

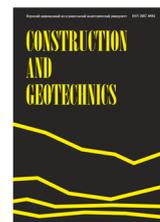


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 1, 2025

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.1.02

УДК 624.139

ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

А.Н. Краев, И.И. Сахаров, Т.В. Мальцева

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 02 апреля 2024
Одобрена: 22 сентября 2024
Принята к публикации:
05 марта 2025

Ключевые слова:

термостабилизация основания,
многолетнемерзлый грунт,
несущая способность,
льдогрунтовый массив,
термостабилизатор.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается проблематика строительства в условиях распространения вечномерзлых (многолетнемерзлых) грунтов с учетом фиксируемого изменения климата. Приводятся данные изменения климатических условий на территории Российской Федерации, а также в районе площадки строительства (Ямало-Ненецкий автономный округ). Анализ наблюдений за приповерхностной температурой воздуха показывает повышение среднегодовых температур относительно нормативных значений на 2–2,5 °С, что значительно сказывается на температурном режиме грунтов.

Приведены результаты статических испытаний грунтов сваями в талых и мерзлых условиях площадки строительства. По результатам статических испытаний грунтов сваями выявлено, что частные значения несущей способности свай в талых грунтах на вдавливающие нагрузки в 2,5 раза ниже, чем в аналогичных мерзлых грунтах.

В статье приводятся результаты наблюдений за температурным режимом грунтов в период термостабилизации грунтового основания при строительстве жилого дома. По результатам наблюдений выявлены периоды формирования льдогрунтового массива под сооружением, а также его деградация за теплый период года.

Выполнено численное моделирование температурного режима грунтов основания в программном комплексе Midas FEA NX с учетом фактических климатических параметров и начальных температур грунтов.

По результатам численного моделирования получено наглядное представление о стадиях формирования мерзлого массива грунта от создания отдельных льдогрунтовых элементов вокруг термостабилизаторов, с постепенным смерзанием мерзлых зон в сплошной льдогрунтовый массив. Также в результате численного моделирования получено распределение температур в грунтовом основании. Выполнено сравнение прогнозных температурных расчетов с результатами замеров температур грунтового основания.

© **Краев Андрей Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: kraev-an@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5679-2084.
Сахаров Игорь Игоревич – доктор технических наук, профессор, e-mail: i.sakharov2014@yandex.ru.
Мальцева Татьяна Владимировна – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: maltsevatv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-0274-0673.

Andrey N. Kraev – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: kraev-an@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5679-2084.
Igor I. Sakharov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: i.sakharov2014@yandex.ru.
Tatyana V. Maltseva – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: maltsevatv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-0274-0673.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

THERMAL STABILIZATION OF SOIL FOUNDATION UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS

A.N. Kraev, I.I. Sakharov, T.V. Maltseva

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 02 April 2024
Approved: 22 December 2024
Accepted for publication:
05 March 2025

Keywords:

base thermal stabilization,
permafrost soil, bearing capacity,
ice-soil mass, thermal stabilizer.

ABSTRACT

The problem of construction in the conditions of permafrost (permafrost) soil distribution is considered, taking into account the fixed climate change. The data on changes in climatic conditions on the territory of the Russian Federation, as well as in the area of the construction site (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug) are given. The analysis of observations of near-surface air temperature shows an increase in the average annual temperatures relative to the normative values by 2-2.5 °C, which significantly affects the temperature regime of soils.

The results of static tests of soils with piles in thawed and frozen conditions of the construction site are given. According to the results of static tests of soils with piles, it is revealed that private values of pile bearing capacity in melted soils for indentation loads are 2.5 times lower than in similar frozen soils.

The article presents the results of observations of the temperature regime of soils during the period of thermal stabilization of the soil foundation during the construction of a residential building. Based on the results of observations, the periods of ice-soil massif formation under the structure, as well as its degradation during the warm period of the year are revealed.

Numerical modeling of the temperature regime of the foundation soils was performed in the Midas FEA NX software package taking into account the actual climatic parameters and initial temperatures of soils.

According to the results of numerical simulation, a visual representation of the stages of frozen ground massif formation was obtained, from creation of separate ice-soil elements around thermal stabilizers, with gradual freezing of frozen zones into a continuous ice-soil massif. Also, as a result of numerical modeling the temperature distribution in the ground base was obtained. The predicted temperature calculations were compared with the results of ground base temperature measurements.

Введение

Многолетнемерзлые грунты (ММГ) занимают более 60 % территории Российской Федерации. При фиксируемом глобальном потеплении климата всё острее встаёт вопрос о сохранении многолетнемерзлых грунтов в мерзлом состоянии, а также дополнительном охлаждении и промораживании грунтов, находящихся в талом состоянии в зоне распространения ММГ при мерзлоте неслювающегося типа [1–3].

Выбор первого принципа проектирования (сохранения грунтов в мерзлом состоянии) связан, как правило, с наличием в основании грунтов в оттаянном состоянии, не обеспечивающих требуемой несущей способности, а также обладающих большой деформативностью.

В настоящее время в жилищном строительстве наибольшее распространение в качестве мероприятий по стабилизации температурного режима грунтов получило комбинированное решение в виде устройства проветриваемого подполья с установкой в нем сезонно действующих устройств (термостабилизаторов).

Изучению работы систем термостабилизации посвящено достаточно большое количество трудов [4–19], которые показывают эффективность данного решения.

При этом с повышением среднегодовых температур воздуха процесс промораживания может занимать достаточно большой промежуток времени (от одного года до трех

и более лет), в течение которого негативные процессы в виде миграции влаги, морозного пучения грунтов могут развиваться достаточно активно.

Тепловое и механическое взаимодействие зданий и сооружений с многолетнемерзлыми грунтами изучалось в работах Я.Б. Горелика, Г.М. Долгих, Я.А. Кроника, С.А. Кудрявцева, В.П. Мельникова, С.Н. Окунева, В.Н. Парамонова, И.И. Сахарова, Л.Н. Хрусталева и многих других авторов [19–27].

Анализ литературных источников показывает необходимость и важность учета изменения климата в теплотехнических прогнозах, выявляя проблему прогнозирования климатических характеристик на длительный промежуток времени. Одновременно с увеличивающимся периодом времени, затрачиваемым на термостабилизацию грунтов, появляется необходимость в более детальном моделировании процессов промерзания грунтового основания с выделением отдельных этапов (периодов) для возможности постепенного возведения зданий и сооружений при температурах, не достигших расчетных значений, а также учета появления при этом негативных процессов в виде неравномерных осадок фундаментов, морозного пучения и др.

