

УДК 624.14

Параметры мерзлых грунтов при численном моделировании теплофизических задач

К. В. Сливец, С. С. Колмогорова, И. А. Коваленко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сливец К. В., Колмогорова С. С., Коваленко И. А. Параметры мерзлых грунтов при численном моделировании теплофизических задач // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 359–366. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-359-366

Аннотация

Цель: В настоящее время наиболее распространенные зарубежные геотехнические программные комплексы (Midas GTS NX, Plaxis) имеют в своем составе модули для теплофизического моделирования. Теплофизическое моделирование особенно важно при проектировании и строительстве на основаниях, сложенных мерзлыми грунтами. При проведении численных расчетов важным является этап верификации моделей, в данном случае теплофизических моделей, мерзлых грунтов на предмет их соответствия теоретическим основам и расчетным предпосылкам, заложенным в отечественных нормах. С этой целью было выполнено сравнение теоретических предпосылок в зарубежных геотехнических комплексах с предпосылками, заложенными в пакете Termoground, созданном при участии специалистов ФГБОУ ВО ПГУПС (С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов). Данный пакет имеет длительный опыт успешного использования в практике расчетов и проектирования, реализованные в нем теоретические предпосылки верифицированы и полностью соответствуют требованиям отечественных норм. **Методы:** Проведение теоретического анализа нормативных и технических документов зарубежных программных комплексов. Выполнение численного моделирования реальных теплофизических задач. **Результаты:** Установлено, что зависимости, лежащие в основе зарубежных геотехнических комплексов, в целом имеют те же теоретические предпосылки, что и отраженные в отечественных нормативных документах, также при численном моделировании отмечена удовлетворительная сходимость расчетных температурных полей в массиве грунта для реальных задач строительства сооружений на мерзлых грунтах. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы в практике проектирования и строительства для задания теплофизических параметров грунтов основания при проведении численного моделирования теплофизических задач и анализа геокриологической ситуации в условиях Крайнего Севера.

Ключевые слова: Численное моделирование, теплофизическое моделирование, мерзлый грунт, многолетнемерзлые грунты, теплоемкость грунта, теплопроводность грунта, midas.

Введение

Следует отметить, что процессы теплопереноса в мерзлых грунтах несколько сложнее, чем в конструкционных материалах, и имеют ряд существенных особенностей. Прежде всего это связано с тем, что грунт — это многофазная среда, включающая воду, для которой необходимо вводить описание фазовых превращений [1, 2], поэтому теплофизическое моделирование грунтов требует отдельной верификации. В настоящее время моделирование теплофизических задач производится с применением численных методов, среди которых наиболее распространенным является метод конечных элементов [3–6].

С этой целью было выполнено сравнение теоретических предпосылок в зарубежных геотехнических комплексах и с предпосылками, заложенными в пакете Termoground, созданном при участии специалистов ФГБОУ ВО ПГУПС [5, 6]. Данный модуль является частью программного комплекса FEM models и имеет длительный опыт успешного использования в практике расчетов и проектирования, реализованные в нем теоретические предпосылки верифицированы и полностью соответствуют требованиям отечественных норм.

В отечественных нормах [7, 8] объемная теплоемкость складывается из двух компонент:

$$c_{v,eff} = c_v + c_{v,фаз}, \quad (1)$$

где $c_v, c_{v,фаз}$ — объемная эффективная теплоемкость и объемная теплота фазовых превращений.

Выражение для объемной эффективной теплоемкости получается на основании нахождения средневзвешенного значения удельных теплоемкостей компонент (фаз) грунта:

$$c = (c_s m_s + c_w m_w + c_i m_i) / m, \quad (2)$$

где c_s, c_w, c_i — удельная теплоемкость твердых частиц, воды и льда соответственно, m — масса выделенного объема грунта.

После ряда преобразований выражение для объемной теплоемкости грунта можно свести к виду, который и используется в нормах, а именно:

$$c_{v,eff} = c_s + c_w w_w + c_i (w_{tot} - w_w) \rho_{d,f}, \quad (3)$$

где $\rho_{d,f}$ — плотность сухого мерзлого или талого грунта; w_{tot} — суммарная влажность мерзлого грунта; w_w — влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды, определяемая на основании зависимости.

