

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 4. (121). С. 21-36.

Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 4. (121). P. 21-36.

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 551.34, 536.5, 519.688

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.002

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ДЛЯ ОСНОВАНИЙ ДВУХ ЗДАНИЙ В Г. САЛЕХАРДЕ С УЧЁТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ

*Александр Николаевич Шеин¹, Михаил Юрьевич
Филимонов², Наталия Анатольевна Ваганова³, Ярослав
Константинович Леопольд⁴*

¹Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

^{2, 3}Институт математики и механики Уральского отделения РАН,
г. Екатеринбург

^{2, 3}Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

¹A.N.Shein@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>

²fny@imm.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9561-5416>

³vna@imm.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6966-9050>

⁴KamnevYK@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2993-0979>

Аннотация. Проведены расчёты нестационарных тепловых полей в мёрзлых грунтах оснований фундаментов двух зданий в г. Салехарде. Моделирование проводилось с учетом особенностей конструкций свайных фундаментов, эксплуатируемых по принципу сохранения мерзлого состояния грунта. Показана необходимость учёта всего цикла работы сезонных охлаждающих устройств при расчётах для теплотехнических расчётов. Проведенные расчеты несущих способностей свай для зданий I и II показали, что для здания I наблюдается увеличение несущих способностей свай, для здания II ситуация в зоне свайного фундамента стабильная. Рекомендуется проводить

дальнейший мониторинг и анализ изменения динамики несущих способностей свай для зданий I и II.

Ключевые слова: свайный фундамент, мерзлота, температурный мониторинг, несущая способность.

Цитирование: Шеин А.Н., Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А., Леопольд Я.К. Теплотехнические расчёты для оснований двух зданий в г. Салехарде с учётом температурного мониторинга мёрзлых грунтов // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 21–36. Doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.002.

Original article

THERMAL ENGINEERING CALCULATIONS FOR THE FOUNDATIONS OF TWO BUILDINGS IN SALEKHARD, TAKING INTO ACCOUNT THE TEMPERATURE MONITORING OF PERMAFROST

*Alexandr N. Shein*¹, *Mikhail. Yu. Filimonov*²,
*Nataliia. A. Vaganova*³, *Yaroslav K. Leopold*⁴

¹Arctic Research Center, Salekhard, Russia

^{2,3}Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ekaterinburg, Russia

^{2,3}Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

¹A.N.Shein@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>

²fmy@imm.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9561-5416>

³vna@imm.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6966-9050>

⁴KamnevYK@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2993-0979>

Abstract. Calculations of non-stationary thermal fields in frozen soils of the foundations of two buildings in Salekhard were carried out. The modeling was carried out taking into account the features of pile foundation structures operated on the principle of preserving the frozen state of the soil. The necessity of taking into account the entire cycle of operation of seasonal cooling devices in calculations for thermal engineering calculations is shown. The calculations of the bearing capacity of piles for buildings I and II showed that for building I there is an increase in the bearing capacity of piles, for building II the situation in the pile foundation area is stable. It is recommended to carry out further monitoring and analysis of changes in the dynamics of the bearing capacity of piles for buildings I and II.

Keywords: piling foundations; permafrost; temperature monitoring; modeling; bearing capacity.

Citacion: A.N. Shein, M.Yu. Filimonov, N.A. Vaganova, Ya.K. Leopold Thermal engineering calculations for the foundations of two buildings in Salekhard, taking into account the temperature monitoring of permafrost // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (121). № 4. P. 21–36. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.002.

Введение

Больше четверти верхнего слоя земной коры Северного полушария находится в мёрзлом состоянии. Многолетнемёрзлые грунты в России занимают 60–65% территории или 11 млн км² [1, 2]. Большинство жилых зданий и промышленных сооружений в зоне вечной мерзлоты возводятся по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований. Однако при строительстве объектов и дальнейшей эксплуатации используются устаревшие нормы и правила [3–5]. Кроме того, эксплуатационные нормы носят рекомендательный характер и зачастую не выполняются эксплуатирующими организациями. С учётом того, что российская Арктика развивается быстрыми темпами и играет для страны стратегическое значение, необходима актуализация правил строительства и эксплуатации капитальных объектов на северных территориях, разработка новых автоматизированных систем геотехнического мониторинга. В первую очередь это касается температуры – важнейшего параметра, характеризующего состояние мерзлоты. Контроль за ней необходим для подтверждения требуемой несущей способности грунтов основания и предотвращения опасных для устойчивости сооружений мерзлотных геокриологических процессов.

