



Температурный расчет грунтового основания в геотехнических программных комплексах

Д. С. Скворцов¹✉, А. И. Синицкий², Е. А. Жайсамбаев¹

¹ Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000, Российская Федерация

² Научный центр изучения Арктики, ул. Республики, 20, Салехард, 629008, Российская Федерация

✉ tmn.skvorcov@mail.ru



Аннотация. Важным этапом решения проблемы строительства мелкозаглубленных фундаментов на сезоннопромерзающих пучинистых грунтах является выполнение температурных расчетов грунтового основания. Для проведения температурных расчетов грунтов могут быть использованы программные комплексы Frost 3D и QFrost. В настоящем исследовании произведено сравнение результатов расчета величин промерзания грунтового основания опытной натурной площадки в программных комплексах Frost 3D и QFrost с данными геотехнического мониторинга. Натурная площадка расположена в г. Тюмени в районе пос. Березняки. Установлено, что использование программных комплексов Frost 3D и QFrost при моделировании грунтового основания позволяет определять величину промерзания с погрешностью до 3.5 %, что говорит о достоверности результатов и возможности использования данных программных комплексов для выполнения температурных расчетов.

Ключевые слова: сезоннопромерзающий грунт, температурный расчет, программный комплекс, основание зданий и сооружений, геокриология, фазовое состояние грунта, Frost 3D, QFrost

Благодарности. Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания в сфере науки на выполнение научных проектов, реализуемых коллективами образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России, по проекту «Компьютерное моделирование механических, температурных и динамических процессов в слабых и многолетнемерзлых грунтах для обеспечения надежности грунтовых оснований инженерных сооружений» (№ FEWN-2024-0006).

Для цитирования: Скворцов Д. С., Синицкий А. И., Жайсамбаев Е. А. Температурный расчет грунтового основания в геотехнических программных комплексах. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(3):54–63. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-3-54-63>

Temperature calculation of soil foundation in geotechnical software packages

Dmitry S. Skvortsov¹✉, Anton I. Sinitsky², Erkn A. Zhajsambaev¹

¹ Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation

² Scientific Center for Arctic Studies, 20 Respubliki St., Salekhard, 629008, Russian Federation

✉ tmn.skvorcov@mail.ru

Abstract. A crucial step in addressing the challenge of constructing shallow foundations on seasonally freezing soils is performing temperature calculations of the soil foundation. The software packages Frost 3D and QFrost can be used for conducting these temperature calculations. This research compared the results of calculating frost penetration depths of a test site's soil foundation using Frost 3D and QFrost with data from geotechnical monitoring. The test site was located in Tyumen, in the vicinity of the Bereznyaki settlement. The study found that using Frost 3D and QFrost software packages for modeling the soil foundation allows for determining frost penetration depths with an error of up to 3.5 %, indicating the reliability of the results and the possibility of using these software packages for performing temperature calculations.

Keywords: seasonally freezing soil, temperature calculation, software package, building foundation, geocryology, soil phase state, Frost 3D, QFrost

Acknowledgements. The work was prepared as part of the state assignment for the implementation of scientific projects by teams of higher education institutions under the Ministry of Science and Higher Education of Russia; project No. FEWN-2024-0006 "Computer modeling of mechanical, temperature and dynamic processes in weak and permafrost soils to ensure the reliability of ground foundations for engineering structures".

For citation: Skvortsov D. S., Sinitsky A. I., Zhajsambaev E. A. Temperature calculation of soil foundation in geotechnical software packages. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(3):54–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-3-54-63>

1. Введение

Как показывает практика строительства, расположение фундаментов мелкого заложения ниже глубины промерзания и даже устройство фундаментов глубокого заложения (свайных) на пучинистых грунтах не всегда целесообразно [1, 2]. Изучение использования сезоннопромерзающего слоя грунта в качестве естественного основания под фундаменты мелкого заложения, а также разработка мероприятий, направленных на снижение сил и деформаций морозного пучения, являются актуальными задачами. Авторами предложено конструктивное решение в виде армированной по контуру теплоизоляционной подушки для малоэтажных зданий и вспомогательных хозяйственно-бытовых сооружений на ленточных фундаментах с предполагаемой нагрузкой от фундамента, которая чаще всего не превышает 80–160 кН на 1 погонный метр для малозаглубленных фундаментов [3]. Для исследования работы данного конструктивного решения (рис. 1) был проведен натурный эксперимент на площадке, расположенной в г. Тюмени в районе пос. Березняки.

