

Academia. Архитектура и строительство, № 4, стр. 134–140.
Academia. Architecture and Construction, no. 4, pp. 134–140.

Исследования и теория
Научная статья
УДК 624.131
DOI: 10.22337/2077-9038-2024-4-134-140

О расчетах свайных фундаментов в криолитозоне при использовании термостабилизаторов

Сахаров Игорь Игоревич (Санкт-Петербург). Доктор технических наук, профессор. Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева (Россия, 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21. ВНИИГ им. Веденеева). Эл. почта: i.sakharov2014@yandex.ru

Кудрявцев Сергей Анатольевич (Хабаровск). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН. Кафедра «Мосты, тоннели и подземные сооружения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС). (Россия, 680021, Хабаровск, ул. Серышева, д.47. ДВГУПС). Эл. почта: olgakudr56@mail.ru

Парамонов Владимир Николаевич (Санкт-Петербург). Доктор технических наук, профессор. Кафедра «Основания и фундаменты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (СГУПС). (Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. ПГУПС). Эл. почта: parvn@georec.spb.ru

Аннотация. Рассматриваются особенности расчёта свайных фундаментов на пластичномёрзлых грунтах в случае применения термостабилизаторов. Показаны результаты численного решения задач изменения температуры и напряжённо-деформированного состояния массива грунта в условиях промерзания. Результаты расчёта температурных полей позволят корректнее оценивать несущую способность свай и осадок фундамента.

Ключевые слова: криолитозона, свайный фундамент, пластичномёрзлые грунты, термостабилизатор, температурные и деформационные расчеты

Финансирование. Исследование выполнено за счёт средств Государственной программы фундаментальных научных исследований Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) в рамках Плана фундаментальных научных исследований РААСН и Минстроя России на 2021–2023 годы, тема № 3.1.3.1. «Обеспечение работоспособности оснований и фундаментов зданий и сооружений в криолитозоне в условиях изменения климата».

Для цитирования. Сахаров И.И., Кудрявцев С.А., Парамонов В.Н. О расчетах свайных фундаментов в криолитозоне при использовании термостабилизаторов//Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 4. – С. 134–140. – DOI: 10.22337/2077-9038-2024-4-134-140.

On Calculations of Pile Foundations in the Cryolithozone Using Thermostabilizers

Sakharov Igor I. (St. Petersburg). Doctor of Sciences in Technology, Professor. All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneyev (21, Gzhatskaya str., 195220, Russia, St. Petersburg. VNIIG named after Vedeneyeva). E-Mail: i.sakharov2014@yandex.ru

Kudryavtsev Sergey A. (Khabarovsk). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Corresponding Member of RAACS. The Department of Bridges, Tunnels and Underground Structures of the Far Eastern State Transport University (47 Seryshev str., Khabarovsk, 680021, Russia. FESTU). E-mail: olgakudr56@mail.ru

Paramonov Vladimir N. (St. Petersburg). Doctor of Sciences in Technology, Professor. The Department of Foundations and Foundations of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia. PGUPS). E-mail: parvn@georec.spb.ru

Abstract. The features of the calculation of pile foundations on plastically frozen soils in the case of thermal stabilizers are considered. The results of numerical solution of the problems of temperature change and stress-strain state of the soil mass under freezing conditions are shown. The results of the calculation of temperature fields will allow for a more correct assessment of the bearing capacity of piles and the foundation sediment.

Keywords: cryolithozone, pile foundation, plastically frozen soils, thermal stabilizer, temperature and deformation calculations

Funding. The research was carried out with the funds of the state program of the Russian Federation "Scientific and Technological Development of the Russian Federation" for 2021–2030 within the Plan of Fundamental Scientific Research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences and the Ministry of Construction of Russia for 2021–2023, topic No. 3.1.3.1. "Ensuring the operability of foundations and foundations of buildings and structures in the cryolithozone under climate change conditions".

For citation. Sakharov I.I., Kudryavtsev S.A., Paramonov V.N. On Calculations of Pile Foundations in the Cryolithozone Using Thermostabilizers. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2024, no. 4, pp. 134–140, doi: 10.22337/2077-9038-2024-4-134-140.

Введение
Многолетнемёрзлые грунты в России, составляющие криолитозону, занимают около двух третей от площади территории страны. Значительный процент от этой территории приходится на высокотемпературные грунты, находящиеся в пластично-мерзлом состоянии. Ввиду развивающегося глобального потепления, особенно явно проявляющегося на Севере и в Сибири Российской Федерации, площадь распространения пластичномёрзлых грунтов в стране будет возрастать.