Материалы и методы

Для безопасной эксплуатации зданий и сооружений в зоне многолетних мерзлых грунтов в ЯНАО с 2018 г. разрабатывается система автоматизированного температурного мониторинга [6–8]: термометрическое оборудование, портал сбора и визуализации данных и программа для расчёта нестационарных тепловых полей. Под объектами капитального строительства в г. Салехарде уже пробурено и оборудовано термометрическими косами больше 150 скважин. Скважины пробурены до глубины 12 м с отбором образцов пород для анализов и геологическим описанием, что позволило с некоторым приближением восстановить теплофизические характеристики грунта и построить трёхмерные физико-геологические модели оснований исследуемых объектов, которые необходимы для даль-

нейших расчётов температурных полей. Скважины оснащены термометрическим оборудованием (шаг термодатчиков 0,5 м до глубины 5 м, далее 1 м). Погрешность калибровки датчиков измерения температуры: ± 0.1 °С. Разрешающая способность измерения температуры: 0.07 °С.

Настроенное оборудование каждые 3 часа регистрирует и каждые 12 часов передаёт температуру грунтов основания здания в единую базу на удалённый сервер при помощи GSM и NB-IoT. Данные дублируются на специально разработанный портал <https://monitoring.arctic.yanao.ru> [9] для сбора и визуализации данных. Для специалистов и всех заинтересованных лиц предусмотрен полный доступ к ресурсу, где на базе отображаются объекты мониторинга с информацией по расположению скважин, возможностью отображения в виде графиков и экспорта полученных данных. Такие уникальные данные можно использовать для численного моделирования и прогнозирования температуры грунта во всей области расположения свайного фундамента.

Для моделирования тепловых полей в мерзлых грунтах в основании свайных фундаментов зданий в северных городах, следует учитывать различные климатические и физические факторы. В первую очередь – это сезонное изменение температуры воздуха, приводящее к периодическому протаиванию (промерзанию) грунта, снежный покров, учет солнечного излучения в случае необходимости и т.п. Также следует учитывать геометрические места расположения свай, их размеры, наличие сезоннодействующих охлаждающих устройств (COU), возможные источники тепла, коммунальные аварии.

На основе известных алгоритмов и моделей [10-12] реализована программа для расчета нестационарных тепловых полей под зданиями со свайными фундаментами в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов [7, 8, 13, 14]. Численный алгоритм, реализованный в программе, учитывает данные мониторинга температуры грунта, технические особенности конкретного свайного фундамента и позволяет спрогнозировать изменения температуры грунтов при различных сценариях изменения климата. Данные, получаемые при температурном мониторинге, были использованы для верификации разработанной программы [14] и дальнейших теплотехнических расчётов для оснований двух зданий в г. Салехарде.

Под жилым зданием I для методических работ было пробурено и оборудовано 24 скважины по плотной равномерной сети, под зданием II – 16 (рис. 1, 2).

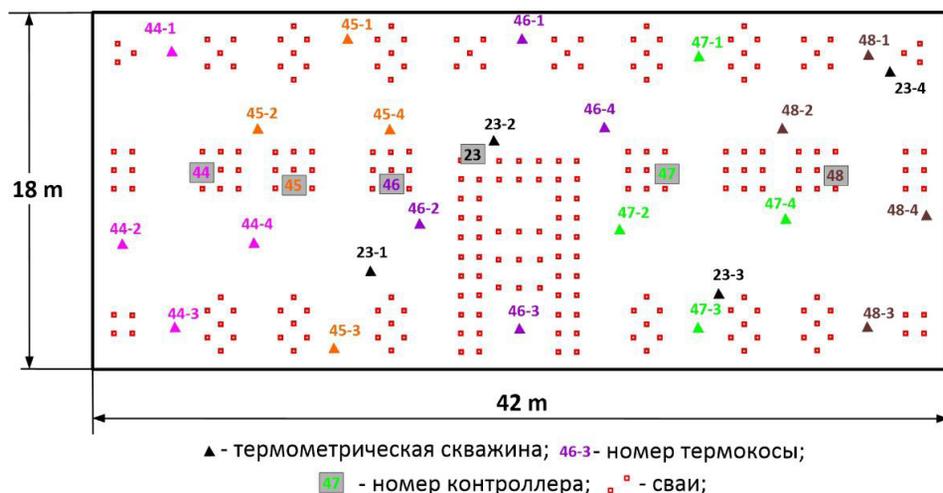


Рис. 1. Расположение свай и термометрических скважин для здания I

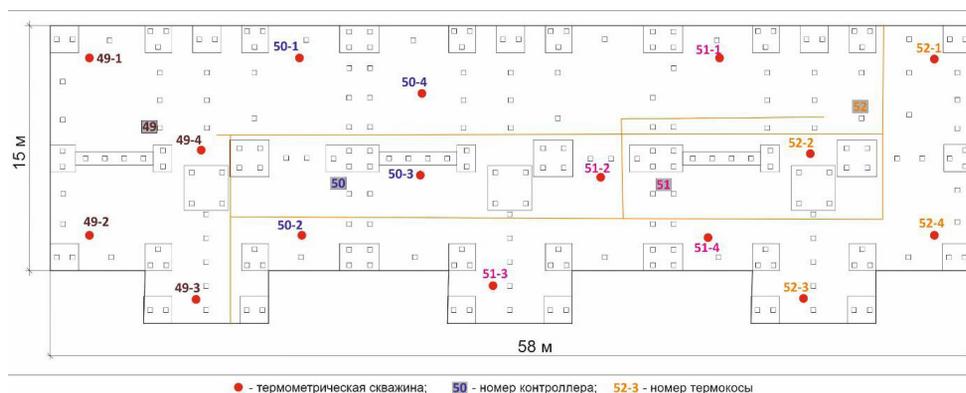


Рис. 2. Расположение свай и термометрических скважин для здания II

Численный алгоритм, реализованный в программе [7, 8, 13, 14], позволяет учитывать данные мониторинга температуры грунта в скважинах, литологические и технические особенности конкретного свайного фундамента. В плоскости $\{x,y\}$ или вид сверху схема расположения свайного фундамента и термометрических скважин представлена на рис. 1 и 2 для зданий I и II соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение

Плотная сеть термометрических скважин позволила провести тестирование и верификацию программы. Кроме того, установлено [8], что

при проведении расчетов температурных полей необходимо использовать среднесуточную температуру воздуха на основании данных температурного мониторинга и учитывать всю историю эксплуатации свайного фундамента, в первую очередь работу СОУ. При перечисленных условиях результаты численных расчетов с хорошей точностью совпадают с экспериментальными данными (рис. 3).

Сравнение температурных данных с расчетными показали, что автоматизированный температурный мониторинг (АТМ) является необходимым звеном для проведения теплофизических расчетов и позволяет адаптировать предложенный алгоритм для расчета изменения динамики температурного режима в области свайного фундамента для конкретного жилого здания. Так здание II имеет принципиально другие конструкции СОУ. В 2021 г. наблюдался ряд коммунальных аварий, которые повлияли на температурный режим основания, что потребовало внесения особенностей в алгоритм проведения расчетов. В частности, предложено учитывать дополнительно данные температурных датчиков на поверхности грунта для адекватного учета температурного режима проветриваемого подполья и задавать эффективность работы СОУ в соответствии с данными АТМ.

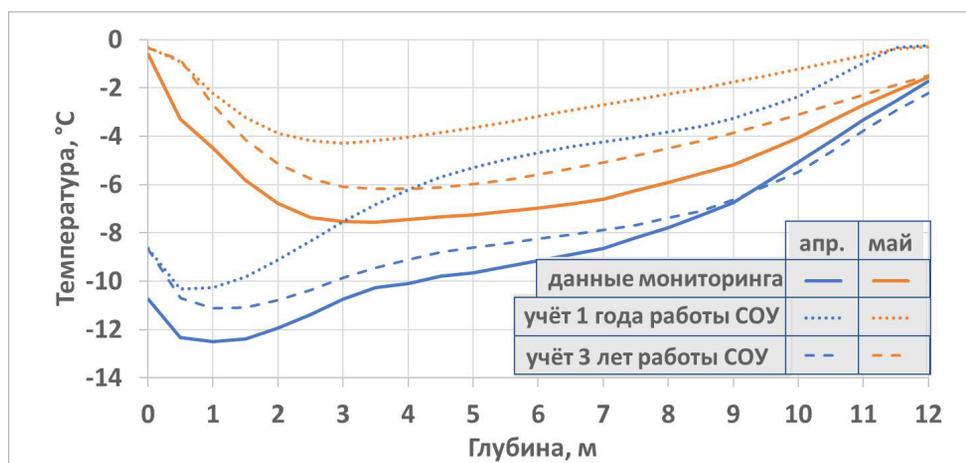


Рис. 3. Профили температуры в скважине здания I в апреле-мае 2021 года. Экспериментальные данные (сплошные линии); численный расчет с учётом 1 года (точечные линии) и 3 лет (пунктирные линии) эксплуатации СОУ

Расчёты температурных полей показали хорошее совпадение с экспериментальными данными, что позволяет нам перейти к оценке несущей способности свайного фундамента. Расчет надежности свайного фундамента проводится на основании действующего в настоящее время свода правил [3], который разработан в целях соблюдения требований Феде-

рального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Настоящий свод правил распространяется на проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на территории распространения многолетнемерзлых грунтов.

Определим изменение несущей способности свайного фундамента под зданием I в 2023 году в зависимости от изменения температуры воздуха в проветриваемом подполье (ПП) при различных сценариях изменения температуры воздуха T_{air} в ПП, который фиксирует датчик температуры воздуха на контроллере № 44 (рис. 1). На рис. 4 приведены эти показания (рис. 4, синяя кривая) в сравнении с изменениями температуры поверхности грунта, который фиксирует первый датчик в скважине 44-4 (рис. 4, оранжевая кривая) с 27.11.2020 г. по 18.11.2022 г.

Найдем средние значения температур воздуха в ПП возле контроллера № 44 $T_{air}[t_1, t_2]$ и поверхности грунта в скважине $T_{44-4}[t_1, t_2]$ здания I для двух годовых циклов с 04.12.2020 г. по 18.11.2021 г. и с 04.12.2021 г. по 18.11.2022 г.:

$T_{air}[04.12.2020, 18.11.2021] = -3,459004;$	$T_{air}[04.12.2021, 18.11.2022] = -3,542539$
$T_{44-4}[04.12.2020, 18.11.2021] = -1,367759;$	$T_{44-4}[04.12.2021, 18.11.2022] = -1,789868$

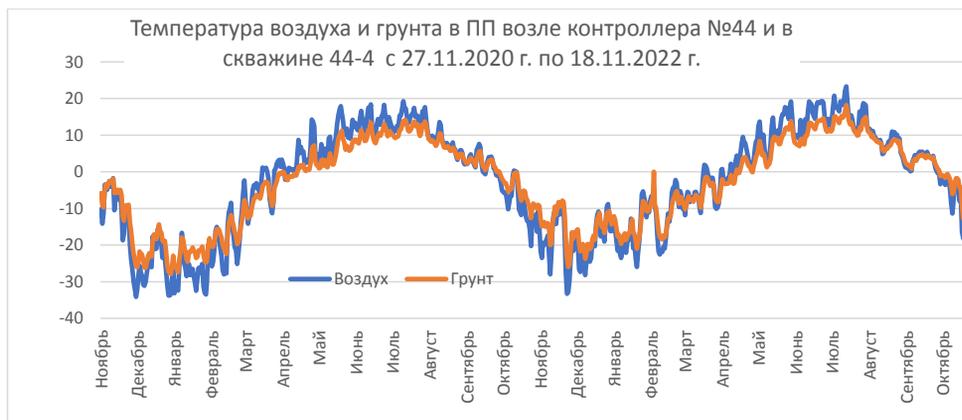


Рис. 4. Температура воздуха (синий цвет) в ПП и поверхности грунта в скважине 44-4 здания I

Средние температуры воздуха в ПП практически одинаковы, однако в 2021 году в холодное время года температура в ПП была в среднем ниже (рис. 5, синяя кривая), чем в 2022 году (рис. 5, оранжевая кривая). Действительно,

$T_{air}[17.01.2021, 01.04.2021] = -22,672642;$	$T_{air}[17.01.2022, 01.04.2022] = -13,681283.$
---	---

Таким образом, средняя температура воздуха в ПП вблизи контроллера № 44 в указанный период времени в 2021 году была ниже средней температуры в этот же промежуток времени в 2022 году почти на 9 °С. Такие климатические колебания могли сказаться на эффективности работы СОУ.



Рис. 5. Температура воздуха в ПП здания I в 2021 г. (синяя линия) и в 2022 г. (оранжевая линия)

Используя данные температурного мониторинга, было рассчитано температурное поле в основании фундамента, в том числе температуры на поверхности каждой сваи, и затем пересчитаны в несущую способность. Для удобства вводятся понятия минимальная несущая способность (берется максимальная температура на 4 поверхностях свай) и максимальная несущая способность (берется минимальная температура на 4 поверхностях свай). Для оценки несущих способностей свай можно пользоваться только минимальной несущей способностью свай. Более детальные расчеты несущей способности свай возможны в случае, когда минимальная несущая способность свай становятся близкой к критическим проектным значениям. На рис. 6 приводятся расчетные значения несущих способностей каждой из свай с ноября 2021 г. по октябрь 2022 года для здания I.

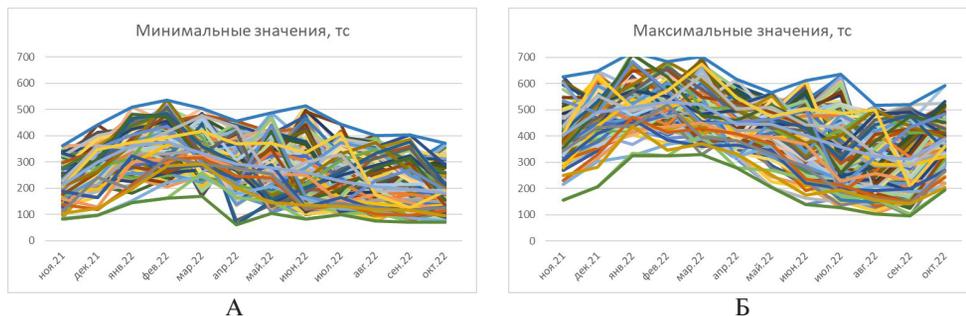


Рис. 6. Максимальное (А) и минимальное (Б) значения несущей способности свай здания I

На рис. 7 показана динамика изменения несущей способности свай в 2023 году при различных сценариях изменения температуры воздуха в ПП здания I с использованием данных 2021-го и 2022 годов.

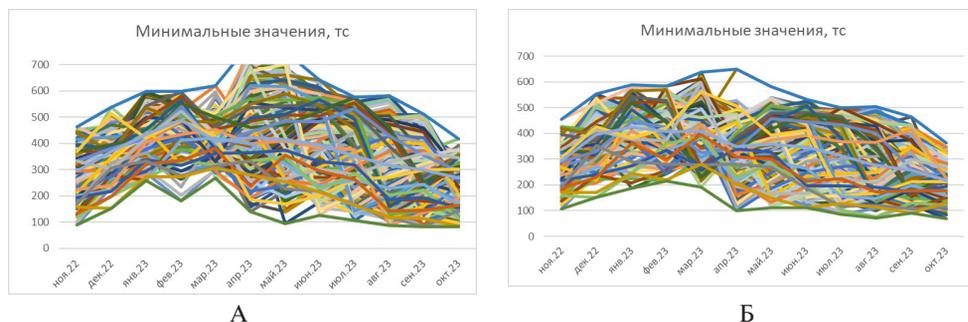


Рис. 7. Прогноз несущих способностей свай здания I в 2023 году по сценарию 2021 года (А) и 2022 года (Б)

В случае варианта 7А минимальное значение несущей способности достигается в октябре 2023 года на 237 свае и равняется $F_{u,237,10} = 82,19524$ Тс. В случае варианта 7Б минимальное значение несущей способности достигается в ноябре 2023 года на 115 свае и равняется $F_{u,115,11} = 69,58693$ Тс. При этом минимальное среднее значение несущей способности всех свай при этом варианте достигается в ноябре и равняется $F_{u,11} = 218,0867$ Тс. В случае варианта 7А минимальное среднее значение несущей способности всех свай достигается также в ноябре и равняется $F_{u,11} = 269,3661$ Тс.

Таким образом показано, что климатический фактор оказывает существенное влияние на несущую способность свай. При этом холодный зимний период (даже при примерном равенстве средних годовых температур воздуха в ПП при рассматриваемых сценариях задания климатических данных) становится решающим для значительного различия минимальных (до 18%) и средних значений несущих способностей по всем сваям здания I (до 24%). Такое различие может быть объяснено за счет эффективной работы СОУ.

На значения несущих способностей свай для здания II окажут влияние коммунальные аварии зимой 2021 года, которые привели к образованию наледи, поэтому тепловой режим в ПП будет зависеть от объема льда и от скорости его таяния, которое продолжалось практически до конца июля 2021 года. На рис. 8 представлены изменения температур воздуха и поверхности грунта вблизи контроллера № 52 и в скважине 52-4 соответственно.

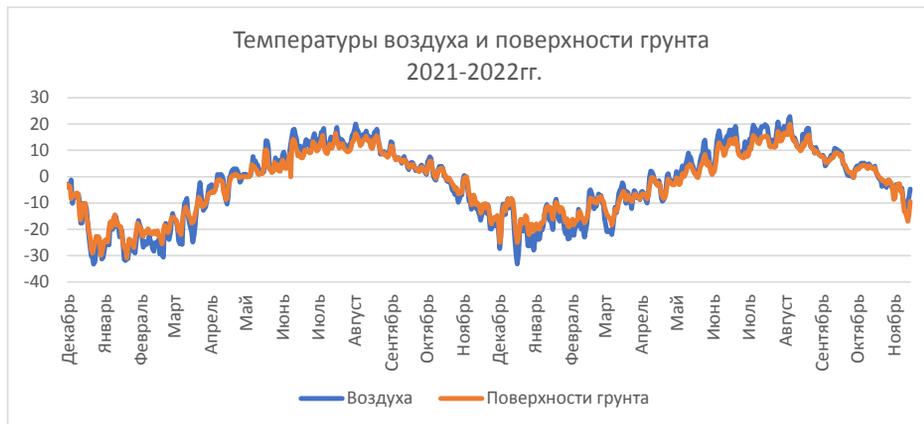


Рис. 8. Температура воздуха в ПП и температура поверхности грунта в 2021-2022 гг.

Найдем средние значения температур воздуха в ПП $T_{air}[t_1, t_2]$ и поверхности грунта $T_{52-4}[t_1, t_2]$ здания II на промежутках времени с 04.12.2020 по 18.11.2021 и с 04.12.2021 по 18.11.2022.

$T_{air}[04.12.2020, 18.11.2021] = -1,17155;$	$T_{air}[04.12.2021, 18.11.2022] = -3,1391;$
$T_{52-4}[04.12.2020, 18.11.2021] = -1,51042$	$T_{52-4}[04.12.2021, 18.11.2022] = -3,15899$

Таким образом, $T_{air}[04.12.2020, 18.11.2021]$ существенно выше, чем $T_{air}[04.12.2021, 18.11.2022]$. Заметим, что в холодное время года температура в ПП зимой 2021 года была в среднем ниже, чем в 2022 году, что могло сказаться на эффективности работы СОУ в случае, если они находятся в рабочем состоянии. Действительно, имеем

$T_{air}[17.01.2021, 01.04.2021] = -22,0161$	$T_{air}[17.01.2022, 01.04.2022] = -13,5434.$
--	---

Оказывается, что эти значения в холодное время практически совпадают с аналогичными данными здания I за исключением средней температуры $T_{air}[04.12.2020, 18.11.2021] = -1,17155$.

На рис. 9 представлены изменения температур воздуха в ПП и температура поверхности грунта в скважине 50-4, находящейся в центре образования ледяного слоя. Хорошо видно нулевое значение температуры на первом датчике в скважине 50-4 (рис. 9, оранжевая кривая). Начало околонулевых значений сигнализирует об образовании наледи, а переход в положительную зону — исчезновение.

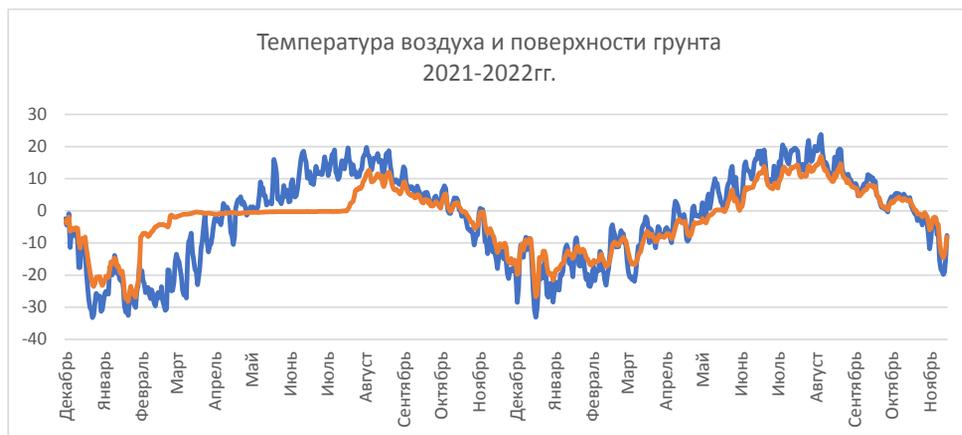


Рис. 9. Температура воздуха в ПП и температура поверхности грунта в скважине 50-4 в здании II

На рис. 10 приведено изменение несущих способностей свай в 2021-м и 2022 годах. Длина столбиков дублирует цвет и обозначает величину несущей способности каждой сваи: чем выше столбик, тем больше несущая способность.

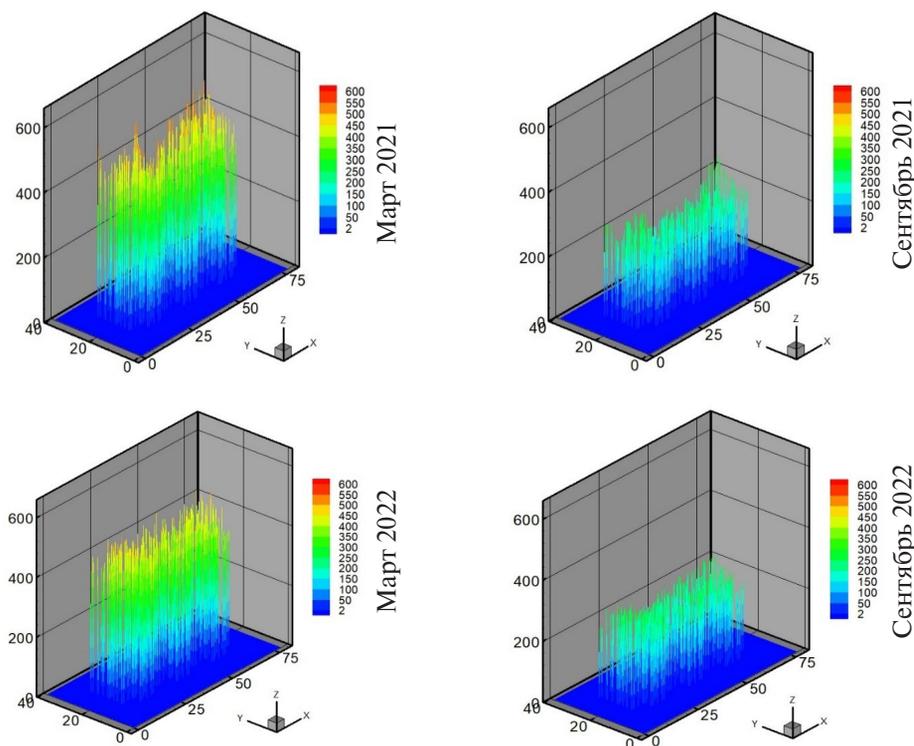


Рис. 10. Изменение несущих способностей свай [Тс] здания II

Сделаем прогноз несущих способностей свай на 2023 год в зависимости от двух климатических сценариев: 2021-го и 2022 годов. На рис. 11 приведены прогнозы несущих способностей свай на 2023 год. В случае варианта 11Б (сценарий 2022 года) минимальное значение несущей способности достигается в октябре 2023 года на 88 свае и равняется $F_{u,88,10} = 150,063$ Тс. В случае варианта 11А (сценарий 2021 года) минимальное значение несущей способности достигается в октябре 2023 года на 211 свае и равняется $F_{u,211,10} = 140,682$ Тс. При этом минимальное среднее значение несущей способности всех свай при этом варианте достигается в ноябре и равняется $F_{u,11} = 228,8494$ Тс. В случае варианта 11Б минимальное среднее значение несущей способности всех свай достигается в октябре и равняется $F_{u,10} = 215,525$ Тс.

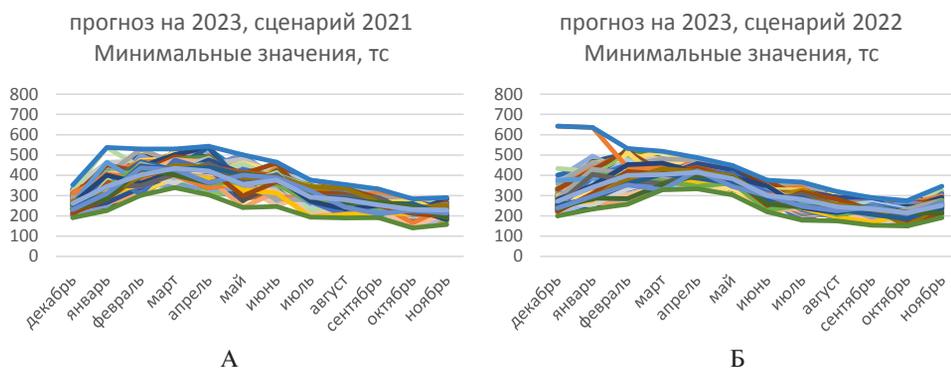


Рис. 11. Несущая способность свай здания II в 2023 году по сценарию 2021 года (А) и 2022 года (Б)

Таким образом, анализ изменения несущих способностей свай в 2023 году при различных климатических данных, соответствующих данным температурного мониторинга 2021-го и 2022 годов, показал незначительное отличие (до 5%) в октябре-ноябре 2023 года минимальных несущих способностей свай и средних значений несущей способности по всем сваям.

Заключение

Протестирована с использованием экспериментальных данных программа для расчёта распространения нестационарных тепловых полей в мёрзлых грунтах с учетом особенностей конструкций свайных фундаментов северных городов, эксплуатируемых по принципу сохранения мерзлого состояния грунта.

Установлено, что при проведении расчетов температурных полей необходимо использовать среднесуточную температуру воздуха на основа-

нии данных температурного мониторинга и учитывать всю историю эксплуатации свайного фундамента, в первую очередь работу СОУ.

Показано, что АТМ является необходимым звеном для проведения теплофизических расчетов и позволяет адаптировать предложенный алгоритм для расчета изменения динамики температурного режима в области свайного фундамента для конкретного жилого здания.

Проведенные расчеты несущих способностей свай для зданий I и II показали, что для здания I наблюдается увеличение несущих способностей свай, для здания II ситуация в зоне свайного фундамента стабильная, последствия коммунальных аварий зимой 2021 года в 2022 году практически не ощущаются. Рекомендуется проводить дальнейший мониторинг и анализ изменения динамики несущих способностей свай для зданий I и II.

Разработанное программное обеспечение позволяет оценить изменения температуры грунтов при различных сценариях изменения климата, что позволит предупредить возможные аварийные ситуации.

Благодарность

Авторы благодарят Куракова С.А. за разработку, совершенствование и обслуживание термометрического оборудования.

Работа выполнена в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального НОЦ «Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мерзлых грунтов под объектами капитального строительства».

Список источников

1. Brown J., Ferrians Jr, O.J., Heginbottom J.A. and Melnikov E.S. (1997). Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions (p. 45). Reston, VA: US Geological Survey.
2. Brown J., Ferrians, Heginbottom J.A. and Melnikov E. (2002). Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. [online]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, DOI: 10.7265/skbg-kf16. (Accessed 20 Apr. 2023).
3. СП 25.13330.2020. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. СНиП 2.02.04-88 (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 30.12.2020 № 915/пр) (ред. от 31.05.2022).
4. Постановление Госстроя РФ от 27.09.2003 № 170 (с изм. от 22.06.2022) «Об утверждении Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда» (зарегистрировано в Минюсте РФ 15.10.2003 № 5176) [Электронный ресурс] / КонсультантПлюс: <http://www.consultant.ru>.

- ru/ URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_44772/ (дата обращения: 03.11.2023).
5. Шейн А.Н. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетнемёрзлых пород в естественных и антропогенных условиях / А.Н. Шейн, Я.К. Камнев // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2020. – № 3 (108). – С. 42–50. DOI: 10.26110/ARCTIC.2020.108.3.007
 6. Громадский А.Н. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномёрзлых грунтов под зданиями г. Салехарда / А.Н. Громадский, С.В. Арефьев, Н.Г. Волков, Я.К. Камнев, А.И. Синицкий // Научный вестник ЯНАО. – 2019. – № 3. – С. 17–21. DOI: 10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003
 7. Kamnev Y.K., Filimonov M.Y., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated Monitoring The Temperature Under Buildings With Pile Foundations In Salekhard (Preliminary Results). GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. 0; <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-021>
 8. Filimonov, M.Y.; Kamnev, Y.K.; Shein, A.N.; Vaganova, N.A. Modeling the Temperature Field in Frozen Soil under Buildings in the City of Salekhard Taking into Account Temperature Monitoring // Land 2022, 11(7), 1102. <https://doi.org/10.3390/land11071102>
 9. System of automated geocryological monitoring (2021) [online] Available at: <https://monitoring.arctic.yanao.ru/> (Accessed 20 Apr. 2021 in Russian)
 10. Samarsky, A.A.; Vabishchevich P.N. Computational Heat Transfer, Volume 2, The Finite Difference Methodology; New York: Chichester, Wiley, 1995
 11. Vaganova, N.A.; Filimonov, M.Yu. Simulation of Cooling Devices and Effect for Thermal Stabilization of Soil in a Cryolithozone with Anthropogenic Impact. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 2019, 11386, 580–587. DOI: 10.1007/978-3-030-11539-5_68
 12. Vaganova, N.; Filimonov, M. Simulation of freezing and thawing of soil in Arctic regions. IOP Conf. Ser.: Earth Environ 2017, 72, 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012005
 13. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю., Камнев Я.К., Шейн А.Н. Расчет нестационарных температурных полей в зоне свайного фундамента зданий с учетом температурного мониторинга // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова. – Салехард: 2021. – 75–77 с.
 14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660946. – М.: Роспатент, 10.06.2022. URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2022660946&TypeFile=html (дата обращения: 15.03.2023).

Сведения об авторах

Шеин Александр Николаевич, 1981 г.р., окончил механико-математический факультет НГУ, в 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию. ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (Салехард, Россия), ведущий научный сотрудник сектора криосферы, к.ф.-м.н. Сфера научных интересов: численное моделирование электромагнитных и температурных полей, криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация, процессы вызванной поляризации.

Филимонов Михаил Юрьевич, 1958 г.р., окончил математико-механический факультет УрГУ, в 1987 г. защитил кандидатскую, в 2007-м защитил докторскую диссертацию. ИММ УрО РАН, ведущий научный сотрудник отдела прикладных задач, заведующий кафедрой высокопроизводительных компьютерных технологий ИЕНиМ УрФУ (Екатеринбург, Россия), д.ф.-м.н. Сфера научных интересов: моделирование технических и природных систем, обустройство нефтегазовых месторождений, численные и аналитические методы, криолитозона, свайные фундаменты, геотермальная энергия.

Ваганова Наталия Анатольевна, 1973 г.р., окончила математико-механический факультет УрГУ, в 2007 г. защитила кандидатскую диссертацию. ИММ УрО РАН, старший научный сотрудник отдела прикладных задач (Екатеринбург, Россия), к.ф.-м.н. Сфера научных интересов: компьютерное моделирование, обустройство нефтегазовых месторождений, вычислительные высокопроизводительные и информационные технологии, криолитозона, свайный фундамент, несущая способность грунта, геотермальная энергия.

Леопольд Ярослав Константинович, 1987 г.р., окончил физический факультет НГУ, в 2016 г. защитил кандидатскую диссертацию, к.ф.-м.н. Сфера научных интересов: криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация, Big Data. E-mail: KamnevYK@gmail.com.

Участие авторов

Шеин А.Н. – сбор, подготовка и интерпретация экспериментальных данных, написание и редактирование текста;

Филимонов М.Ю. – концепция исследования, проведение расчётов, анализ результатов, написание и редактирование текста;

Ваганова Н.А. – концепция исследования, проведение расчётов, анализ результатов, написание и редактирование текста;

Леопольд Я.К. – концепция исследования, редактирование текста.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023 г., принята к публикации 07.12.2023 г.

The article was submitted on November 13, 2023, accepted for publication on December 7, 2023.