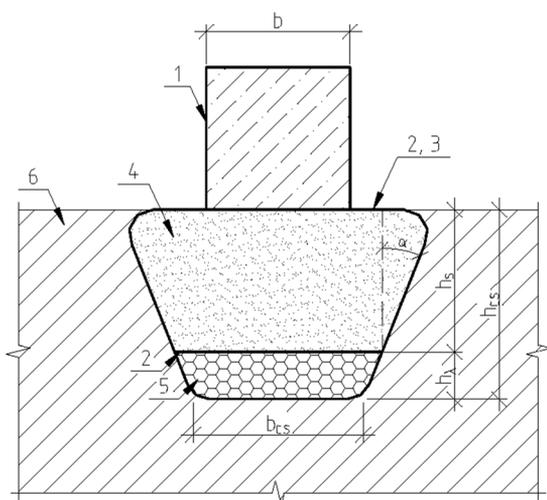


Рис. 1. Схема предложенного конструктивного решения: 1 – ленточный фундамент, 2 – тканый геосинтетик Геоспант ТН 50, 3 – водонепроницаемая пленка, 4 – песок, 5 – гранулированный сыпучий теплоизоляционный материал, 6 – грунтовое основание

Fig. 1. Scheme of the proposed construction solution: 1 – strip foundation, 2 – geotextile fabric Geospant TN 50, 3 – waterproof membrane, 4 – sand, 5 – granular, loose thermal insulation material, 6 – soil subgrade

В отличие от мерзлых грунтов, армированию талых грунтов для улучшения эксплуатационных характеристик посвящено немало исследований. Эффективность их армирования подтверждена на примере песчаных армированных массивов [4], песчаных армированных цилиндров [5] и свай [6], при армировании песчаных подушек в талых грунтах [7–9], при армировании грунтов вертикальными и горизонтальными элементами [10, 11], при устройстве различных армированных грунтовых сооружений [12].

Неотъемлемой частью решения задачи изучения сезоннопромерзающего слоя грунта в качестве естественного основания под фундаменты мелкого заложения является выполнение температурных расчетов. Данные расчеты необходимы для определения величины промерзания грунтового основания и последующего подбора параметров конструктивного решения – толщины и ширины подушки, величины заполнения подушки утеплителем. Расчеты проводятся в программных комплексах.

Для выполнения достоверного моделирования температурного режима грунтового основания с конструктивным решением требовалось предварительно произвести верификацию расчетной модели, а именно произвести моделирование грунтового основания без конструктивного решения (естественные грунтовые условия), и сравнить полученные данные расчетов температуры с фактическими данными мониторинга температуры грунтов площадки. В статье представлен температурный расчет естественного грунтового основания площадки, на которой проводился натурный эксперимент, полученные результаты сравнивались с фактическими данными мониторинга температуры грунтового основания площадки.

2. Материалы и методы

Объектом исследования являлось грунтовое основание площадки, представленное в виде сезоннопромерзающего пучинистого глинистого грунта без конструктивного решения. Предметом исследования являлся температурный режим рассматриваемого грунтового основания без конструктивного решения.

Цель работы заключалась в верификации расчетной температурной модели грунтового основания без конструктивного решения, реализованной в программных комплексах Frost 3D, QFrost, с данными мониторинга температуры грунтового основания в зимний период времени.

Температурные расчеты грунтового основания сводятся к решению задачи Стефана, связанной с кондуктивным теплообменом с наличием фазовых переходов [13–16]. Для решения задачи Стефана давно используется и хорошо себя зарекомендовала двухслойная явная схема с применением метода балансов и с энтальпийной формулировкой задачи. Алгоритм расчета по такому методу впервые был предложен Л. Н. Хрустальевым и реализован сотрудниками кафедры геокриологии геологического факультета МГУ в пакете программ «Тепло» более 20 лет назад. На текущий момент температурные расчеты грунтов можно проводить в таких современных программных комплексах, как Frost 3D, QFrost, Termoground (модуль FemModels), Борея 3D, Midas FEA NX и др. Использование перечисленных программных комплексов отражено в многочисленных работах по моделированию грунтовых оснований [17–20].