В настоящее время при устройстве фундаментов зданий и сооружений в криолитозоне наиболее часто используются сваи. Расчёт таких фундаментов производится по первому и второму предельным состояниям. Для расчёта несущей способности свай необходимо знание значений температуры околосвайного пространства. Расчёт осадок свайного фундамента по действующим СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах¹ должен производиться как для свайных фундаментов в обычных немёрзлых грунтах. При этом предыдущий нормативный документ – СНиП 2.02.04-88 – предписывал определять осадку кустов свай «с определением условного фундамента». Таким образом, расчёт осадки свайных фундаментов в пластичномёрзлых грунтах, так же как и в обычных условиях, предполагает введение в расчётную схему габаритов условного фундамента.

Последние десятилетия освоения Севера характеризуются широким применением термостабилизаторов или сезонно-охлаждающих устройств (СОУ). В случае свайных фундаментов СОУ располагаются «возле свай» (приложение Р СП 25.13330.2020²). При этом расположение СОУ относительно свай конкретно не оговаривается.

Как известно, при включении в работу СОУ вокруг них и близко расположенных свай формируется зона твёрдомерзлого грунта. Несущая способность свай, как уже отмечалось, определяется, в первую очередь, значениями отрицательных температур грунта, окружающего сваю. В связи с этим знание этих температур в проектировании необходимо, однако оценка распределения температур в околосвайном пространстве и его эволюция вокруг СОУ при использовании Приложения Р СП 25.13330.2020 неосуществимы.

Сезонно действующими охлаждающими установками (СОУ, термостабилизаторы, термосифоны, тепловые трубы и т.д.) принято называть устройства, выносящие тепло из грунта в атмосферу в зимний период. В строительстве применяются два типа СОУ:

– однофазные СОУ, работающие за счёт конвективного теплообмена (теплоноситель – воздух либо незамерзающие жидкости);

Таблица 1

Тип СОУ		Радиус теплового влияния* одиночных СОУ		
Соотношение длины надземной и подземной частей		0,40	0,75	1,00
Однотрубные жидкостные СОУ диаметром 160 мм, теплоноситель – керосин	метров	3,0	4,5	5,5
	дм	19	28	34
Однотрубные жидкостные СОУ диаметром 160 мм, теплоноситель – фреон	метров	4,5	5,0	6,0
	дм	28	31	38
Однотрубные жидкостные СОУ диаметром 38 мм, теплоноситель – аммиак	метров	–	–	1,4
	дм	–	–	37
* Граница радиуса теплового влияния принималась по изотерме охлаждения грунта на 0,1 °С в конце теплового периода года				

¹ СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах» (<https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/689/SP-25.pdf>).

² Там же

– двухфазные (парожидкостные) СОУ, работающие за счёт теплоты фазовых переходов (теплоноситель – легкокипящие жидкости).

Под руководством Акционерного общества «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» (АО ЦНИИС) с 1971 года Тындинская Мерзлотная станция более десяти лет проводила изучение тепловой эффективности СОУ на полигоне в Сковородино, затем исследования были продолжены на полигоне в Тынде [1].

Экспериментально получены радиусы теплового влияния одиночных СОУ в природно-климатических условиях северного Приамурья тех лет (табл. 1).

При расчёте осадок свайного фундамента в случае использования термостабилизаторов возникает вопрос о габаритах условного фундамента, так как присутствие СОУ, очевидно, вносит существенные возмущения в его размеры. Следует заметить, что несмотря на наличие эффективно работающих СОУ, осадки свайных фундаментов многоэтажных зданий в пластичномёрзлых грунтах могут достигать нескольких сантиметров и, следовательно, должны обязательно учитываться.

Таким образом, рациональное проектирование свайных фундаментов при использовании СОУ требует определения температур в околосвайном пространстве и конкретизации габаритов условного фундамента. Очевидно, решение этих задач требует привлечения численных методов, так как работа СОУ изменяется во времени, будучи напрямую связанная с эволюцией температур воздуха, окружающего конденсаторы термостабилизаторов. Ниже излагается решение подобной задачи с использованием известной программы «Termoground» [2].