Методика и постановка задачи

Потепление климата на территории Российской Федерации фиксируется с 1970 гг. по настоящее время. При этом средний тренд потепления составляет $0,51\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$.

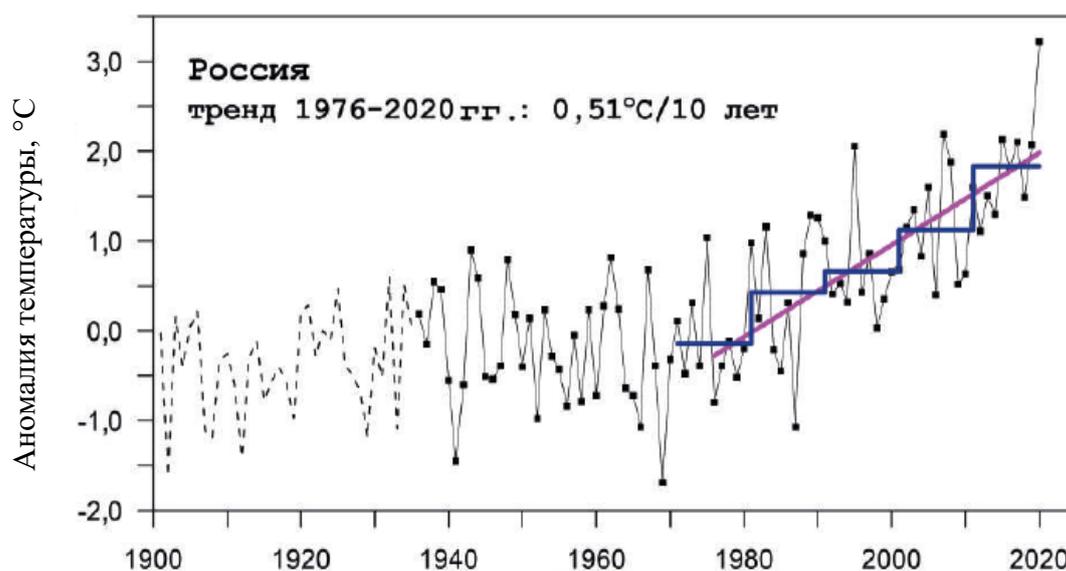


Рис. 1. Изменение приповерхностной температуры на территории Российской Федерации

Fig. 1. Variation of the near-surface temperature on the territory of the Russian Federation

Существует достаточно большое количество прогнозов по изменению глобальной температуры, некоторые из них представлены на рис. 2, в которых можно отметить значительный разброс прогнозируемых значений, от негативного (повышение температур воздуха до $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ к 2100 г.) до стабильного (повышение температур прекращается к 2050 г. с возможным частичным понижением температур к 2100 г.).

Рассматриваемый строящийся объект находится в г. Салехарде, ЯНАО. Анализ среднегодовых температур, по данным метеостанции г. Салехард, за период с 1980 по 2021 гг.

показывает превышение фактических среднегодовых температур над значениями, установленными в СП 131.13330.2020.

Наклон линии тренда показывает постепенное увеличение среднегодовых температур в г. Салехарде.

Инженерно-геологические условия площадки строительства были представлены суглинками, супесями и песчаными грунтами с залеганием кровли ММГ от 5 до 14 м (по данным результатов инженерных изысканий). Инженерно-геологические условия площадки представлены на рис. 4.