В зарубежных программных комплексах [9, 10] используется следующее выражение для суммарной объемной теплоемкости:

$$c_v = c\rho = (1-n)\rho_s c_s + n[\rho_w c_w + L_0 df_u / dT], \quad (4)$$

где ρ_s, ρ_w, ρ_i — плотность твердых частиц, воды и льда соответственно, $f_u = w_w / w_{tot}$ — функция относительного содержания незамерзшей воды в зависимости от температуры, n — пористость грунта.

Из выражения (2) эффективная объемная теплоемкость (при условии полного водонасыщения пор грунта $S = 1$) может быть записана в виде:

$$c_{v,eff} = c\rho = (1-n)\rho_s c_s + n\rho_w c_w. \quad (5)$$

Функция w_w до начала замерзания воды в порах грунта принимает значение $w_w = w_{tot}$ в дальнейшем на основании зависимости:

$$w_w = k_w w_p, \quad (6)$$

где k_w — коэффициент, принимаемый для глинистых грунтов в зависимости от числа пластичности и температуры грунта по [7]; w_p — влажность на границе раскатывания.

В модели промерзания и оттаивания грунта программного модуля Termoground теплофизические параметры определяются интерполяцией для различных диапазонов температур [5, 6].

Диапазоном температур от положительной $T_{th} = +0^\circ\text{C}$ до температуры начала замерзания грунта T_{bf} , соответствующей началу замерзания свободной поровой влаги в крупных порах (Зона I). Диапазоном температур от T_{bf} до температуры начала замерзания связанной воды $T_{3,c}$ (Зона II). Зона II соответствует диапазон от $T_{3,c}$ до температуры мерзлого состояния грунта T_f . И зона IV практически мерзлого грунта с температурой от T_f и ниже.

В зоне талого грунта (Зона I), $T_{th} > T_{bf}$. Объемная теплоемкость принимается постоянной, равной значению для талого грунта, C_{th} принимается постоянной $c_{v,I} = c_{v,th} = \text{const}$.

В зоне замерзания (оттаивания) свободной воды (Зона II). $c_{v,II}$ принимаются переменными, зависящими от температуры грунта T_{th} ($T_{bf} \leq T = T_{th} \leq T_{3,c}$):

$$c_{v,II} = c_{v,eff}(T) + c_{\text{фаз}} = c_{th} - \frac{(c_{th} - c_f)(T_{bf} - T_{th})}{T_{bf} - T_f} + \frac{L_0 \rho_d (w_{tot} - w_w)}{T_{bf} - T_{3,c}}. \quad (7)$$

В зоне промерзающего (оттаивающего) грунта (Зона III) и замерзания (оттаивания) связанной воды ($T_{3,c} < T = T_{th} < T_f$) определяются на основании зависимости

$$c_{v,III} = c_{v,eff}(T) + c_{\text{фаз}} = c_f + \frac{(c_{th} - c_f)(T_{th} - T_f)}{T_{bf} - T_f} + L_0 \rho_d \frac{dw_w}{dT}. \quad (8)$$

Анализ выражения для эффективной теплоемкости грунта (формула 5) позволяет сделать вывод о том, что в зарубежных программах не учитывается изменение теплоемкости за счет изменения соотношения фаз при промерзании — оттаивании. В пакете Termoground изменение

эффективной теплоемкости учитывается путем интерполяции крайних значений на различных участках температур. Следует отметить, что для большинства реальных грунтов изменение эффективной теплоемкости за счет изменения соотношения фаз крайне мало в сравнении со второй определяющей компонентой теплоемкости талого или мерзлого грунта — теплоты фазовых превращений. Скрытая теплота фазовых переходов в интервале отрицательных температур равна теплоте, поглощенной или отданной грунтом из-за изменений фазы поровой воды. В зарубежных программных комплексах (см. выражение 2) обычно представляется в виде:

$$c_{\text{фаз}} = L_0 w_{tot} \frac{df_u}{dT}, \quad (9)$$

где $L_0 = 335 \cdot 10^6$ Дж/м³ — теплота фазовых превращений вода-лед. Данное выражение можно привести к виду:

$$c_{\text{фаз}} = L_0 \rho_d \frac{dw_w}{dT}. \quad (10)$$

Анализ зависимостей (9) и (10) показывает, что при определении теплоемкости для фазовых переходов используются одинаковые предпосылки. Основным вопросом является отыскание функции относительного содержания незамерзшей воды f_u . Для ее нахождения могут быть использованы имеющиеся в литературе многочисленные эмпирические зависимости. С точки зрения соответствия отечественным нормам следует принять функцию f_u по значениям коэффициента k_w . В этом случае существенных различий по величине общей объемной теплопроводности при теплофизическом моделировании мерзлых грунтов не ожидается.