Порядок работы в программах заключается в задании расчетной области, грунтового массива и строительных конструкций, разбиении модели на конечные элементы, задании начальных и граничных условий, задании характеристик грунтов и материалов, проведении расчета во времени и анализе получаемых данных в виде распределения полей температур.

Программный комплекс Frost 3D позволяет производить моделирование теплового режима грунтового массива совместно со строительными конструкциями и сооружениями (трубопроводов с учетом переноса тепла, добывающих скважин, гидротехнических сооружений), а также производить расчет термостабилизирующих устройств. Программный комплекс Frost 3D сертифицирован в Российской Федерации и соответствует стандартам. Общий вид расчетной схемы температурного расчета представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид расчетной схемы температурного расчета в программе Frost 3D
Fig. 2. General view of the temperature calculation scheme in Frost 3D software

Программа позволяет выполнять расчеты в 2D и 3D с учетом неровности рельефа местности путем подгрузки геометрии пространства из геодезических программных комплексов, расчет фильтрации грунтовых вод, строить графики зависимостей изменения температуры и содержания незамерзшей влаги во времени, получать результаты расчетов в виде динамических изображений и графиков. Программа адаптирована для расчетов на высокопроизводительных компьютерах с использованием многоядерных конфигураций центрального процессора, позволяющихкратно увеличивать производительность расчетов в многопоточном режиме. Использование высокопроизводительных компьютеров позволяет решать пространственные задачи (до нескольких квадратных километров). Процесс задания расчетной схемы в программе сопряжен с большими трудозатратами по времени.

Данная программа активно используется проектными организациями, особенно в нефтегазовой отрасли, так как значительная часть месторождений находится в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Перечисленные преимущества позволили решить полный комплекс инженерно-строительных задач для различных геологических условий площадки.

В программном комплексе QFrost моделирование производится в 2D-постановке с использованием двухслойной явной разностной схемы с применением метода балансов и с энтальпийной формулировкой задачи. QFrost является свободным программным обеспечением и распространяется на условиях лицензии GNU GPL (стандартная общественная лицензия). Общий вид расчетной схемы температурного расчета представлен на рис. 3.

По сравнению с Frost 3D, процесс задания расчетной схемы в программном комплексе QFrost проще и занимает меньше времени. В результате расчетов программа выдает распределение температур в массиве расчетной области и количество незамерзшей воды. В программе возможен расчет массивов модели с дискретностью 1 см по геометрии. Для расчета достаточно ввода основных теплофизических характеристик (теплопроводности λ , теплоемкости C для талого и мерзлого состояния, температуры начала замерзания T_{br} , теплоты фазового перехода Q_{ϕ}), что позволяет производить расчеты при наличии результатов стандартных инженерно-геологических изысканий. Отличительной особенностью программы является возможность задания кривой замерзания воды в грунте при

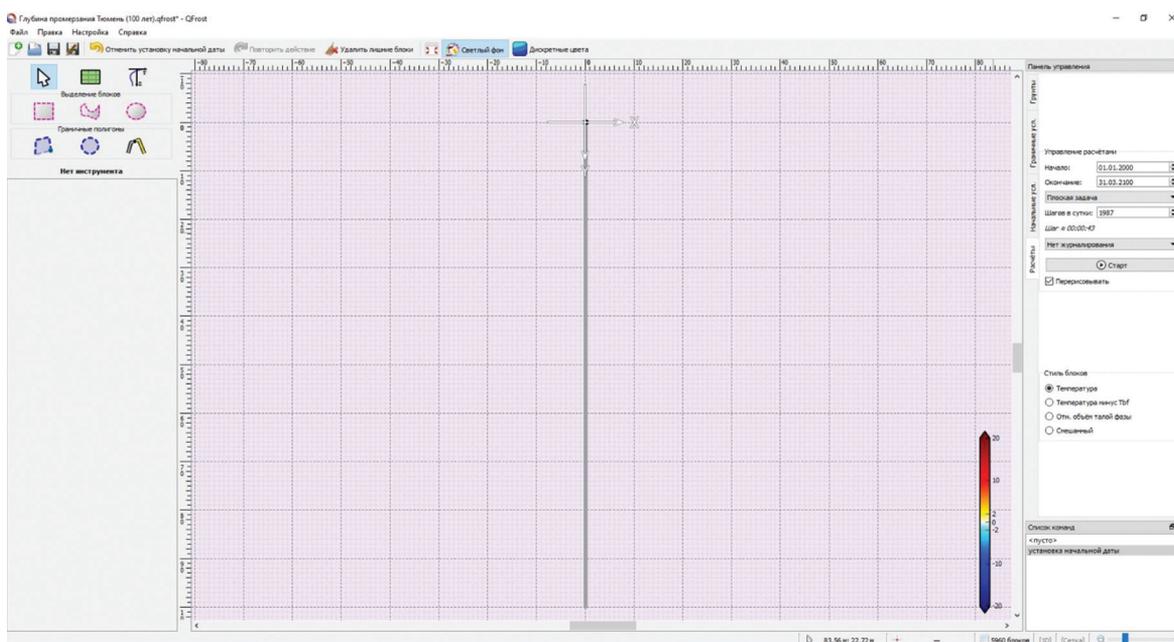


Рис. 3. Общий вид расчетной схемы температурного расчета в программе QFrost
Fig. 3. General view of the temperature calculation scheme in QFrost software

различных температурах. Программа не адаптирована под высокопроизводительные компьютеры, использующие многоядерные конфигурации центрального процессора. Расчеты выполняются в один поток, скорость выполнения расчетов напрямую зависит от производительности используемой архитектуры центрального процессора и его частоты.

По причине ограниченного функционала (отсутствует возможность создания моделей в 3D и, как следствие, невозможно произвести расчет линейных объектов с разными инженерно-геологическими и граничными условиями на различных участках объекта по длине, а также отсутствует возможность моделирования термостабилизаторов) данная программа не нашла широкого применения в проектных институтах, однако используется для проведения расчетов без учета фильтрации влаги в грунте, а также научных расчетов.

3. Результаты и обсуждение

Температурный расчет грунтового основания

Площадка, где проводился натурный эксперимент, располагается в г. Тюмени в районе пос. Березняки. Физико-механические характеристики ИГЭ (инженерно-геологических элементов), определенные по результатам инженерно-геологических изысканий, представлены в таблице 1.

Грунтовое основание в программных комплексах моделировалось в виде 2D-стержня с размерами $b \times h = 0.2 \times 100.0$ м, состоящего из элементов кубов с размером грани 0.01 м при начальной температуре +10 °С. Расчет величины промерзания грунтового основания производился на 100 лет. По верхней грани задавалось граничное условие I рода, по боковым и нижней граням граничные условия «без теплоточка». Граничное условие I рода моделирует среднемесячную температуру по поверхности грунта с учетом солнечной радиации и инфильтрации осадков [21], используемые в расчете среднемесячные значения температур представлены в таблице 2. Теплофизические характеристики грунтового основания представлены в таблице 3, данные для задания кривой незамерзшей воды – в таблице 4.

Таблица 1 / Table 1

Физико-механические характеристики ИГЭ-1, ИГЭ-2
 Physical and mechanical properties of engineering geotechnical unit 1 and engineering geotechnical unit 2

Показатель	Значения	
	ИГЭ-1	ИГЭ-2
Глубина заложения, м	0.0–1.5	1.5–2.5
Плотность грунта ρ , г/см ³	1.96	1.87
Плотность сухого грунта $\rho_{d'}$, г/см ³	1.61	1.37
Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	2.73	2.71
Коэффициент пористости e , д. ед.	0.69	0.98
Число пластичности I_p , д. ед.	14.62	14.87
Показатель текучести I_L , д. ед.	0.16	0.56
Влажность грунта w , %	21.6	36.4
Влажность на границе пластичности $w_{p'}$, %	19.2	28.2
Влажность на границе текучести w_L , %	33.9	43.0
Степень водонасыщения S_r , д. ед.	0.85	1.01
Степень морозной пучинистости $\varepsilon_{f'n}$, %	3.4	4.6
Модуль деформации E , МПа	7.0	4.9
Удельное сцепление, кПа	240	80
Угол внутреннего трения, град.	39	54

Таблица 2 / Table 2

Граничное условие I рода по поверхности грунта
 Boundary condition of the first kind at the soil surface

Месяц	Температура, °С	Месяц	Температура, °С	Месяц	Температура, °С
Январь	-13.00	Май	+16.50	Сентябрь	+16.44
Февраль	-10.91	Июнь	+25.81	Октябрь	+5.99
Март	-2.53	Июль	+30.03	Ноябрь	-3.48
Апрель	+8.13	Август	+24.11	Декабрь	-9.07

Таблица 3 / Table 3

Теплофизические характеристики грунта моделируемого основания
 Thermal properties of the simulated foundation soil

Вид грунта	Теплопроводность мерзлого грунта λ_r , Вт/(м·°С)	Теплопроводность талого грунта λ_{th} , Вт/(м·°С)	Теплоемкость мерзлого грунта C_r , кДж/(м ³ ·°С)	Теплоемкость талого грунта C_{th} , кДж/(м ³ ·°С)	Объемная теплота таяния L_v , МДж/м ³
ИГЭ-1	1.593	1.358	2770.862	2912.320	—*
ИГЭ-2	1.791	1.549	2911.320	3274.040	—*

* Примечание: задавались данные функции количества незамерзшей воды

Таблица 4 / Table 4

Данные для задания кривой незамерзшей воды
 Data for defining the unfrozen water curve

ИГЭ-1	Температура грунта T , °С	-0.3	-0.5	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-6.0	-8.0	-10.0	-15.0
	Влажность грунта за счет незамерзшей воды w_w , %	19.7	18.5	16.1	13.7	12.7	12.1	11.5	11.3	11.1	10.7
ИГЭ-2	Температура грунта T , °С	-0.3	-0.5	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-6.0	-8.0	-10.0	-15.0
	Влажность грунта за счет незамерзшей воды w_w , %	19.1	17.9	15.6	13.3	12.3	11.7	11.1	10.9	10.7	10.3

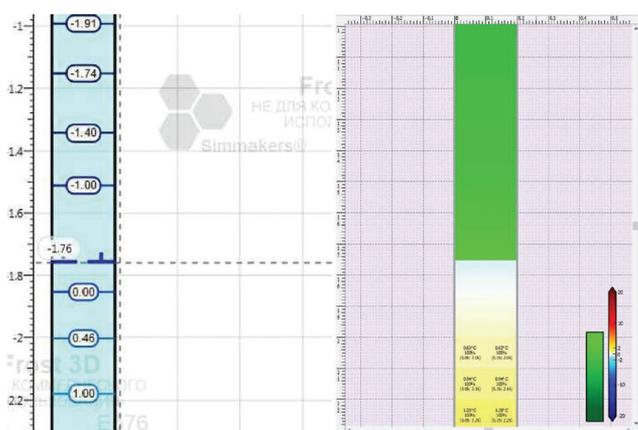


Рис. 4. Результаты расчета глубины промерзания грунтового основания в Frost 3D (слева) и QFrost (справа)

Fig. 4. Frost penetration depth calculation results in Frost 3D (left) and QFrost (right)

Результаты расчета промерзания грунтового основания в программных комплексах QFrost и Frost 3D представлены на рис. 4.

В результате расчетов глубина промерзания грунтового основания составила 1.76 и 1.75 м соответственно для программных комплексов Frost 3D и QFrost. Полученная разница глубины промерзания обусловлена погрешностью выполняемых расчетов. По данным мониторинга температур грунтового основания, величина промерзания в период зимы 2023–2024 г. составила 1.7 м, разница полученных расчетных значений по сравнению с данными геотехнического мониторинга составила 3.5 %, что позволяет говорить о достоверности моделирования рассмотренного грунтового основания в программных комплексах Frost 3D и QFrost.

4. Заключение

1. Использование программных комплексов Frost 3D и QFrost при моделировании грунтового основания позволяет определять величину промерзания с одинаковой погрешностью до 3.5 %, что говорит о достоверности получаемых при моделировании грунтового основания результатов.

2. Температурные расчеты грунтовых оснований в 2D-постановке рациональнее проводить в программном комплексе QFrost, для выполнения расчетов в котором требуется меньший по сравнению с Frost 3D объем данных.

3. Выполнение температурных расчетов грунтовых оснований в 3D-постановке в программном комплексе QFrost не реализовано. Для их выполнения необходимо использовать программный комплекс Frost 3D, позволяющий моделировать грунтовые основания любой сложности в 2D- и 3D-постановке, несмотря на большой объем данных, требуемых для выполнения расчетов.

4. Выбор программного комплекса для выполнения моделирования грунтовых оснований должен основываться на параметрах объекта моделирования (геометрии области моделирования, конструкции объекта моделирования, количестве объектов моделирования и др.). При возможности достоверного моделирования грунтового основания в 2D-постановке рациональнее использовать программный комплекс QFrost. При отсутствии возможности достоверного моделирования в 2D-постановке, например, при моделировании термостабилизации грунтов, требуется использовать программные комплексы с возможностью выполнения расчета в 3D-постановке, одним из которых является Frost 3D.



Вклад авторов. Скворцов Д. С., Синицкий А. И., Жайсамбаев Е. А. – разработка концепции исследования, Скворцов Д. С. – проведение численного моделирования, анализ и обобщение результатов, работа с текстом рукописи.

Author contributions. Dmitry S. Skvortsov, Anton I. Sinitsky, and Erkn A. Zhajsambaev developed the research concept; Dmitry S. Skvortsov conducted numerical modeling, analyzed and summarized the results, and worked on the manuscript.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Список литературы

1. Марахтанов В. П. Криогенные деформации свайного основания трубопроводов. *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. 2013;(5):18–22. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23502631>.
2. Пазиняк В. В., Кутвицкая Н. Б., Минкин М. А. Экспериментальные исследования устойчивости трубопроводов на крупномасштабной грунтовой модели. *Криосфера земли*. 2006;X(1):51–55. Режим доступа: https://earthcryosphere.ru/archive/2006_1/07.Pazinyak_1_2006.pdf.
3. *Рекомендации по проектированию и расчету малозаглубленных фундаментов на пучинистых грунтах* [Ордена Трудового Красного знамени НИИОСП им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР]. Москва: Ордена Трудового Красного знамени НИИОСП им. Н. М. Герсеванова Госстроя СССР; 1985. 61 с. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200074992>.
4. Бай В. Ф., Мальцева Т. В., Набоков А. В., Воронцов В. В., Минаева А. В. Теоретические предпосылки расчета песчаных армированных массивов в слабых глинистых грунтах. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2011;(1):102–106. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16452831>.
5. Мальцев Л. Е., Мальцева Т. В., Минаева А. В., Набоков А. В. Определение перемещений армирующего элемента песчаного цилиндра. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012;(2):234–238. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17779954>.
6. Мальцева Т. В., Набоков А. В., Черных А. В. Применение песчаных армированных свай при строительстве малоэтажных зданий. *Вестник Тюменского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015;(2):34–39. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24389410>.
7. Бай В. Ф., Краев А. Н. Исследование работы песчаной армированной подушки с криволинейной подошвой в условиях слабых грунтов. *Вестник гражданских инженеров*. 2014;(3):107–110. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21813073>.
8. Тажигулов А. А. *Песчаные подушки с геотекстилем на слабых водонасыщенных глинистых грунтах: автореф. дис. канд. техн. наук*. Москва: Московский государственный строительный университет; 1993. 20 с.
9. Татьянникова Д. А., Пономарев А. Б. Модельные штамповые испытания по исследованию работы армированных фундаментных подушек под нагрузкой. В сб.: *Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; 2017. С. 219–223.
10. Мирсяяпов И. Т., Шарафутдинов Р. А. Несущая способность и осадки грунтового основания армированного вертикальными и горизонтальными элементами. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016;(2):111–116. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26455345_84235665.pdf.
11. Гришина А. С. Мащенко А. В., Пономарев А. Б. Результаты исследований прочностных характеристик глинистых грунтов, армированных различными геосинтетическими материалами. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2015;(4):9–21. Режим доступа: https://vestnik.pstu.ru/urbanistic/archives/?id=&folder_id=5274.
12. Джоунс К. Д. *Сооружения из армированного грунта*. Мельник В. Г. (ред.). Москва: Стройиздат; 1989. 268 с.
13. Хрусталева Л. Н. *Основы геотехники в криолитозоне*. Москва: ИНФРА-М; 2019. 543 с. https://doi.org/10.12737/textbook_5c6142a7282862.58234241
14. Павлов А. Р., Матвеева М. В. Итерационная разностная схема для задачи тепломассопереноса при промерзании грунтов. *Вестник Самарского государственного университета. Серия естественнонаучная*. 2007;(6):242–252. Режим доступа: <http://vestniksamgu.ssau.ru/est/2007web6/math/2007560310.pdf>.
15. Кроник Я. А., Демин И. И. *Расчеты температурных полей и напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений методом конечных элементов*. Москва: МИСИ; 1982. 102 с.
16. Роман Л. Т. *Механика мерзлых грунтов*. Москва: Наука/Интерпериодика; 2002. 425 с.
17. Макаров А. С., Краев А. Н., Твердохлеб С. А., Шанхоев З. Ш. Результаты экспериментального исследования и численного моделирования плоскопараллельного промораживания образца грунта в экспериментальном стенде. *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2017;4(4):09TS417. <http://dx.doi.org/10.15862/09TS417>
18. Сахаров И. И., Парамонов В. Н., Парамонов М. В., Игошин М. Е. Деформации морозного пучения и оттаивания грунтов при работе и повреждении сезонно-охлаждающих устройств. *Промышленное и гражданское строительство*. 2017;(12):23–30. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32278886>.

19. Кудрявцев С. А., Сахаров И. И., Парамонов В. Н. *Промерзание и оттаивание грунтов*. Санкт-Петербург: Геореконструкция; 2014. 247 с. Режим доступа: <http://geo-bookstore.ru/files/KudrSahPar.pdf>.
20. Мельников А. В. Влияние теплоизоляции фундаментов на изменение температурного режима сезонно-промерзающего основания в районе глубокого сезонного промерзания. *Вестник гражданских инженеров*. 2012;(6):77–83. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20153977>.
21. Осокин Н. И., Сосновский А. В., Накалов П. Р., Ненашев С. В. Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта. *Лед и Снег*. 2013;(1):93–103. Режим доступа: <https://ice-snow.igras.ru/jour/article/view/89>.

References

1. Marahtanov V. P. Pipelines pile foundation cryogenic deformations. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika*. 2013;5:18–22. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23502631>.
2. Pazinyak V. V., Kutvitskaya N. B., Minkin M. A. The experimental researches on pipeline stability for large-scale soil model. *Earth's Cryosphere*. 2006;X(1):51–55. (In Russ.) Available at: https://earthcryosphere.ru/archive/2006_1/07.Pazinyak_1_2006.pdf.
3. *Recommendations for the design and calculation of shallow foundations on powdery soils* [Order of the Red Banner of Labor N. M. Gersevanov NIIOSP of the USSR Gosstroy]. Moscow: Order of the Red Banner of Labor N. M. Gersevanov NIIOSP of the USSR Gosstroy; 1985. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200074992>.
4. Baj V. F., Mal'tseva T. V., Nabokov A. V., Vorontsov V. V., Minaeva A. V. Theoretical prerequisites for the calculation of sand reinforced massifs in weak clay soils. *Oil and Gas Studies*. 2011;(1):102–106. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16452831>.
5. Maltsev L. E., Maltseva T. V., Minayeva A. V., Nabokov A. V. Definition of displacement reinforcing element sandy cylinder. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2012;(2):234–238. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17779954>.
6. Maltseva T. V., Nabokov A. V., Chernykh A. V. Reinforced sand piles for low-rise buildings. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2015;(2):34–39. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24389410>.
7. Bay V. F., Kraev A. N. Research of performance of the sand pad reinforced on the contour with the curvilinear sole in the conditions of weak clay soil. *Bulletin of Civil Engineers*. 2014;(3):107–110. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21813073>.
8. Tazhigulov A. A. *Sandy cushions with geotextile on weak water-saturated clay soils*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 1993. (In Russ.)
9. Tat'yannikova D. A., Ponomarev A. B. Model die tests to investigate the performance of reinforced foundation pads under load. In: *Inzhenerno-geotekhnicheskie izyskaniya, proektirovanie i stroitel'stvo osnovaniy, fundamentov i podzemnykh sooruzheniy*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2017. P. 219–223. (In Russ.)
10. Mirsayapov I. T., Sharafutdinov R. A. Bearing capacity and precipitation of soil foundations reinforced by vertical and horizontal elements. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2016;(2):111–116. (In Russ.) Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26455345_84235665.pdf.
11. Grishina A., Mashchenko A., Ponomarev A. Results of strength research of clay soil reinforced by different geosynthetics. *PNRPU Bulletin. Urban development*. 2015;(4):9–21. (In Russ.) Available at: https://vestnik.pstu.ru/urbanistic/archives/?id=&folder_id=5274.
12. Jones C. J. F. P. *Earth reinforcement and soil structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 1988. Available at: https://www.academia.edu/40325571/Earth_Reinforcement_and_Soil_Structures.
13. Khrustalev L. *Fundamentals of geotechnics in the cryolithozone*. Moscow: INFRA-M; 2019. https://doi.org/10.12737/textbook_5c6142a7282862.58234241
14. Pavlov A. R., Matveeva M. V. Iterative finite-difference scheme for the problem of heat and mass transfer in freezing grounds. *Vestnik of Samara University/ Natural Science Series*. 2007;(6):242–252. (In Russ.) Available at: <http://vestniksamgu.ssau.ru/est/2007web6/math/2007560310.pdf>.
15. Kronik Ya. A., Demin I. I. *Calculations of temperature fields and stress-strain state of soil structures by finite element method*. Moscow: Moscow Engineering and Construction Institute; 1982. (In Russ.)
16. Roman L. T. *Mechanics of frozen soils*. Moscow: Nauka/Interperiodika; 2002. (In Russ.)

17. Makarov A. S., Kraev A. N., Tverdokhlebov S. A., Shankhoyev Z. Sh. Results of experimental research and numerical modeling of plane-parallel freezing of a soil sample in an experimental test-bed. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2017;4(4):09TS417. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.15862/09TS417>
18. Sakharov I. I., Paramonov V. N., Paramonov M. V., Igoshin M. E. Deformations of frost heave and thawing of soils during operation and damage of seasonal cooling devices. *Industrial and Civil Engineering*. 2017;(12):23–30. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32278886>.
19. Kudryavtsev S. A., Sakharov I. I., Paramonov V. N. *Freezing and thawing of soils*. Saint Petersburg: Georekonstruktsiya; 2014. (In Russ.) Available at: <http://geo-bookstore.ru/files/KudrSahPar.pdf>.
20. Mel'nikov A. V. Influence of foundation heat insulation on temperature conditions change of the seasonally frozen soil base in the area of deep seasonal freezing. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012;(6):77–83. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20153977>.
21. Osokin N. I., Sosnovsky A. V., Nakalov P. R., Nenashev S. V. Thermal resistance of snow cover and its effect on the ground freezing. *Ice and Snow*. 2013;53(1):93–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-93-103>



Информация об авторах

Скворцов Дмитрий Сергеевич, ассистент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, tmn.skvorcov@mail.ru

Синицкий Антон Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Научный центр изучения Арктики, Салехард, Российская Федерация, AlSinitskii@yanao.ru

Жайсамбаев Ерkn Аскерович, аспирант кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, zhajsambaeva@tyuiu.ru

Information about the authors

Dmitry S. Skvortsov, Assistant in the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, tmn.skvorcov@mail.ru

Anton I. Sinitskii, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Scientific Center for Arctic Studies, Salekhard, Russian Federation, AlSinitskii@yanao.ru

Erkn A. Zhajsambaev, Postgraduate Student in the Department of Construction Production, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, zhajsambaeva@tyuiu.ru

Получена 17 июня 2024 г., одобрена 30 августа 2024 г., принята к публикации 20 сентября 2024 г.

Received 17 June 2024, Approved 30 August 2024, Accepted for publication 20 September 2024