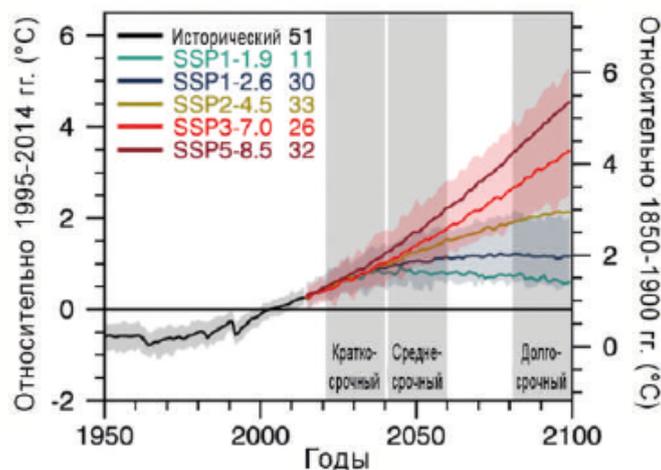


Рис. 2. Прогноз изменения приповерхностной температуры

Fig. 2. Prediction of surface temperature change

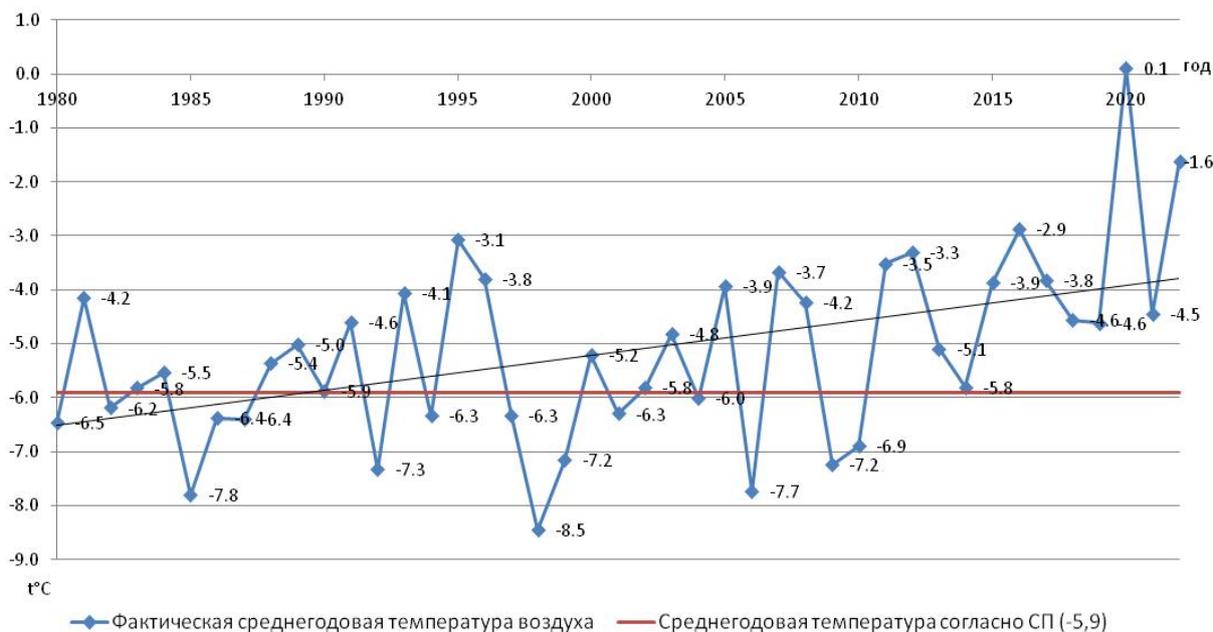


Рис. 3. Изменение приповерхностной температуры в г. Салехарде

Fig. 3. Variation of near-surface temperature in Salekhard

Следует обратить внимание на наличие в инженерно-геологическом разрезе элементов ИГЭ-11 (супесь льдистая) и ИГЭ-12 (суглинок слабольдистый), которые в талом состоянии обладают текучей и текучепластичной консистенцией, что требует особого внимания к температурному режиму грунтов в связи с малой несущей способностью и большой деформативностью данных инженерно-геологических элементов в талом состоянии.

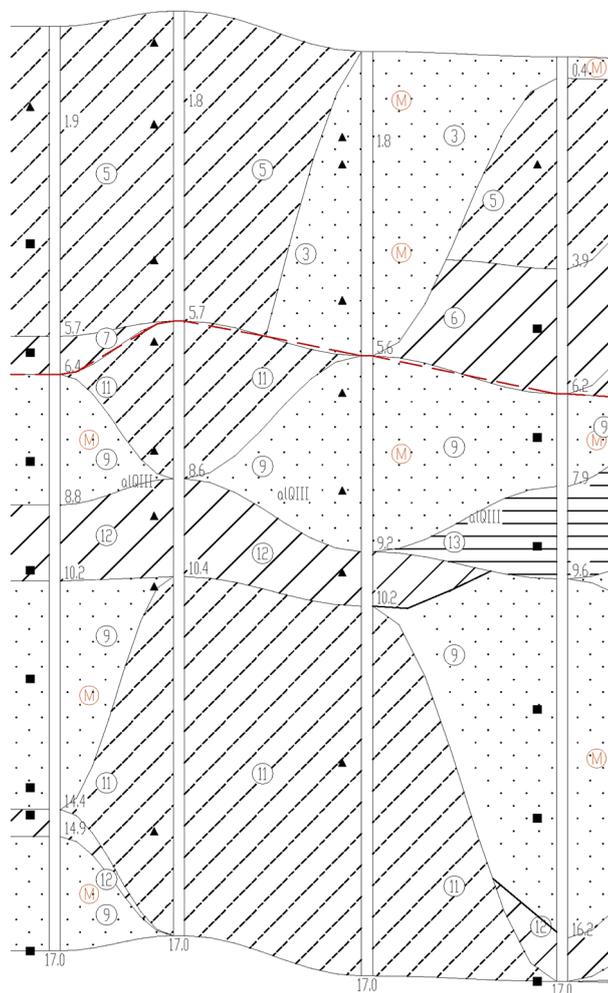


Рис. 4. Инженерно-геологические условия строительной площадки

Fig. 4. Engineering-geological conditions of the construction site

Проектом был предусмотрен свайный фундамент с длиной свай 12 м, погруженных в грунт на величину от 9,5–10,5 м. Сваи располагались в виде отдельно стоящих кустов, объединенных монолитными железобетонными ростверками. У ростверков отдельными группами располагались термостабилизаторы (рис. 5).

При выполнении статических испытаний грунтов натурными сваями выполнялись замеры температур грунтов в радиусе 1 м от испытываемой сваи. По результатам замеров температур были выявлены талые зоны грунтового основания с вышеуказанными грунтами. Частные значения несущей способности свай в талых грунтах на вдавливающие нагрузки были в 2,5 раза ниже, чем в мерзлых грунтах (рис. 6).

Значительная разница в несущей способности свай, испытанных в мерзлом и талом состояниях, объясняется наличием в основании сильносжимаемых текучепластичных талых грунтов.

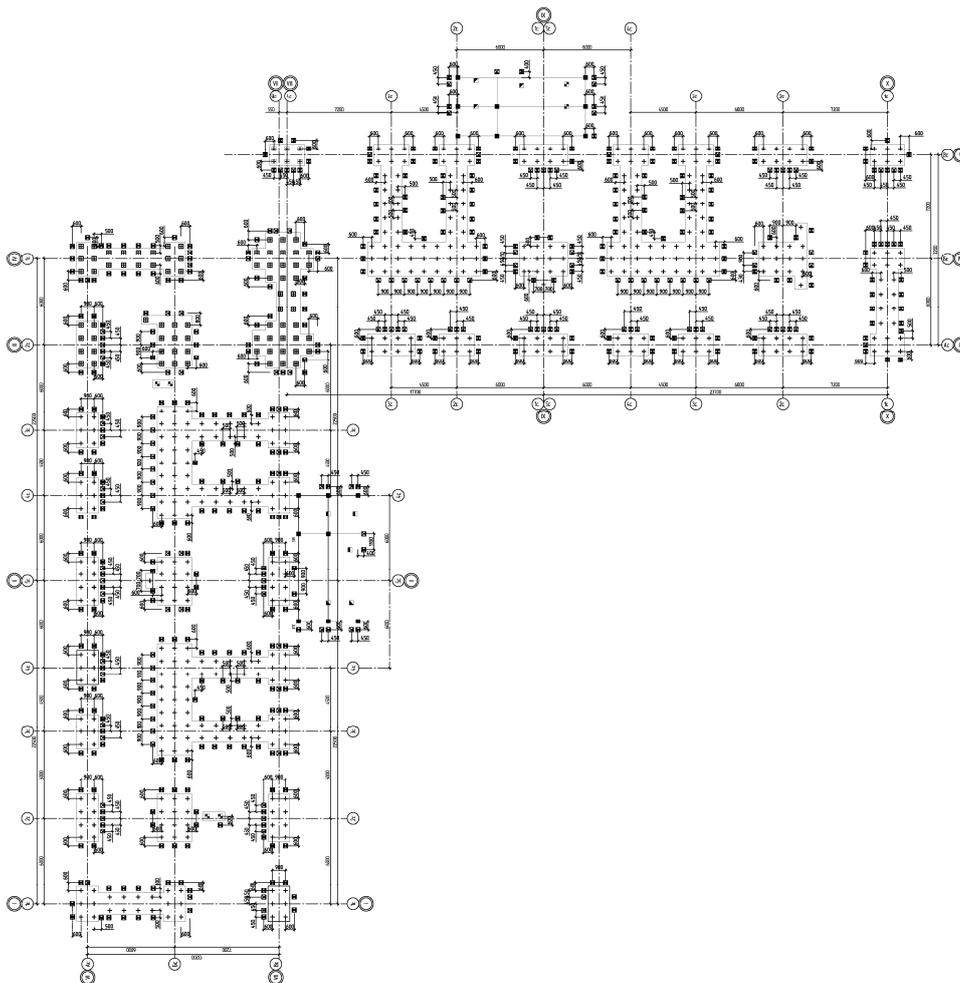


Рис. 5. Схема расположения фундаментов и термостабилизаторов

Fig. 5. Layout of foundations and thermal stabilizers

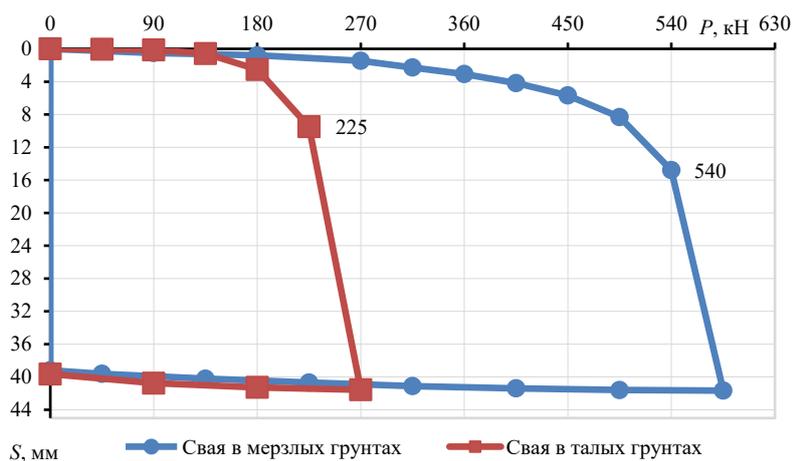


Рис. 6. Графики «нагрузка – осадка»

Fig. 6. Load and precipitation graph

Таким образом, при статических испытаниях грунтов сваями было выявлено, что к началу строительства часть грунтов в инженерно-геологическом разрезе находилась в талом или охлажденном состояниях. Для исключения неравномерных осадок здания,

а также обеспечения требуемой несущей способности свай проектом были заложены мероприятия по температурной стабилизации грунтов в виде проветриваемого подполья и установки термостабилизаторов, расположенных группами у свайных кустов. Расчетная температура грунтов, обеспечивающая требуемую несущую способность свай (50 тс), составляла минус 0,6 °С.

Первый зимний цикл термостабилизации грунтового основания проводился с октября 2020 г. Для контроля температурного режима грунтов было выполнено устройство 11 термометрических скважин глубиной 12 м. Замеры выполнялись ежемесячно с ноября 2020 г.

Результаты замеров температур представлены в таблице на конец зимнего и летнего периодов года для термометрической скважины №11.

Температуры грунта на конец зимнего и летнего периодов года
 Ground temperatures at the end of winter and summer periods of the year

Глубина измерения температуры, м	Температура грунта, °С							
	2020	2021		2022		2023		2024
	ноябрь	апрель	октябрь	апрель	октябрь	апрель	октябрь	апрель
0	-2,5	0,0	-4,4	-0,7	-2,1	-9,7	3,8	-7,2
0,5	-1,1	-3,1	-1,9	-1,9	-1,0	-10,3	2,4	-9,3
1	0,2	-4,0	-0,2	-3,1	0,0	-9,4	1,7	-9,4
1,5	0,6	-3,6	0,3	-4,0	0,2	-8,3	1,5	-8,8
2	1,0	-3,3	0,3	-4,1	-0,2	-7,7	1,1	-8,2
2,5	1,2	-2,8	0,2	-3,9	0,1	-7,2	0,3	-7,9
3	1,4	-2,2	0,0	-3,7	0,0	-6,8	-0,1	-7,6
3,5	1,5	-1,7	-0,1	-3,5	-0,1	-6,4	-0,4	-7,1
4	1,5	-1,3	-0,1	-3,2	-0,3	-6,0	-0,6	-6,9
4,5	1,4	-1,1	-0,1	-2,8	-0,3	-5,8	-0,9	-6,5
5	1,3	-0,9	-0,1	-2,4	-0,3	-5,5	-1,0	-6,2
6	0,8	-0,9	0,0	-1,9	-0,3	-5,1	-1,2	-5,7
7	0,3	-0,7	0,0	-1,6	-0,3	-4,6	-1,2	-5,3
8	-0,1	-0,7	-0,1	-1,5	-0,3	-4,1	-1,1	-4,9
9	-0,1	-0,5	-0,2	-1,3	-0,2	-3,7	-1,1	-4,4
10	-0,1	-0,4	-0,2	-1,0	-0,3	-2,7	-1,0	-3,6
11	0,0	-0,3	-0,1	-0,6	-0,2	-1,6	-1,0	-2,4
12	-0,1	-0,2	-0,1	-0,4	-0,2	-1,1	-0,8	-1,9
Средние температуры по боковой поверхности	+0,6	-0,9	-0,1	-1,9	-0,2	-4,5	-0,9	-5,2

По результатам замеров температуры грунтов на конец первого холодного периода 2020–2021 гг., было зафиксировано снижение средних температур по боковой поверхности смерзания до минус 0,9 °С, но на конец летнего периода произошло растепление грунта до средней температуры минус 0,1 °С.

На конец второго холодного периода 2021–2022 гг. зафиксировано улучшение динамики промерзания грунтового основания со снижением средних температур по боковой поверхности смерзания до минус 1,9 °С. На конец летнего периода произошло значительное растепление грунтового основания, однако температуры грунтов находились ниже либо на границе температуры начала замерзания грунтов, что говорило о частично преодоленном периоде промерзания с выделением скрытой теплоты фазовых переходов «вода – лёд».

На конец третьего холодного периода 2022–2023 гг. зафиксировано значительное понижение средних температур по боковой поверхности смерзания до минус 4,5 °С, с сохранением температур грунтов ниже расчетных значений на конец летнего периода.

Одновременно с наблюдением за температурой грунтов и другими параметрами, не отражаемыми в данной статье, выполнялось моделирование температурного режима основания с учетом фактических климатических условий и начальных температур грунтов.

Моделирование выполнялось в программном комплексе Midas FEA NX.

Расчетная область переставляла собой грунтовый массив с размерами в плане 150×150 м, высотой 50 м (рис. 7).

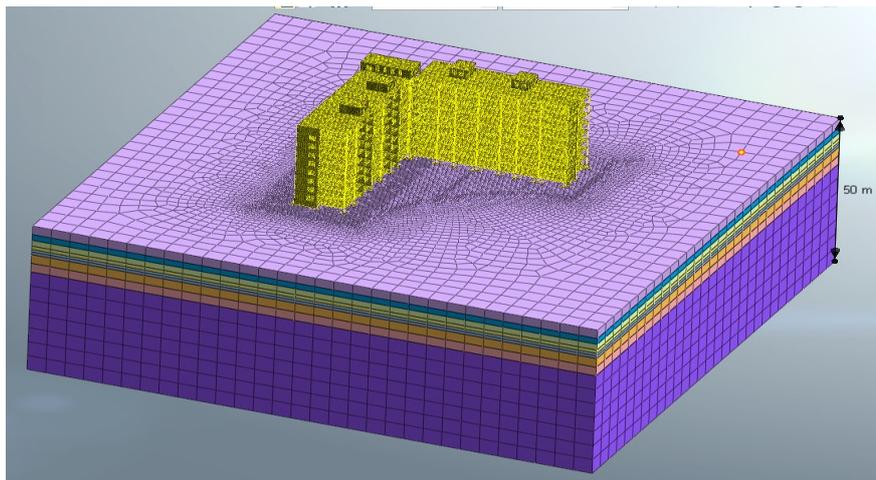


Рис. 7. Общий вид расчетной схемы грунтового массива со зданием

Fig. 7. General view of the design scheme of the soil mass with the building

Теплообмен с окружающей средой и работа термостабилизаторов моделировались граничными условиями третьего рода (температурой и коэффициентом теплообмена). По боковым граням и нижней плоскости модели задавался тепловой поток, равный нулю.

При моделировании теплообмена с окружающей средой учитывался тренд потепления, равный 0,05 °С/год.

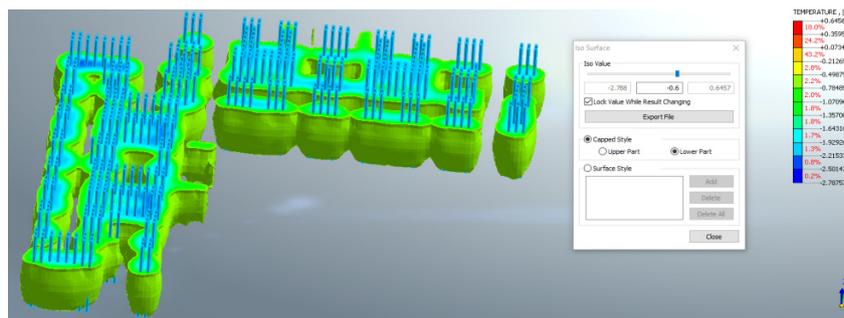
Результаты расчетов и их анализ

В результате численного моделирования было получено распределение температурных полей в грунтовом основании, которые представлены в виде зон промерзшего грунта с температурой ниже расчетных (проектных) значений – минус 0,6 градуса (изотермические поверхности) (рис. 8).

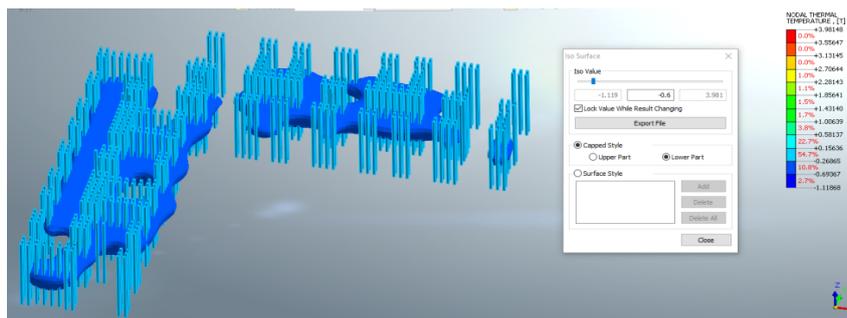
По результатам моделирования первого цикла термостабилизации грунтов (2020–2021 гг.) на конец зимнего периода (апрель 2021 г.) произошло формирование отдельных льдогрунтовых массивов с температурой ниже расчетных значений (–0,6 °С). В областях грунтового массива между отдельными свайными кустами температура грунта находится выше расчетных значений.

На конец летнего периода (октябрь 2021 г.) происходит значительная деградация льдогрунтового массива с сохранением мерзлой прослойки грунта толщиной 2–4,5 м, расположенной на глубине 4,5–5,5 м от дневной поверхности.

Моделирование второго цикла термостабилизации грунтов (2021–2022 г.) показало лучшую динамику снижения температур грунтового основания (рис. 9).



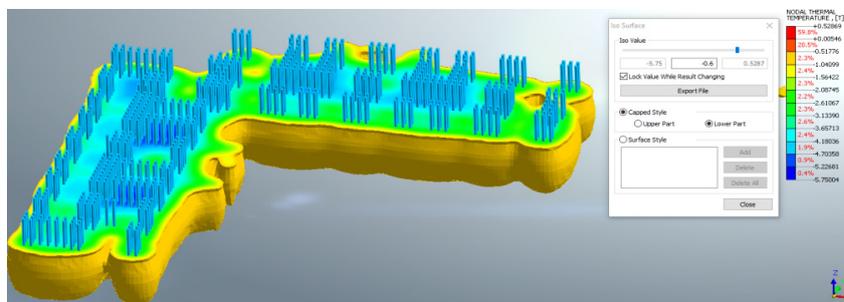
a



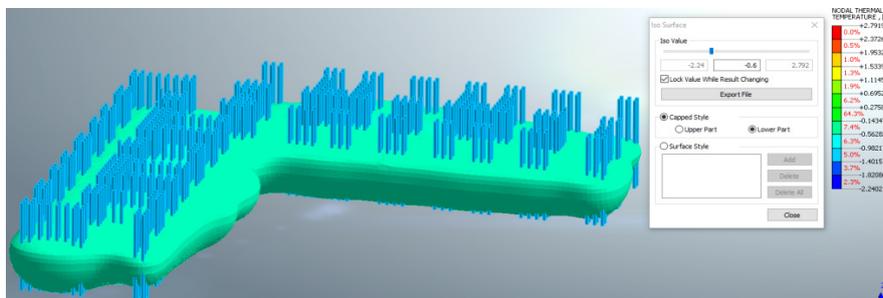
б

Рис. 8. Зоны намораживания льдогрунтового массива (первый цикл промерзания 2020–2021 г.):
a – конец зимнего периода (апрель 2021 г.); *б* – конец летнего периода (октябрь 2021 г.)

Fig. 8. Freezing zones of the ice-soil massif (first freezing cycle 2020–2021): *a* – end of the winter period (April 2021); *б* – end of the summer period (October 2021)



a



б

Рис. 9. Зоны намораживания льдогрунтового массива (второй цикл промерзания 2021–2022 г.):
a – конец зимнего периода (апрель 2022 г.); *б* – конец летнего периода (октябрь 2022 г.)

Fig. 9. Freezing zones of the ice-soil massif (second freezing cycle 2021–2022): *a* – end of the winter period (April 2022); *б* – end of the summer period (October 2022)

На конец второго зимнего периода термостабилизации (апрель 2022 г.) произошло смерзание отдельных льдогрунтовых элементов в единый мерзлый массив с незначительными зонами грунта с температурами выше расчетных значений.

На конец летнего периода (октябрь 2022 г.) происходит повышение температуры льдогрунтового массива по его нижней части (подошве сформированного массива) с температурами грунта на отметке пяты сваи выше расчетных значений.

Следует отметить, что сформированный мерзлый массив при расчете осадок возможно рассматривать как условный фундамент, а грунт, находящийся под ним, как сжимаемую толщу. Учитывая, что грунты под сформированным мерзлым массивом находятся в пластично-мерзлом состоянии, требуется также учитывать реологические свойства мерзлых грунтов.

Моделирование третьего цикла термостабилизации грунтов (2022–2023 гг.) показало на конец третьего зимнего периода (апрель 2023 г.) формирование льдогрунтового массива с расчетными температурами и сохранение расчетных температур на конец летнего периода (октябрь 2023 г.) (рис. 10).

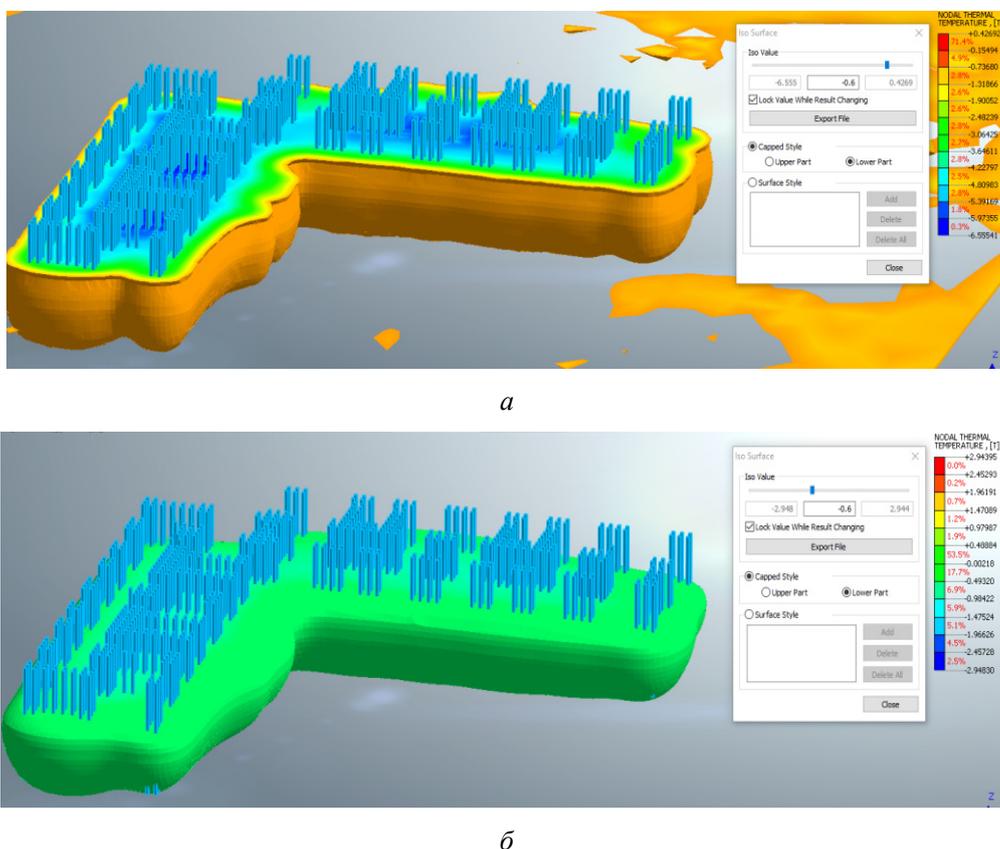


Рис. 10. Зоны намораживания льдогрунтового массива (третий цикл промерзания 2022–2023 гг.):
а – конец зимнего периода (апрель 2023 г.); б – конец летнего периода (октябрь 2023 г.)

Fig. 10. Freezing zones of the ice-soil massif (third freezing cycle 2022–2023):
a – end of the winter period (April 2023); b – end of the summer period (October 2023)

По результатам натурных наблюдений и численного моделирования были построены графики сопоставления фактических температур грунтов и результатов прогнозирования (рис. 11).

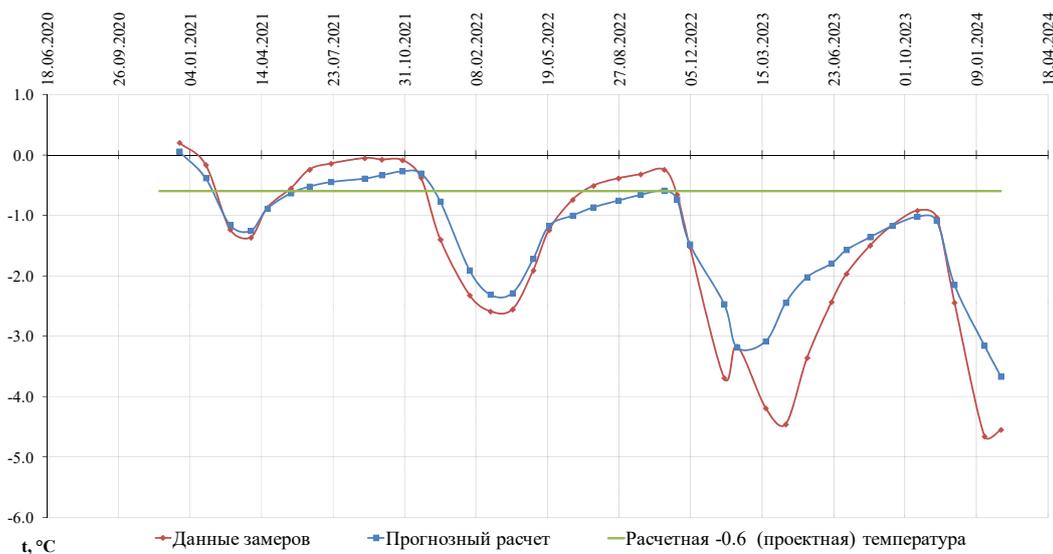


Рис. 11. Сопоставление данных натуральных наблюдений с результатами прогнозирования температурного режима грунтов

Fig. 11. Comparison of field observation data with the results of predicting the temperature regime of soils

Заключение

1. Потепление климата приводит к увеличению зон распространения многолетне-мерзлых грунтов несливающегося типа, а также увеличению мощности талой прослойки.

2. Термостабилизация грунтового основания в условиях повышенных атмосферных температур может занимать достаточно длительный промежуток времени (2–3 г.), в связи с чем возникает необходимость в рассмотрении промежуточных периодов формирования льдогрунтового массива для возможности постепенного возведения зданий и сооружений при температурах, не достигших расчетных значений.

3. Промораживание грунтового основания с «кустовым» расположением термостабилизаторов приводит к образованию в начальный период времени отдельных льдогрунтовых массивов вокруг свайных кустов с дальнейшим их смыканием на последующих циклах промерзания.

4. Сформированный мерзлый массив (как и отдельные мерзлые массивы) при расчете осадок возможно рассматривать как условный фундамент, а грунт, находящийся под ним, как сжимаемую толщу.

5. При промораживании значительных толщ талых грунтов выявлено снижение эффективности работы термостабилизаторов в нижней части испарителя.

Финансирование. Выполнено при поддержке гранта РФФ № 23-29-00118.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. – Geneva: IPCC, 2014. – 151 p.
2. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: press release. – Geneva: IPCC Secretariat, 2019.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. – 1007 с.
4. Long, E.L. Means for Maintaining Permafrost Foundations. Patent USA. No 3 217 791, C1 165-45 / E.L. Long. – 1964.
5. Хрусталеv, Л.Н. Численный метод решения задачи промерзания – оттаивания грунта / Л.Н. Хрусталеv, Л.Н. Черкасова // Известия Сибирского отделения АН СССР, серия технических наук. – 1966. – Т. 6, № 2. – С. 12–24.
6. Горелик, Я.Б. Расчет температурного поля грунта вокруг жидкостной термосваи / Я.Б. Горелик // Проблемы нефти и газа Тюмени: науч.-техн. сб. Зап. СибНИГНИ. – 1980. – Вып. 46. – С. 65–69.
7. Система температурной стабилизации оснований / Г.М. Долгих [и др]. // Наука в СССР. – 1991. – № 2. – С. 118–119.
8. Хрусталеv, Л.Н. Проблемы инженерной геокриологии на рубеже XXI века / Л.Н. Хрусталеv // Криосфера Земли. – 2000. – Т. IV, № 1. – С. 3–10.
9. Kotlyakov, V. Permafrost, Snow and Ice / V. Kotlyakov, T. Khromova // Land Resources of Russia, Digital Media. Eds. V. Stolbovoi, I. McCallum. – International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science, Laxenburg, Austria. – 2002.
10. Yarmak, Jr.E. Recent developments in thermosyphon technology / Jr.E. Yarmak, E.L. Long // Proceedings of the 11th International Conference on Cold Regions Engineering. – 2002. – P. 656–662.
11. Долгих, Г.М. Системы замораживания и температурной стабилизации грунтов в зоне многолетнемерзлых пород, применяемые ООО НПО «Фундаментстройаркос» / Г.М. Долгих, В.Н. Окунев // Материалы IX Науч.-техн. конф. «Моделирование технологий замораживания искусственным холодом». – 2003. – С. 123–129.
12. Аникин, Г.В. Тепломассоперенос в вертикальном парожидкостном термосифоне / Г.В. Аникин, Л.С. Поденко, В.Н. Феклистов // Криосфера земли. – 2009. – Т. XIII, № 3. – С. 54–58.
13. Долгих, Г.М. Строительство на вечномерзлых грунтах: проблемы качества / Г.М. Долгих, С.П. Вельчев // Геотехника. – 2010. – № 6. – С. 23–29.
14. Аникин, Г.В. Компьютерное моделирование тепломассопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов / Г.В. Аникин, С.Н. Плотников, К.А. Спасенникова // Криосфера Земли. – 2011. – Т. 15, № 1. – С. 33–40.
15. Аникин, Г.В. Расчет динамики промерзания грунта под воздействием одиночного термосифона / Г.В. Аникин, Л.С. Поденко, А.А. Вакулин // Криосфера Земли. – 2013. – Т. XVII, № 1. – С. 51–55.
16. Long, E.L. The long thermopile / E.L. Long // Proceedings of the First International Conference on Permafrost. – Purdue University, US National Academy of Sciences. – P. 487–490.

17. Примаков, С.С. О расчете теплообмена при проектировании конденсаторной части сезонно действующего охлаждающего устройства / С.С. Примаков, Д.С. Паздерин // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 4 – С. 124–125.
18. Ибрагимов, Э.В. Оптимизация устройства оснований и фундаментов в криолитозоне (на примере вертикального стального резервуара РВС-20000 м3) / Э.В. Ибрагимов, Я.А. Кроник // Геотехника. – 2018. – № 5–6. – С. 52–61.
19. Ибрагимов, Э.В. Прогноз напряженно-деформированного состояния термостабилизированного основания / Э.В. Ибрагимов, Я.А. Кроник, В.Н. Парамонов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2018. – № 6. – С. 36–40.
20. Кроник, Я.А. Термомеханические расчеты систем «грунтовое сооружение - вечномерзлое основание» с учетом криогенных процессов для прогноза безопасности / Я.А. Кроник // Вестник МГСУ. – 2008. – № 2. – С. 129–133.
21. Кроник, Я.А. Динамика аварийности и безопасности природно-техногенных систем в криолитозоне / Я.А. Кроник // Материалы IV Конференции геокриологов России. – 2011. – Т. 3, ч. 8. – С. 285–292.
22. Кудрявцев, С.А. Численное моделирование при реконструкции и ремонте линейных сооружений на буронабивных свайных фундаментах в сезоннопромерзающих грунтах дальнего востока / С.А. Кудрявцев, И.В. Шестаков, А.А. Петерс // Вестник ТОГУ. Строительство и архитектура. – 2016. – № 20. – С. 65–74.
23. Кудрявцев, С.А. Создание условий нормативного состояния деградирующих многолетнемерзлых оснований зданий и сооружений Дальневосточного Федерального округа и Арктики / С.А. Кудрявцев, И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов // Сборник научных трудов РААСН. – М.: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2022. – С. 157–164.
24. Деформации морозного пучения и оттаивания грунтов при работе и повреждении сезонно-охлаждающих устройств / И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов, М.В. Парамонов, М.Е. Игошин // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – № 12. – С. 23–30.
25. Математическое моделирование температурного режима грунтов оснований фундаментов в условиях многолетнемерзлых пород / С.П. Степанов, А.Н. Цеева, В.И. Васильев, И.К. Сирдитов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2017. – № 1. – С. 142–159.
26. Корнилов, Т.А. Мониторинг состояния многолетнемерзлых грунтов основания малоэтажных зданий с непроветриваемыми подпольями / Т.А. Корнилов, А.Я. Никифоров, М.В. Рабинович // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020. – № 4. – С. 27–32.
27. Никифорова, Н.С. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата / Н.С. Никифорова, А.В. Коннов // *Construction and Geotechnics*. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 14–24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02

References

1. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team. Eds.R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, IPCC, 2014, 151 p.
2. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: press release. Geneva, IPCC Secretariat, 2019.
3. Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation. Moscow, Roshydromet, 2014, 1007 с.

4. Long E.L. Means for Maintaining Permafrost Foundations. Patent USA no. 3 217 791, CI 165-45(1964).
5. Khrustalev L.N., Cherkasova L.N. Numerical method for solving the problem of freezing-thawing of soil. *Izv. of Siberian Branch of A.N. USSR. Technical Sciences*, 1966, vol. 6, no. 2, pp. 12-24.
6. Gorelik Y.B. Calculation of temperature field of the soil around the liquid thermal pile. *Problems of oil and gas Tyumen: Scientific and Technical Collection SibNIGNI*, 1980, iss. 46, pp. 65-69.
7. Dolgikh G.M. [et al.]. System of temperature stabilization of bases. *Science in USSR*, 1991, no. 2, pp. 118-119.
8. Khrustalev L.N. Problems of engineering geocryology at the turn of XXI century. *Earth Cryosphere*, 2000, vol. IV, no. 1, pp. 3-10.
9. Kotlyakov V., Khromova T. Permafrost, Snow and Ice. *Land Resources of Russia, Digital Media*. Eds. V. Stolbovoi, I. McCallum. *International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science*, Laxenburg, Austria, 2002.
10. Yarmak Jr.E., Long E.L. Recent developments in thermosyphon technology. *Proceedings of the 11th International Conference on Cold Regions Engineering*, 2002, pp. 656-662.
11. Dolgikh G.M., Okunev V.N. Systems of freezing and temperature stabilization of soils in the zone of permafrost used by NPO "Fondamentstroyarkos". *Proceedings of IX Scientific and Technical Conference "Modeling of Technology of Freezing by Artificial Cold"*, 2003, pp. 123-129.
12. Anikin G.V., Podenko L.S., Feklistov V.N. Heat and mass transfer in the vertical steam-liquid thermosyphon. *Earth Cryosphere*, 2009, vol. XIII, no. 3, pp. 54-58.
13. Dolgikh G.M., Velchev S.P. Construction on permafrost soils: quality issues. *Geotekhnika*, 2010, no. 6, pp. 23-29.
14. Anikin G.V., Plotnikov S.N., Spasennikova K.A. Computer modeling of heat and mass transfer in horizontal soil cooling systems. *Earth Cryosphere*, 2011, vol. 15, no. 1, pp. 33-40.
15. Anikin G.V., Podenko L.S., Vakulin A.A. Calculation of soil freezing dynamics under influence of single thermosyphon. *Earth Cryosphere*, 2013, vol. XVII, no. 1, pp. 51-55.
16. Long, E.L. The long thermopile. *Proceedings of the First International Conference on Permafrost*. Purdue University, US National Academy of Sciences, pp. 487- 490.
17. Primakov S.S., Pazderin D.S. On the calculation of heat exchange when designing the condenser part of a seasonally operating cooling unit. *Oil Industry*, 2013, no. 4, pp. 124-125.
18. Ibragimov E.V., Kronik J.A. Optimization of bases and foundations in cryolithozone (by the example of a vertical steel tank RVS-20000 m³). *Geotechnika*, 2018, no. 5-6, pp. 52-61.
19. Ibragimov E.V., Kronik J.A., Paramonov V.N. Prediction of the stress-strain state of a thermostabilized foundation. *Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2018, no. 6, pp. 36-40.
20. Kronik Y.A. Thermomechanical calculations of systems "soil structure – permafrost base" taking into account cryogenic processes for safety prognosis. *MSCU Bulletin*, 2008, no. 2, pp. 129-133.
21. Kronik Y.A. Dynamics of accident rate and safety of natural-technogenic systems in cryolithozone. *Proceedings of IV Conference of Russian Geocryologists*, 2011, vol. 3, part. 8, pp. 285-292.
22. Kudryavtsev S.A., Shestakov I.V., Peters A.A. Numerical modeling for reconstruction and repair of linear structures on bored pile foundations in seasonally freezing soils of the Far. *Vestnik of TOGU. Construction and Architecture*, 2016, no. 20, pp. 65-74.

23. Kudryavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N. Creating conditions for the normative state of the degraded permafrost foundations of buildings and structures in the Far Eastern Federal District and the Arctic. *Collection of scientific papers of the Russian Academy of Sciences*, 2022, pp. 157-164.

24. Sakharov I.I., Paramonov V.N., Paramonov M.V., Igoshin M.E. Deformations of frost swelling and thawing of soils during operation and damage of seasonal cooling devices. *Industrial and Civil Engineering*, 2017, no. 12, pp. 23-30.

25. Stepanov S.P., Tseeva A.N., Vasiliev V.I., Sirditov I.K. Mathematical modeling of the temperature regime of foundations grounds in conditions of permafrost. *Bulletin of N.E. Bauman Moscow State Technical University*, 2017, no. 1, pp. 142-159.

26. Kornilov T.A., Nikiforov A.Y., Rabinovich M.V. Monitoring of permafrost soils of low-rise buildings with unventilated cellars. *Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2020, no. 4, pp.27-32.

27. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Bearing capacity of piles in permafrost soils under climate change. *Construction and Geotechnics*. 2021. vol. 12, iss. 3, pp. 14-24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02.