В зарубежных геотехнических комплексах для нахождения коэффициента теплопроводности грунта используются формулы на основе соотношения компонент грунта, аналогичные формуле (2):

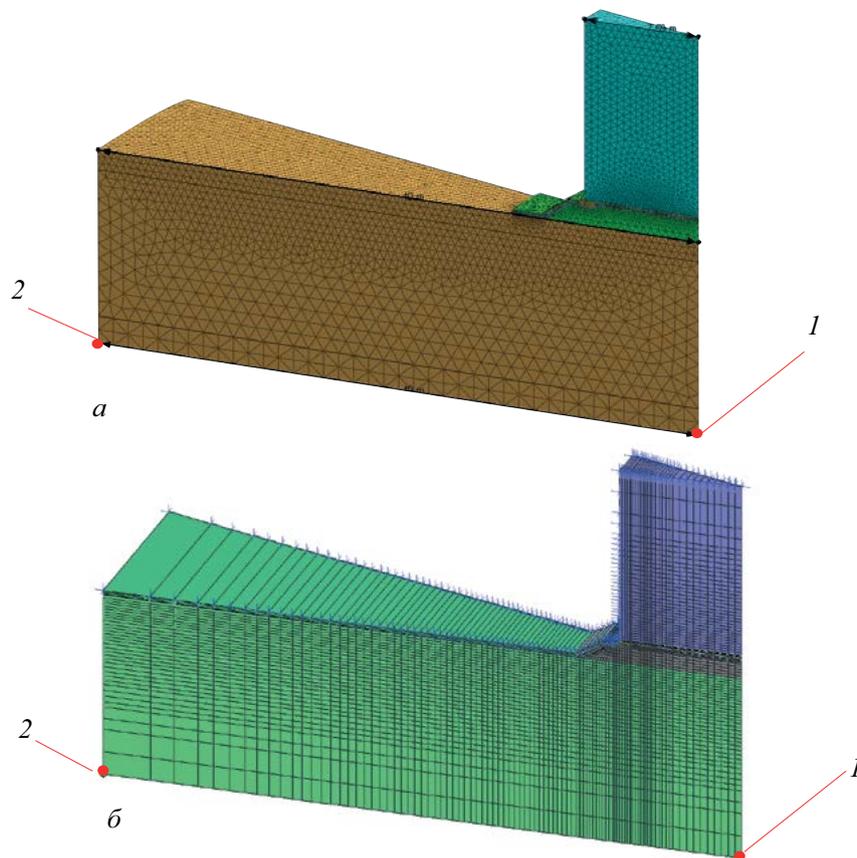


Рис. 1. Коэффициенты теплопроводности мерзлого и талого грунтов:
a — в программе Midas GTS NX; *б* — в программе Termoground; *1* — расположение точки № 1;
2 — расположение точки № 2

$$\lambda_{fT} = (1-n)\lambda_s + nS[(1-f_u)\lambda_i + f_u\lambda_w] + n(1-S)\lambda_v, \quad (11)$$

где $\lambda_s, \lambda_w, \lambda_i, \lambda_v$ — коэффициент теплопроводности материала твердых частиц, воды, льда и пара соответственно.

Вычисление теплопроводности по соотношению компонент грунта не совсем верно с точки зрения физики процесса, поскольку кроме процентного состава грунта на перенос тепла влияют его структура и текстура. В массиве грунта имеют место конвекция и излучение помимо кондуктивного переноса, поэтому реальные зависимости носят весьма сложный характер [11]. В

соответствии с отечественными нормами определение коэффициента теплопроводности осуществляется в зависимости от плотности сухого грунта и его влажности на основе специальных таблиц [7]. Данный подход реализован в пакете Termoground, в котором аналогично эффективной теплоемкости для различных диапазонов температур (Зоны I–IV) производится аппроксимация табулированных величин теплопроводности грунта в талом λ_{th} и мерзлом λ_f состоянии аналогично зависимостям для теплоемкости.

