1986. (In Russian).
18. Recommendations for the forecast of the thermal state of frozen soils. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1989. (In Russian).
19. SNiP 23-01-99. Building climatology [internet]. Moscow; 2006. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294849/4294849698.pdf> (In Russian).
20. SNiP II-A. 6-72. Building climatology and geophysics [internet]. Moscow; 1973. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293828/4293828389.htm> (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Андрей Григорьевич Алексеев, д-р техн. наук, руководитель центра геокриологических и геотехнических условий, НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры механики грунтов и геотехники, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru

Andrei G. Alekseev, Dr. Sci. (Engineering), Head of the Center for Geocryological and Geotechnical Research, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Department of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru