

Решение задачи о распределении температурных полей в грунтовом массиве численными методами

Андрей Будимирович Пономарев¹, Денис Сергеевич Кораблев²,
Вячеслав Михайлович Полунин^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; г. Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

³ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры
и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Практически четверть суши земного шара и две трети территории Российской Федерации, включая значительные площади с высокой концентрацией природных ресурсов и полезных ископаемых, находятся в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Эти грунты обладают структурной неустойчивостью: температурные колебания приводят к радикальному снижению их прочностных характеристик и развитию значительных деформаций, что может критически влиять на безопасность и надежность зданий и сооружений. Географические особенности РФ обуславливают необходимость разработки и уточнения расчетных методов для определения температурных полей в основаниях грунтов криолитозоны. Рассматривается реализация задачи промерзания и оттаивания грунтового массива с использованием численных методов.

Материалы и методы. Представлены основные положения нелинейной математической модели, описывающей температурные превращения в грунтовом массиве с учетом фазового перехода поровой жидкости в лед и соответствующими теплофизическими процессами. Модель реализована в разрабатываемом авторами специализированном программном комплексе, реализующем метод конечных элементов.

Результаты. Проведены численные расчеты температурных воздействий от возводимых зданий и сооружений на грунтовый массив в плоской подстановке. Рассматривались численные модели с учетом воздействия граничных условий различного типа на расчетную область. Результаты численных расчетов подробно сравнивались с результатами аналогичных расчетов, выполненных в апробированных программных комплексах.

Выводы. Сформулированы ключевые механизмы численной модели, описывающей температурные превращения в грунтовом массиве, и предложена их реализация с использованием метода конечных элементов. Дополнительно представлены рекомендации о дальнейшем развитии численной модели, включая решение деформационной задачи об определении осадки оттаивания грунтового массива.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод конечных элементов, многолетнемерзлые грунты, промерзание, оттаивание, методы расчета, теплофизические расчеты

Благодарности. Авторы выражают благодарность НИИСФ РААСН за поддержку данного исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пономарев А.Б., Кораблев Д.С., Полунин В.М. Решение задачи о распределении температурных полей в грунтовом массиве численными методами // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 1. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.5

Автор, ответственный за переписку: Денис Сергеевич Кораблев, d.korablv@yandex.ru.

Solution of the problem of temperature field distribution in a soil massif by numerical methods

Andrey B. Ponomarev¹, Denis S. Korablev², Vyacheslav M. Polunin^{2,3}

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University; St. Petersburg, Russian Federation;

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation;

³ Scientific research institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences;
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Almost a quarter of the Earth's landmass and two thirds of the territory of the Russian Federation, including significant areas with a high concentration of natural resources and minerals, are located in the permafrost zone. These soils

have structural instability: temperature fluctuations lead to a radical decrease in their strength characteristics and the development of significant deformations, which can critically affect the safety and reliability of buildings and structures. The geographical features of the Russian Federation necessitate the development and refinement of computational methods for determining temperature fields in the bases of cryolithozone soils. This paper discusses the implementation of the problem of freezing and thawing of a soil mass using numerical methods.

Materials and methods. The main provisions of a nonlinear mathematical model describing temperature transformations in a soil body, taking into account the phase transition of a pore liquid into ice and the corresponding thermophysical processes, are presented. The model was implemented in a specialized software package developed by the authors that implements the finite element method.

Results. As part of the study, numerical calculations of the temperature effects of buildings and structures under construction on the soil mass in a flat substitution were carried out. Numerical models were considered taking into account the impact of boundary conditions of various types on the computational domain. The results of numerical calculations were compared in detail with the results of similar calculations performed in proven software packages.

Conclusions. In this paper, the main mechanisms of a numerical model describing temperature transformations in a soil body are formulated and their implementation using the finite element method is proposed. Additionally, recommendations are presented on the further development of the numerical model, including the solution of the deformation problem of determining the precipitation of thawing of a soil body.

KEYWORDS: finite element method, permafrost soils, freezing, thawing, calculation methods, thermophysical calculations

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Scientific research institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences for the support of this study.

FOR CITATION: Ponomarev A.B., Korablev D.S., Polunin V.M. Solution of the problem of temperature field distribution in a soil massif by numerical methods. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(1):5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.5

Corresponding author: Denis S. Korablev, d.korablev@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Примерно четверть поверхности суши земного шара находится в зоне вечной мерзлоты, или так называемой «криолитозоне», характеризующейся наличием многолетнемерзлых грунтов. В Российской Федерации значительные территории, в которых сосредоточены обширные запасы природных ресурсов и полезных ископаемых, также сложены многолетнемерзлыми грунтами. Освоение этих территорий сопряжено с рядом существенных инженерно-технических сложностей: строительство и эксплуатация зданий, сооружений и линейных объектов происходят в условиях потенциальной неустойчивости многолетнемерзлых оснований вследствие теплового воздействия.

В настоящее время применяются два основных принципа строительства на многолетнемерзлых грунтах. Первый принцип заключается в минимизации теплового воздействия возводимого сооружения на грунты основания с целью предотвращения оттаивания многолетнемерзлых грунтов, что способствует сохранению их прочностных и деформационных характеристик на всем сроке эксплуатации сооружения. Второй предполагает управляемое оттаивание многолетнемерзлого основания в процессе строительства или эксплуатации с последующей стабилизацией границы оттаивания, что также обеспечивает безопасность и устойчивость строительных конструкций [1].

При проектировании сооружений с использованием каждого из указанных принципов основополагающей задачей является выполнение теплотехнического расчета, необходимого для оценки величины температурного воздействия на грунты основания в процессе строительства и последующей эксплуа-

тации зданий и сооружений. Оценка температурного режима в основании сооружений позволяет минимизировать риски, связанные с изменением физико-механических свойств многолетнемерзлых грунтов под воздействием тепла [2, 3]. Оттаивание многолетнемерзлых грунтов сопровождается резким снижением их прочностных и деформационных характеристик, а также развитием значительных деформаций, критических для безопасности и надежности возводимых сооружений [4–6]. При наличии в основании талых грунтов, напротив, при их промораживании возникает риск развития деформаций морозного пучения, служащих причиной большинства аварийных ситуаций на объектах строительства в криолитозоне [7, 8]. Сложность прогнозирования и расчетной оценки деформационных превращений в многолетнемерзлых и талых грунтах при их оттаивании и промораживании соответственно, а также их критическая значимость и количественное выражение определяют необходимость совершенствования расчетных методов для оценки температурного режима грунтового основания в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений [9].

Первые комплексные теоретические, лабораторные и полевые исследования свойств грунтов в процессе их оттаивания и промерзания, послужившие основой для формирования первых математических моделей, описывающих температурно-влажностные и деформационные превращения в промерзающих и оттаивающих грунтах, были произведены М.И. Сумгиным и Н.А. Цытовичем в 30-х гг. XX в. [10, 11]. На ранних этапах исследований определение температурных полей в грунтовом массиве выполнялось с использованием ряда существенных упро-

щений и допущений: в частности, игнорировалась нестационарность тепловых процессов, не учитывались скрытая теплота фазовых переходов при преобразовании поровой жидкости в лед и обратно, а также содержание физически и химически связанной поровой жидкости при отрицательных температурах грунта [12, 13]. В дальнейшем, благодаря совершенствованию математического аппарата и росту производительности электронно-вычислительных машин, а также широкому внедрению компьютеризации расчетов, стала возможной разработка более точных и комплексных математических моделей, учитывающих полный спектр физико-механических процессов в грунтовом массиве в течение промерзания и оттаивания [14–18].

Сегодня наибольшую распространенность в решении задач геотехники получил метод конечных элементов (МКЭ), заключающийся в разбиении непрерывной области на дискретные конечные элементы (КЭ), связанные друг с другом в узлах и имеющие ограниченное количество степеней свободы за счет конечного числа узлов в рамках каждого элемента [19]. Внешнее воздействие на расчетную область при этом задается за счет наложения граничных условий различного вида [20, 21]. С целью оценки распределения температур в грунтовом массиве проводится вычисление температур в узлах КЭ посредством решения составленной системы уравнений, полученной исходя из условий минимизации потенциальной энергии и условия, что взаимодействие между КЭ производится исключительно в узлах.

В практике современного отечественного проектирования широкую применимость получили иностранные программные комплексы (ПК), такие как PLAXIS, MIDAS GTX, Z-Soil, не учитывающие специфику нормативной документации РФ, что приводит к проблеме их адаптации и применения в проектной деятельности. Аналогичные отечественные программные продукты широко не представлены на рынке и, кроме того, зачастую уступают иностранным ПК по функциональным возможностям. В условиях ограничений, накладываемых на использование лицензированных зарубежных ПК, встает важная задача по разработке и внедрению собственного геотехнического программного обеспечения. Это обусловлено необходимостью импортозамещения специализированных программных продуктов, что позволит снизить зависимость от иностранных разработок и обеспечить соответствие расчетных процедур российским стандартам.

Цель настоящего исследования — реализация универсальной теплофизической математической модели промерзающего и оттаивающего грунта в разрабатываемом авторами ПК с использованием МКЭ, с возможностью дальнейшей разработки температурно-деформационной модели на базе представленной, учитывающей процессы морозного пучения и развитие деформаций оттаивания в талых и многолет-

немерзлых грунтах соответственно. В статье приведены методические аспекты численной реализации задачи, включая выбор алгоритмов для решения нелинейных уравнений теплопроводности, а также результаты численных экспериментов и их анализ, сделаны выводы относительно возможностей и ограничений разработанного подхода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Несмотря на многолетнюю историю развития численных методов в строительной отрасли, научнотехническая и справочная литература не предоставляют возможности подробного изучения математического аппарата, являющегося основой современных геотехнических комплексов, что способствует значительному усложнению разработки даже базовых механизмов поведения грунтовой среды на основании существующих исследований.

В данной статье выполнена реализация математической теплофизической модели промерзающего и оттаивающего грунта с применением языка программирования Python. Модель интегрирована в разрабатываемый авторами специализированный конечно-элементный ПК.

Математическая реализация двумерной задачи промерзания и оттаивания выполнена на основе задачи Стефана. Главная сложность задачи состоит в необходимости описания динамической границы раздела фаз — фронта промерзания (или оттаивания), который изменяет свое положение во времени. Это требует решения сопряженной системы уравнений, включающей уравнение теплопроводности и условия на движущейся границе. В двумерном грунтовом пространстве процессы промерзания-оттаивания в нестационарном режиме описываются уравнением теплопроводности следующего вида:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q, \quad (1)$$

где ρ — плотность сухого грунта, кг/м³; C — удельная теплоемкость грунта (талого или мерзлого), Дж/кг·°C; T — температура, °C; t — время, с; λ — теплопроводность грунта (талого или мерзлого), Вт/м·°C; x, y — координаты, м; q — мощность внутренних источников тепла, Вт/м.

Для стационарного режима (установившиеся условия) уравнение принимает вид:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q = 0. \quad (2)$$

Скрытая теплота фазовых переходов учитывается в функции теплоемкости:

$$C = C_0 + L_0 \frac{\partial w}{\partial T}, \quad (3)$$

где L_0 — объемная скрытая теплота фазовых переходов, Дж/м³; w — влажность грунта за счет содержания незамерзшей поровой воды.

Использование МКЭ позволяет эффективно дискретизировать пространственное решение, разделяя исследуемую область на КЭ, в которых решаются локальные уравнения теплопроводности. Система конечно-элементных уравнений задачи теплопроводности может быть получена минимизацией соответствующего функционала на множестве функций, удовлетворяющих граничным условиям задачи [22]:

$$[C]\{T\} + [\lambda]\{T\} + [R] = 0, \quad (4)$$

где $[C]$ — матрица теплоемкости грунта; $\{T\}$ — вектор узловых температур; $[\lambda]$ — матрица теплопроводности грунта; $[R]$ — вектор правой части.

Искомая функция температуры T аппроксимируется на момент времени t в элементах и во всей рассматриваемой области функциями формы N :

$$T = \sum_{i=1}^n \{N(x, y)\}_i^T \{T\}_i = [N]\{T\}. \quad (5)$$

В таком случае матрица теплоемкости системы имеет вид:

$$[C] = \sum_{i=1}^n C_p [N]^T [N] dV. \quad (6)$$

Матрица теплопроводности системы при этом имеет вид:

$$[\lambda] = \sum_{i=1}^n \int \lambda [B]^T [B] dV + \int \alpha [N]^T [N] dS, \quad (7)$$

где $[C]$ — матрица теплоемкости; $[N]$ — матрица функций формы конечного элемента; $[\lambda]$ — матрица теплопроводности; $[B]$ — матрица производных функций формы конечного элемента по координатам.

Граничные условия, необходимые для решения уравнения (1), могут представлять собой:

1. Значение температуры на поверхности рассматриваемой области (граничное условие Дирихле):

$$T = T_0. \quad (8)$$

2. Значение теплового потока через границу рассматриваемой области (граничное условие Неймана):

$$q = \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (9)$$

где q — плотность теплового потока на рассматриваемой границе, Вт/м²; n — вектор направления внешней нормали к поверхности, м.

3. Значение температуры за пределами рассматриваемой области с учетом коэффициента конвективного теплообмена на границе рассматриваемой области (граничное условие Робена):

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T - T_a), \quad (10)$$

где q — коэффициент конвективного теплообмена на границе рассматриваемой области, Вт/м²·°С.

Решение нестационарной температурной задачи выполняется путем дискретизации расчетного временного интервала на шаги, в пределах каждого из которых производится решение уравнения (1). Положение границы фазового перехода также обновляется на каждом временном шаге согласно уравнению Стефана. По достижении требуемого расчетного времени решение задачи останавливается, позволяя оценить распределение температур в грунтовом массиве и их изменение во времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящем разделе представлены результаты численного моделирования реализованной температурной задачи. С целью проверки разработанного решения проведено сопоставление результатов численного расчета с результатами решения аналогичных задач в апробированном ПК PLAXIS 2D.

Расчеты производились с использованием треугольных трехузловых КЭ с интерполяционными полиномами первой степени. В ПК PLAXIS 2D использовались треугольные шестиузловые КЭ. Геометрия

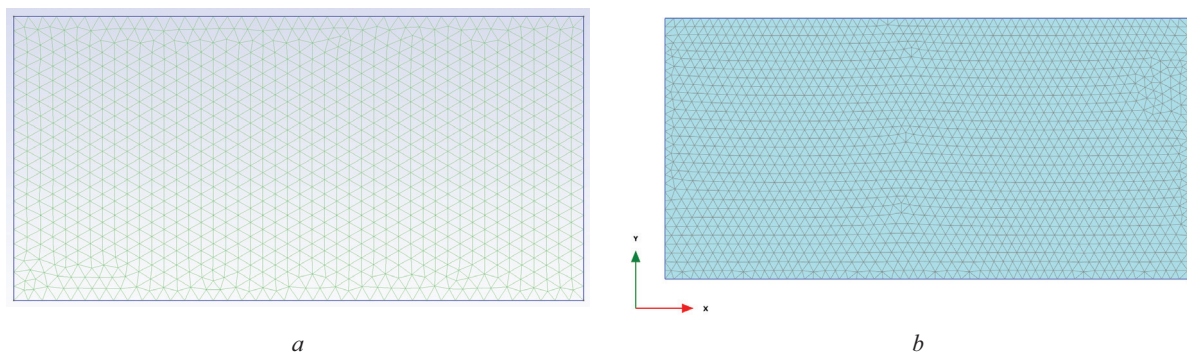


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы: *a* — в разработанном ПК; *b* — в PLAXIS 2D Thermal (однородный грунтовый массив, стационарная задача)

Fig. 1. General view of the calculation scheme: *a* — in the developed PC; *b* — in PLAXIS 2D Thermal (homogeneous soil body, steady problem)

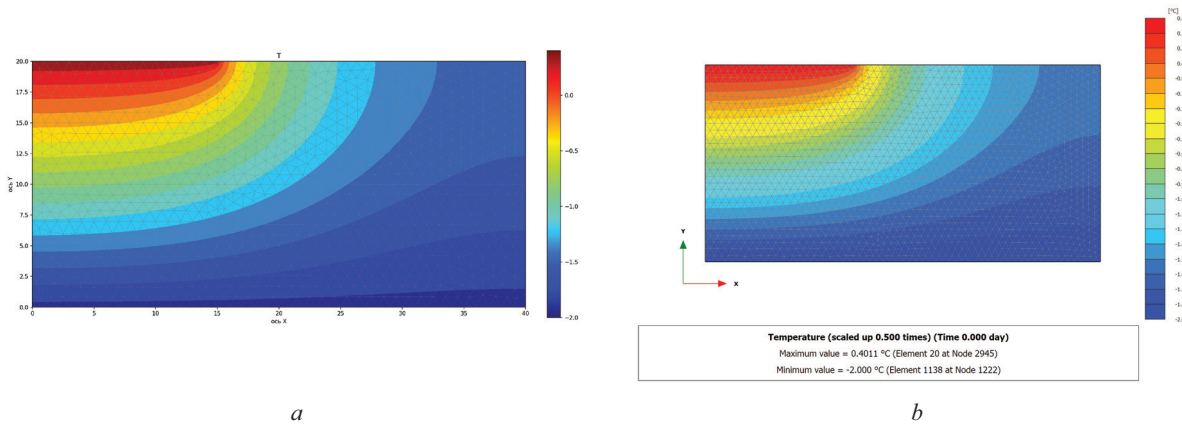


Рис. 2. Изополя распределения температур: *a* — в разработанном ПК; *b* — в PLAXIS 2D Thermal. В расчетной схеме применены граничные условия Дирихле ($T = 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Расчет выполнялся в стационарной постановке

Fig. 2. Isofields of temperature distribution: *a* — in the developed PC; *b* — in PLAXIS 2D Thermal. Dirichlet boundary conditions are used in the calculation scheme ($T = 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$). The calculation was performed in a steady setting

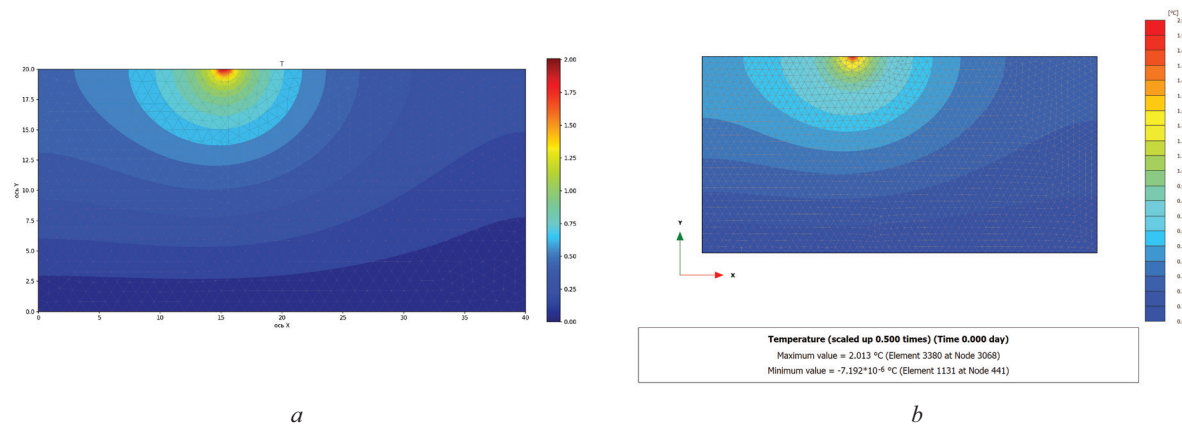


Рис. 3. Изополя распределения температур: *a* — в разработанном ПК; *b* — в PLAXIS 2D Thermal. В расчетной схеме применены граничные условия Неймана ($q = 5\text{ Вт/м}^2$). Расчет выполнялся в стационарной постановке

Fig. 3. Isofields of temperature distribution: *a* — in the developed PC; *b* — in PLAXIS 2D Thermal. Neumann boundary conditions are used in the calculation scheme ($q = 5\text{ W/m}^2$). The calculation was performed in a steady setting

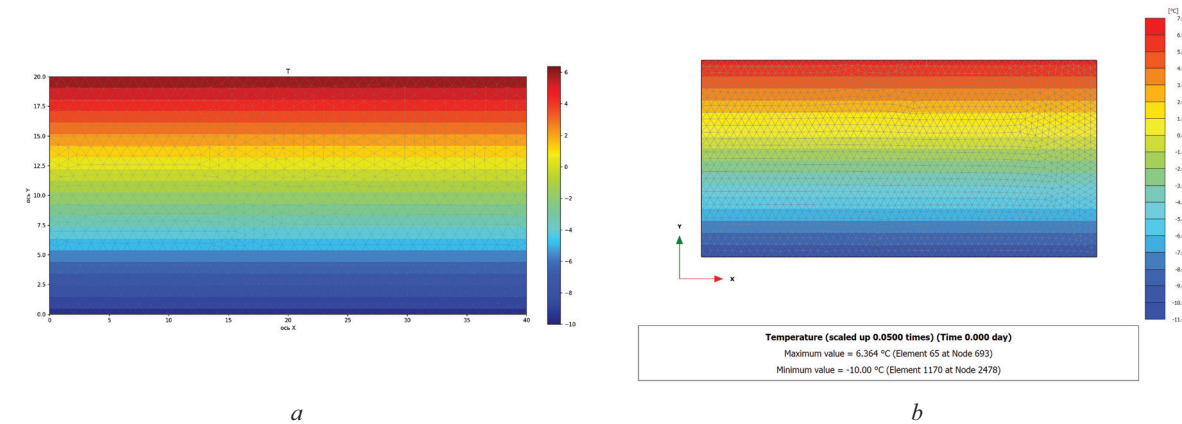


Рис. 4. Изополя распределения температур: *a* — в разработанном ПК; *b* — в PLAXIS 2D Thermal. В расчетной схеме применены граничные условия Робена ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 0,0015$). Расчет выполнялся в стационарной постановке

Fig. 4. Isofields of temperature distribution: *a* — in the developed PC; *b* — in PLAXIS 2D Thermal. Robin boundary conditions are used in the calculation scheme ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 0.0015$). The calculation was performed in a steady setting

Табл. 1. Сравнение результатов стационарных расчетов температурного режима оснований
Table 1. Comparison of the results of steady calculations of the temperature regime of the foundations

Номер	Тип задачи	Значение T , ПО авторов, °C	Значение T , PLAXIS 2D, °C	Несходимость решения, %
1	Стационарная задача, граничные условия Дирихле (заданная температура)	0,4013	0,4011	0,05
2	Стационарная задача, граничные условия Неймана (заданный тепловой поток)	2,002	2,013	0,55
3	Стационарная задача, граничные условия Робена (конвективный теплообмен)	6,632	6,364	1,07

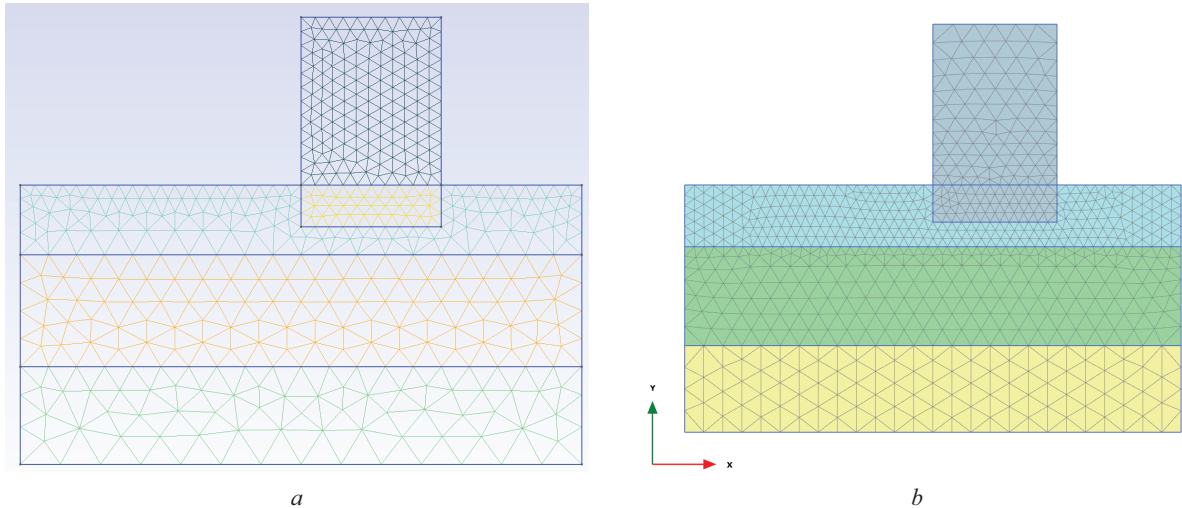


Рис. 5. Общий вид расчетной схемы: a — в разработанном ПК; b — в PLAXIS 2D Thermal (неоднородное грунтовое напластование, нестационарная задача)
Fig. 5. General view of the calculation scheme: a — in the developed PC; b — in PLAXIS 2D Thermal (homogeneous soil massif, non-stationary problem)

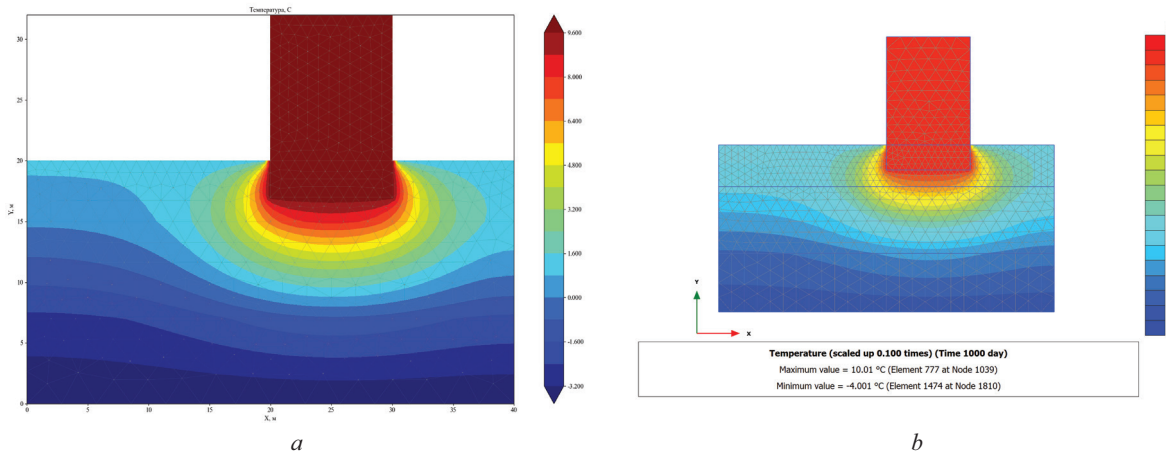


Рис. 6. Изополя распределения температур: a — в разработанном ПК; b — в PLAXIS 2D Thermal. В расчетной схеме применены граничные условия Дирихле ($T = 10\text{ °C}$). Расчет выполнялся в нестационарной постановке, время, приложенное на этапе возведения сооружения, составляет 1000 дней
Fig. 6. Isofields of temperature distribution: a — in the developed PC; b — in PLAXIS 2D Thermal. Dirichlet boundary conditions are used in the calculation scheme ($T = 10\text{ °C}$). The calculation was performed in a non-steady setting, time involved in the construction phase of the structure is 1,000 days

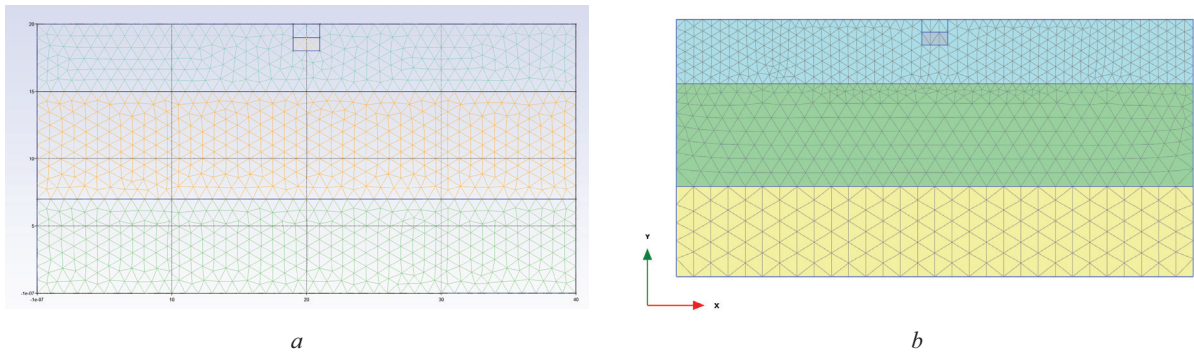


Рис. 7. Общий вид расчетной схемы: *a* — в разработанном ПК; *b* — в PLAXIS 2D Thermal (неоднородное грунтовое напластование, нестационарная задача)

Fig. 7. General view of the calculation scheme: *a* — in the developed PC; *b* — in PLAXIS 2D Thermal (homogeneous soil body, non-steady problem)

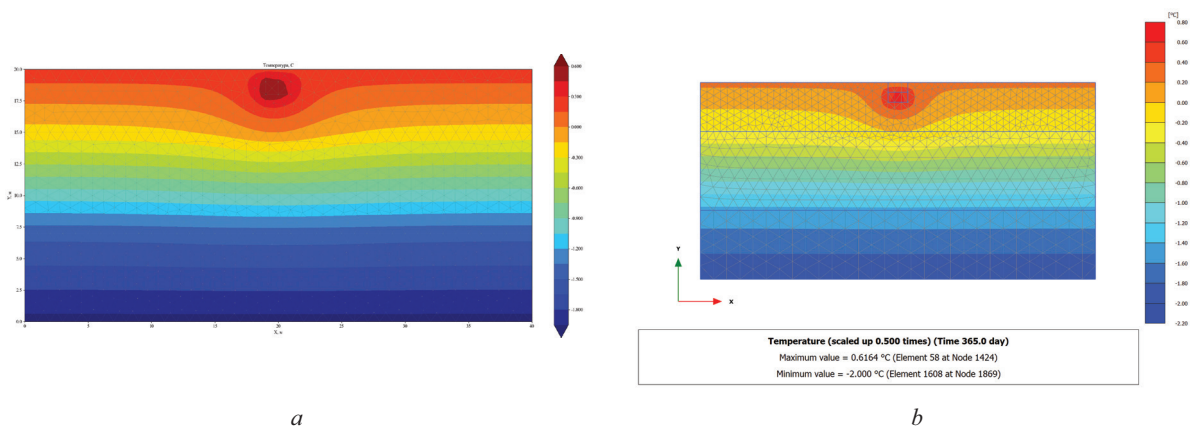


Рис. 8. Изополя распределения температур: *a* — в разработанном ПК; *b* — в PLAXIS 2D Thermal. В расчетной схеме применены граничные условия Неймана ($q = 1 \text{ Вт/м}^2$). Расчет выполнялся в нестационарной постановке, время, приложенное на этапе возведения сооружения, составляет 365 дней

Fig. 8. Isofields of temperature distribution: *a* — in the developed PC; *b* — in PLAXIS 2D Thermal. Neumann boundary conditions are used in the calculation scheme ($q = 1 \text{ W/m}^2$). The calculation was performed in a non-steady setting, time involved in the construction phase of the structure is 365 days

Табл. 2. Сравнение результатов нестационарных расчетов температурного режима оснований

Table 2. Comparison of the results of non-steady calculations of the temperature regime of the foundations

Номер	Тип задачи	Глубина чаши оттаивания, ПО авторов, м	Глубина чаши оттаивания, PLAXIS 2D, м	Несходимость решения, %
1	Нестационарная задача, граничные условия Дирихле (заданная температура)	5,83	5,85	0,3
2	Нестационарная задача, граничные условия Неймана (заданный тепловой поток)	2,31	2,32	0,4

расчетной схемы разработана в ПК Gmsh с открытым исходным кодом.

В первую очередь выполнено решение стационарной теплофизической задачи для однородного грунтового напластования. Общий вид расчетной схемы представлен на рис. 1. Описание граничных условий для каждой задачи приведено в качестве

подписей к рисункам. Распределение температурных полей в грунтовом основании от воздействия внешних условий различного типа показано на рис. 2–6.

Сопоставление результатов численного расчета в различных ПК представлено в табл. 1.

В дальнейшем выполнено решение нестационарной теплофизической задачи для неоднородного

грунтового напластования с моделированием внешнего воздействия от производства строительных работ и эксплуатации возведенных зданий и сооружений. На первом этапе в расчетной схеме моделируется природное распределение температур в грунтовом массиве. На последующих этапах осуществляются моделирование возведения сооружений и нестационарная оценка теплофизического воздействия на грунтовое основание во времени. Общий вид расчетных схем представлен на рис. 5 и 7. Описание граничных условий для каждой задачи приведено в качестве подписей к рисункам. Распределение температурных полей в грунтовом основании от воздействия внешних условий различного типа показано на рис. 6, 8.

Сопоставление результатов численного расчета в различных ПК представлено в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании рассмотрено решение задачи промерзания и оттаивания грунта, математическая реализация которой выполнена на основании нестационарной задачи Стефана с использованием языка программирования Python. Модель интегрирована в разрабатываемый авторами специализированный конечно-элементный (ПК).

С целью апробации разработанного решения проведено сопоставление результатов численного расчета в разработанном авторами ПО с результатами решения аналогичных задач в ПК PLAXIS 2D.

Расчеты производились с использованием треугольных трехузловых КЭ с интерполяционными полиномами первой степени. В ПК PLAXIS 2D применялись треугольные шестиузловые КЭ. Геометрия расчетной схемы разработана в ПК Gmsh с открытым исходным кодом.

Выполнено решение стационарной теплофизической задачи для однородного грунтового напластования с использованием граничных условий Дирихле, Неймана и Робена (заданная температура, заданный тепловой поток, конвективный теплообмен на границе). Конечно-

элементный анализ решения температурной задачи качественно показывает удовлетворительную сходимость с апробированным лицензированным зарубежным программным обеспечением. Расхождение в определении температурных полей и границ зоны оттаивания грунтового массива составляет не более 1 %.

В дополнение осуществлено численное моделирование строительства здания и устройства трубопровода, возводимых на многолетнемерзлых грунтах. С целью оценки величины температурного воздействия выполнено решение нестационарной теплофизической задачи для неоднородного грунтового напластования с использованием граничных условий Дирихле и Неймана. Расчетная модель учитывает этапность возведения строительных конструкций и сооружений. Конечно-элементный анализ решения нестационарной температурной задачи также качественно показывает удовлетворительную сходимость с апробированным лицензированным зарубежным ПО. Расхождение в определении температурных полей и границ зоны оттаивания грунтового массива составляет не более 1 %.

Несмотря на то что решение задачи о распределении температурных полей в грунтовом массиве является основополагающим для оценки безопасности и надежности возводимых конструкций в условиях залегания многолетнемерзлых грунтов, комплексное расчетное обоснование строительства в криолитозоне следует производить с учетом температурно-деформационного анализа системы «основание – здание – сооружение». Для решения задачи об установлении деформаций морозного пучения или осадки оттаивания рационально использовать численные методы. Разработанная и реализованная авторами задача промерзания и оттаивания грунтового массива может служить основанием для создания комплексной деформационной модели промерзающего или оттаивающего грунта, разработка которой позволит повысить точность решения геотехнических и инженерных задач в условиях залегания многолетнемерзлых грунтов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Карлов В.Д. Принципы проектирования фундаментов при использовании в основаниях сооружений сезоннопромерзающих грунтов // Геотехника. Наука и практика : сб. науч. тр. 2000. С. 15.
2. Qi J., Cheng G., Vermeer P.A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils // *Advances in Earth Science*. 2005. Vol. 20. Pp. 887–894.
3. Xiang B., Liu E., Yang L. Influences of freezing–thawing actions on mechanical properties of soils and stress and deformation of soil slope in cold regions // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Issue 1. P. 5387.
4. Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils // *De-*

- velopments in Geotechnical Engineering. 1979. Vol. 26. P. 73–92.

5. Liu J., Liu X., Chen J., Zhai Y., Zhu Y., Cui F. Prediction of Permafrost Subgrade Thawing Settlement in the Qinghai–Tibet Engineering Corridor under Climate Warming // *Atmosphere*. 2024. Vol. 15. P. 730.

6. Kotov P.I., Khilimonyuk V.Z. Building stability on permafrost in Vorkuta, Russia // *Geography, Environment, Sustainability*. 2021. Vol. 14. Issue 4. Pp. 67–74.

7. Метелкин С.В., Парамонов В.Н. Морозное пучение и его влияние на распорную систему ограждающих конструкций глубоких котлованов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2022. Т. 19. № 1. С. 133–142.

8. Woo H.J., Go G.H. Mechanical behaviour assessment of retaining wall structure due to frost heave of frozen ground // International Journal of Geo-Engineering. 2024. Vol. 15.
9. Teng J., Dong A., Zhang S., Zhang X., Sheng D. Freezing-Thawing Hysteretic Behavior of Soils // Water Resources Research. 2024. Vol. 60.
10. Цытович Н.А., Сумгин М.И. Основания механики мерзлых грунтов. М. : АН СССР, 1937. 432 с.
11. Цытович Н.А. К теории равновесного состояния воды в мерзлых грунтах // Изв. АН СССР. Сер. Геология. 1945. № 5. С. 493–502.
12. Romanovsky V.E., Osterkamp T.E. Effects of unfrozen water on heat and mass transport processes in the active layer and permafrost // Permafrost and Periglacial Processes. 2000. Vol. 11. Issue 3. Pp. 219–239.
13. Chuvilin E., Sokolova N., Bukhanov B. Changes in unfrozen water contents in warming permafrost soils // Geosciences. 2022. Vol. 12. Issue 6. P. 253.
14. Кроник Я.А. Термомеханические модели мерзлых грунтов и криогенных процессов // Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. М. : Наука, 1982. С. 200–211.
15. Сахаров И.И., Кудрявцев С.А., Парамонов В.Н. Промерзающие, мерзлые и оттаивающие грунты как основания зданий и сооружений. М. : АСВ, 2021. 364 с.
16. Васильев В.И., Максимов А.М., Петров Е.Е., Цыпкин Г.Г. Тепломассоперенос в промерзающих и протаивающих грунтах. М. : Наука, 1996.
17. Li S., Sun T., Du Y., Li M. Influence of moisture on heat transfer of ground heat exchangers in unsaturated soils // Renewable Energy. 2022. Vol. 193.
18. Sarsembayeva A., Zhussupbekov A., Collins P. Heat and Mass Transfer in the Freezing Soils // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 12–32.
19. Сахаров И.И., Парамонов В.Н., Парамонов М.В. Современный подход к температурным и деформационным расчетам оснований объектов криолитозоны // Геотехника. 2022. Т. 14. № 3. С. 34–43.
20. Кораблев Д.С. Решение температурных задач в современных программных комплексах на примере малых лабораторных образцов // Серия «Строительство» : сб. ст. магистрантов и аспирантов. 2023. С. 452–460.
21. Ozeritskiy K., Hayley J., Gunar A. Understanding the influence of boundary conditions and thermophysical soil parameters on thermal modelling in permafrost regions. 2023.
22. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М. : Недра, 1987. 221 с.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

О Б А В Т О Р А Х : Андрей Будимирович Пономарев — доктор технических наук, профессор, кафедра промышленного и гражданского строительства; Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2; andreypab@mail.ru;

Денис Сергеевич Кораблев — ассистент, аспирант, кафедра геотехники; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, d.korablv@yandex.ru;

Вячеслав Михайлович Полунин — кандидат технических наук, доцент, кафедра геотехники; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; старший научный сотрудник; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; n1ce2u@yandex.ru.

Вклад авторов:

Пономарев А.Б. — научное руководство, научное редактирование текста.

Кораблев Д.С. — концепция исследования, разработка программного кода специализированного программного комплекса на основе метода конечных элементов, доработка основных алгоритмов решателя, доработка основных математических выкладок математической модели грунта.

Полунин В.М. — корректировка выводов, развитие методологии, доработка текста, подготовка расчетных схем.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Karlov V.D. Principles of Foundation Design for Structures Based on Seasonally Freezing Soils. *Geotechnics. Science and Practice: collection of scientific papers*. 2000; 15. (rus.).
2. Qi J., Cheng G., Vermeer P.A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils. *Advances in Earth Science*. 2005; 20:887-894.
3. Xiang B., Liu E., Yang L. Influences of freezing–thawing actions on mechanical properties of soils and stress and deformation of soil slope in cold regions. *Scientific Reports*. 2022; 12(1):5387.
4. Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. *Developments in Geotechnical Engineering*. 1979; 26:73-92.
5. Liu J., Liu X., Chen J., Zhai Y., Zhu Y., Cui F. Prediction of Permafrost Subgrade Thawing Settlement in the Qinghai–Tibet Engineering Corridor under Climate Warming. *Atmosphere*. 2024; 15:730.
6. Kotov P.I., Khilimonyuk V.Z. Building stability on permafrost in Vorkuta, Russia. *Geography, Environment, Sustainability*. 2021; 14(4):67-74.
7. Metelkin S.V., Paramonov V.N. Frost Heave and Its Impact on Bracing Systems of Deep Excavation Enclosures. *Proceedings of the Petersburg State Transport University*. 2022; 19(1):133-142. (rus.).
8. Woo H.J., Go G.H. Mechanical behaviour assessment of retaining wall structure due to frost heave of frozen ground. *International Journal of Geo-Engineering*. 2024; 15.
9. Teng J., Dong A., Zhang S., Zhang X., Sheng D. Freezing-Thawing Hysteretic Behavior of Soils. *Water Resources Research*. 2024; 60.
10. Tsytovich N.A., Sumgin M.I. *Fundamentals of frozen soil mechanics*. Moscow, AN USSR, 1937; 432. (rus.).
11. Tsytovich N.A. Towards the theory of the equilibrium state of water in frozen soils. *Izv. AN SSSR. Ser. Geology*. 1945; 5:493-502. (rus.).
12. Romanovsky V.E., Osterkamp T.E. Effects of unfrozen water on heat and mass transport processes in the active layer and permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2000; 11(3):219-239.
13. Chuvilin E., Sokolova N., Bukhanov B. Changes in unfrozen water contents in warming permafrost soils. *Geosciences*. 2022; 12(6):253. (rus.).
14. Kronik Ya.A. Thermomechanical models of frozen soils and cryogenic processes. *Soil geology and engineering permafrost science*. Moscow, Nauka, 1982; 200-211. (rus.).
15. Sakharov I.I., Kudryavtsev S.A., Paramonov V.N. *Freezing, frozen and thawing soils as foundations for buildings and structures*. Moscow, ASV, 2021; 364. (rus.).
16. Vasil'ev V.I., Maksimov A.M., Petrov E.E., Tsytkin G.G. *Heat and mass transfer in freezing and thawing soils*. Moscow, Nauka, 1996. (rus.).
17. Li S., Sun T., Du Y., Li M. Influence of moisture on heat transfer of ground heat exchangers in unsaturated soils. *Renewable Energy*. 2022; 193.
18. Sarsembayeva A., Zhussupbekov A., Collins P. Heat and Mass Transfer in the Freezing Soils. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 12-32.
19. Sakharov I.I., Paramonov V.N., Paramonov M.V. *Modern approach to temperature and deformation calculations of foundations of cryolithozone objects*. *Geotechnics*. 2022; 14(3):34-43. (rus.).
20. Korablev D.S. Solving Temperature Problems in Modern Software Packages Using Small Laboratory Specimens as an Example. *Series "Construction": collection of articles by master's and postgraduate students*. 2023; 452-460. (rus.).
21. Ozeritskiy K., Hayley J., Gunar A. *Understanding the influence of boundary conditions and thermophysical soil parameters on thermal modelling in permafrost regions*. 2023.
22. Fadeev A.B. *Finite element method in geomechanics*. Moscow, Nedra, 1987; 221. (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on September 20, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

B I O N O T E S: **Andrey B. Ponomarev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Industrial and Civil Engineering; **Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University**; build. 2, 21st Line, Vasilevsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation; andreypab@mail.ru;

Denis S. Korablyov — assistant, postgraduate student, Department of Geotechnics; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; d.korablv@yandex.ru;

Vyacheslav M. Polunin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Geotechnics; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; senior researcher; **Scientific research institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences**; 21, Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; n1ce2u@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Andrey B. Ponomarev — scientific supervision, scientific editing of the text.

Denis S. Korablyov — research concept, development of the program code for a specialized software package based on the finite element method, refinement of the main solver algorithms, refinement of the main mathematical calculations of the mathematical model of the soil.

Vyacheslav M. Polunin — correction of conclusions, development of methodology, revision of text, preparation of calculation schemes.

The authors declare that there is no conflict of interest.