Следует отметить, что до настоящего времени отсутствует завершенная теория, позволяющая учесть и оценить вклад каждого из факторов, которые влияют на теплопроводность грунта,

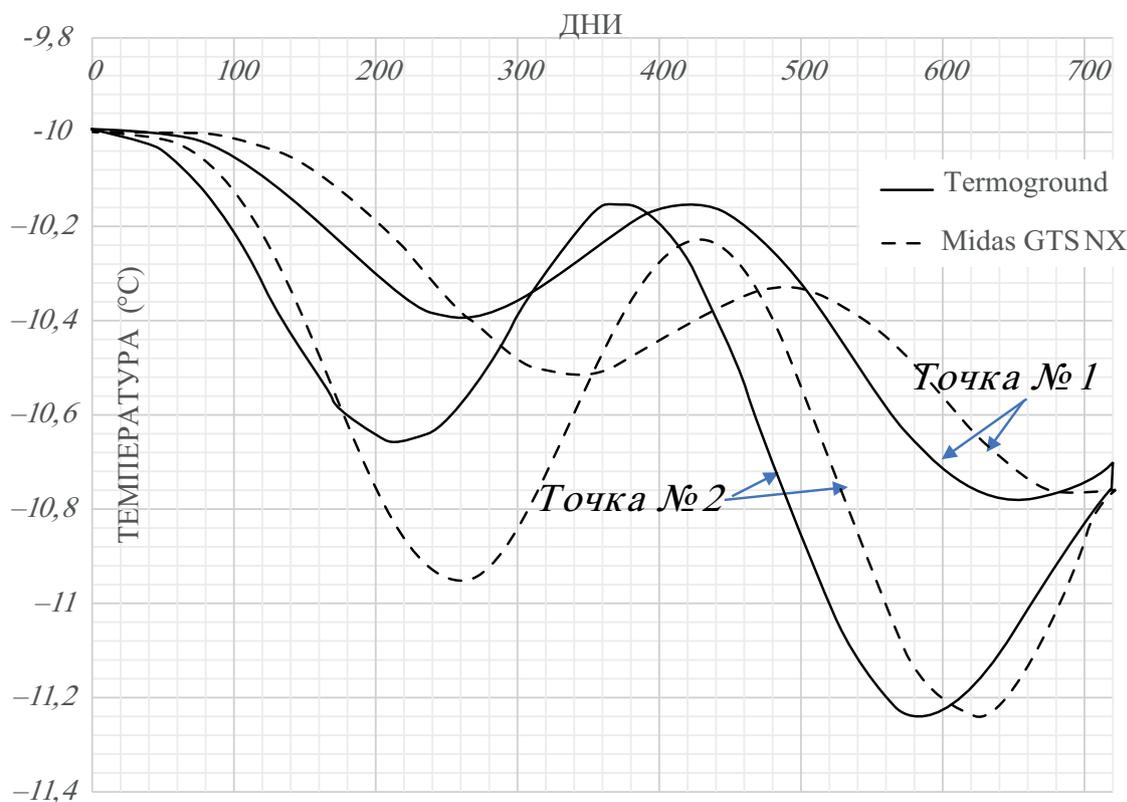


Рис. 2. Графики изменения расчетных температур в характерных точках во времени

можно предположить, что некоторые отличия в определении теплопроводности мерзлого грунта не сильно повлияют на результаты расчета температурных полей в грунте.

Для финальной оценки выполним сопоставление результатов для реальной задачи на основе замечаний, указанных выше. В задаче моделировался резервуар для хранения топлива, устраиваемый на мерзлом грунте. Подушка в основании резервуара имеет несколько слоев различных материалов, в том числе утеплителя.

Грунт основания имеет следующие физические характеристики: температура начала замерзания $T_{bf} = 0$ °C, теплопроводность талого и мерзлого грунта 175 кДж/(сут · м · °C); теплоемкость талого и мерзлого грунта 1700 кДж/(м³ · °C) Плотность скелета 1 г/см³, влажность $w_{tot} = 0,238$, граница раскатывания $w_p = 0,197$, число пластич-

ности $I_p = 0,106$, плотность минеральных частиц 2,66 г/см³.

Из рис. 2 видно хорошую сходимость результатов. Таким образом, можно заключить, что общие теоретические предпосылки, используемые в расчетах мерзлых грунтов с учетом фазовых переходов, весьма схожи, поэтому зарубежные геотехнические программы применимы при моделировании температурных задач в мерзлых грунтах.

Библиографический список

1. Невзоров А. Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах: учебное пособие / А. Л. Невзоров. — М.: АСВ, 2000. — 152 с.
2. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. — М.: Высш. школа, 1973. — 448 с.
3. Кроник Я. А. Термомеханические модели мерзлых грунтов и криогенных процессов / Я. А. Кроник //

Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. — М.: Наука, 1982. — С. 200–211.

4. Кроник Я. А. Расчеты температурных полей и напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений методом конечных элементов / Я. А. Кроник, И. И. Демин. — М.: МИСИ, 1982. — 102 с.

5. Кудрявцев С. А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчеты) / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов. — СПб.: Группа компаний «Геореконструкция», 2014.

6. Парамонов М. В. Напряженно-деформированное состояние системы «основание — сооружение» при неоднородном промерзании. автореф. дисс. канд. техн. наук / М. В. Парамонов. — СПб., 2013. — 12 с.

7. СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04—88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». — Утв. Министром строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ № 915/пр от 30 декабря 2020 г. — М.: ФАУ «ФЦС», 2020 — 135 с.

8. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. — Утв. Постановление Государственного комитета РСФСР по делам строительства №152 от 20.08.1987 г. — М.: Госстрой РСФСР, 1987 — 80 с.

9. MIDAS. — URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qdm1ZqeC67s> (дата обращения: 13.05.2022).

10. Вавринюк Т. С. Примеры температурных расчетов в ПК PLAXIS / Т. С. Вавринюк // XIII конференция пользователей PLAXIS, октябрь 2020 / ООО «НИП-Информатика». Систем. Требования: PowerPoint. — URL: <https://www.plaxis.ru/content/uploads/2020/11/RPUM-2020-Вавринюк-Т-С.pdf> (дата обращения: 13.05.2022).

11. Ильичев В. А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / В. А. Ильичев, Р. А. Мангушев. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. — 728 с.

Дата поступления: 06.05.2022

Решение о публикации: 24.05.2022

Контактная информация:

СЛИВЕЦ Константин Владимирович — канд. техн. наук, доц.; kslivez@yandex.ru

КОЛМОГорова Светлана Сергеевна — канд. техн. наук, доц.; kolmogorovsg@list.ru

КОВАЛЕНКО Илья Александрович — аспирант; ilyako27@mail.ru

Frozen Soil Parameters at Numerical Simulation of Thermophysical Tasks

K. V. Slivec, S. S. Kolmogorova, I. A. Kovalenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Slivec K. V., Kolmogorova S. S., Kovalenko I. A. Frozen Soil Parameters at Numerical Simulation of Thermophysical Tasks // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 359–366. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-359-366

Summary

Purpose: Currently, the most prevalent foreign geotechnical software systems (Midas GTS NX, Plaxis) include modules for thermophysical modeling. Thermophysical modeling is especially important in the design and construction on foundations composed of frozen soils. When carrying out numerical calculations, an important stage is the verification of models, here thermophysical models, of frozen soils for their compliance with theoretical bases and calculation prerequisites, underlying in domestic standards. For this purpose, a comparison was made of theoretical prerequisites in foreign geotechnical complexes with prerequisites underlying in Termoground package which was created with the participation of specialists from the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Petersburg State Transport University, PGUPS [Kudryavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N.]. This package has a long background of successful use in the practice of calculations and projection; the theoretical premises, implemented therein, are verified and fully comply with the requirements of domestic standards. **Methods:** Conducting theoretical analysis of regulatory and technical documents of foreign software systems. Performing numerical simulation of real thermophysical problems. **Results:** It has been established that dependences underlying foreign geotechnical complexes, in general, have the same theoretical prerequisites as those reflected in domestic regulatory documents; also, at numerical modeling, a satisfactory convergence of the calculated temperature fields in a soil mass for building construction real tasks on frozen ground was noted. **Practical importance:** The obtained results can be used in the practice of design/construction for to set thermophysical parameters for foundation soils in the course of numerical modeling of thermophysical tasks and analysis of geocryological situation of the Far North conditions.

Keywords: Numerical modeling, thermophysical modeling, frozen soil, permafrost soils, soil heat capacity, soil thermal conductivity, midas.

References

1. Nevzorov A. L. *Fundamenty na sezonno-promerzayushchikh gruntakh* [Foundations on seasonally freezing soils]. Moscow: ASV Publ., 2000. 152 p. (In Russian)
2. Tsytoovich N. A. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow: Vyssh. Shkola Publ., 1973. 448 p. (In Russian)
3. Kronik Ya. A. Termomekhanicheskie modeli merzlykh gruntov i kriogennykh protsessov [Thermomechanical models of frozen soils and cryogenic processes]. *Reologiya gruntov i inzhenernoe merzlotovedenie* [Rheology of soils and engineering permafrost]. Moscow: Nauka Publ., 1982, pp. 200-211. (In Russian)
4. Kronik Ya. A., Demin I. I. Raschety temperaturnykh poley i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntovykh sooruzheniy metodom konechnykh elementov [Calculations of temperature fields and stress-strain state of soil structures by the finite element method]. *MISI* [MISI]. Moscow: 1982. 102 p. (In Russian)

5. Kudryavtsev S. A., Sakharov I. I., Paramonov V. N. *Promerzanie i ottaivanie gruntov (prakticheskie primery i konechnoelementnye raschety): Gruppy kompaniy «Georekonstruktsiya»* [Freezing and thawing of soils (practical examples and finite element calculations): Georeconstruction Group of Companies]. St. Petersburg, 2014. (In Russian)
6. Paramonov M. V. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sistemy «osnovanie – sooruzhenie» pri neodnomernom promerzanii*. Kand. Diss [Stress-strain state of the "base – structure" system during non-one-dimensional freezing. Cand. Diss]. St. Petersburg, 2013. 12 p. (In Russian)
7. SP 25.13330.2020 «SNiP 2.02.04-88 *Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntakh*» – utv. Ministrom stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva RF №915/pr ot 30.12.2020 g. [SP 25.13330.2020 "SNiP 2.02.04-88 Bases and foundations on permafrost soils" – approved. Minister of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation No. 915 / pr dated December 30, 2020]. Moscow: FAU «FTsS» Publ., 2020. 135 p. (In Russian)
8. RSN 67-87. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Sostavlenie prognoza izmeneniy temperaturnogo rezhima vechnomerzlykh gruntov chislennymi metodami* – utv. Postanovlenie Gosudarstvennogo komiteta RSFSR po delam stroitel'stva №152 ot 20.08.1987 g. [RSN 67-87. Engineering surveys for construction. Prediction of changes in the temperature regime of permafrost soils by numerical methods - approved. Decree of the State Committee of the RSFSR for Construction No. 152 dated August 20, 1987]. Moscow: Gosstroy RSFSR Publ., 1987. 80 p. (In Russian)
9. Il'ichev V. A., Mangushev R. A. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenti i podzemnye sooruzheniya* [Handbook of geotechnics. Foundations, foundations and underground structures]. Moscow: Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov Publ., 2014. 728 p. (In Russian)
10. MIDAS. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=qdm1ZqeC67s> (accessed: May 13, 2022).
11. Vavrinyuk T. S. Primery temperaturnykh raschetov v PK PLAXIS. XIII konferentsiya pol'zovateley PLAXIS, oktyabr' 2020 [Examples of temperature calculations in the PLAXIS PC. XIII PLAXIS User Conference, October 2020]. OOO «NIP-Informatika». *Sistem. Trebovaniya: PowerPoint* [NIP-Informatics LLC. System. Requirements: PowerPoint]. Available at: <https://www.plaxis.ru/content/uploads/2020/11/RPUM-2020-Vavrinyuk-T-S.pdf> (accessed: May 13, 2022). (In Russian)

Received: May 06, 2022

Accepted: May 24, 2022

Author's information:

Konstantin V. SLIVETS – PhD in Engineering,
Professor Assistant; kslivez@yandex.ru

Svetlana S. KOLMOGOROVA – PhD in Engineering,
Professor Assistant; kolmogorovsg@list.ru

Ilya A. KOVALENKO – Postgraduate Student;
ilyako27@mail.ru