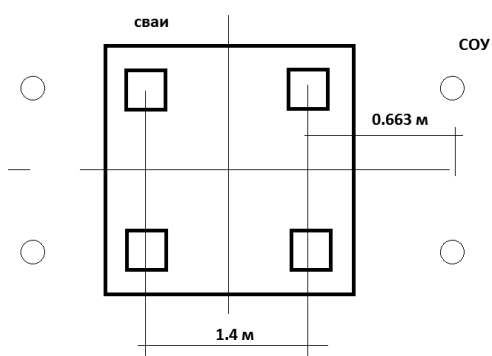


Рис. 1³. План фундамента с СОУ

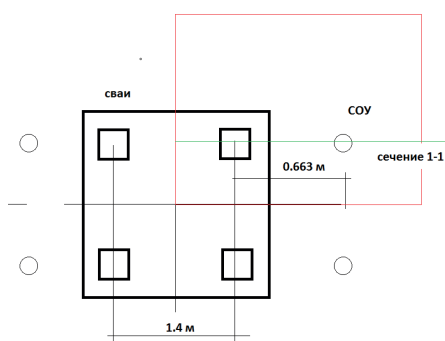


Рис. 2. Квадрант расчёта (выделен красным цветом)

Численное моделирование процессов промерзания и оттаивания

Постановка задачи.

Рассмотрим вариант температурного и деформационного расчёта свайного фундамента на пластичномёрзлых грунтах с термостабилизаторами.

В расчётах принят четырёхсвайный фундамент (рис. 1). Диаметр свай 325 мм (для упрощения принято квадратное сечение свай), длина свай 10 м. Ростверк в теплотехнических расчётах не учитывался. Рассмотрен свайный куст с четырьмя СОУ длиной 10 м.

Ввиду симметрии расчётной схемы в двух направлениях в расчётах рассмотрен левый верхний квадрант (рис. 2).

Размеры численной расчётной области исследования для расчёта температурных полей приняты следующими: в плане 4,5×4,5 м, высота схемы – 15 м. Таким образом, под сваями имеется ещё 5 м грунта. В расчётах принят грунт типа суглинок с влажностью 0,387 и температурой начала замерзания –0,6 °С. Начальная температура грунта 0,1 °С, модуль деформации в исходном состоянии $E = 10$ МПа; материал свай – железобетон. Расчёт выполнялся на период два года, начиная с первого тёплого месяца – июня. Четыре первых месяца (июнь–сентябрь) имеют положительную среднемесячную температуру. Время разбито по месяцам. Температура воздуха по месяцам принята по данным метеостанции в п. Таналау. Время температурного расчёта на распространённом компьютере средней мощности составило 18 часов.

Решение задачи

А. Температурные расчёты

Покажем области замерзания грунта на разные месяцы для сечения 1–1 (рис. 3).

На рисунке 4 показаны результаты расчётов на разные месяцы в виде зон мёрзлого грунта (голубой цвет). В октябре зоны мёрзлого грунта вокруг СОУ не доходят до свай. Диаметр зон мёрзлого грунта вокруг СОУ в ноябре составил 1,2 м, в декабре – 2,1 м.

На рисунке 5 в качестве примера показаны характерные изолинии и эпюры распределения температур в горизонтальной плоскости в разные моменты времени работы СОУ (октябрь и ноябрь)

На рисунках 6 и 7 выделены элементы замороженного вокруг СОУ грунта на второй и на четвёртый холодные месяцы (на ноябрь и на январь). Замороженным является грунт с температурой ниже температуры начала замерзания (ниже минус 0,6 °С). Рисунки приведены в двух вариантах – с указанием разбивки на конечные элементы и с разбивкой.

Характер распределения температур в теле свай при работе СОУ показан на рисунке 5.

Ниже приведены графики температур по длине свай в разные месяцы (см. рис. 7).

³ Все рисунки выполнены авторами статьи.

Б. Деформационные расчёты

Для оценки изменения напряжённо-деформированного состояния увеличены размеры расчётной области в плане – 37×37 м. Мощность слоя – 20 м (на 10 м ниже острия свай). Это необходимо для снижения влияния границ расчётной схемы на результаты расчётов. Рассмотрена полная схема без выделения квадранта расчётной схемы. Расчётная схема без разбивки и с разбивкой на конечные элементы приведена на рисунке 8.

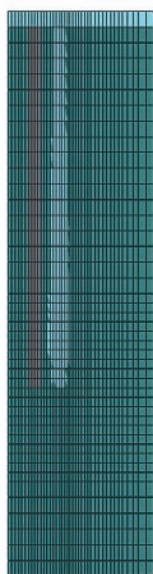
На рисунке 9 приведены изолинии и эпюры осадок свайного фундамента в разные моменты времени. Изолинии осадок до начала действия СОУ (рис. 9 а) имеют смысл для сравнения размеров условного фундамента при действии только трения и трения в сочетании с работой СОУ.

Результаты численного моделирования мёрзлых оснований свайного фундамента

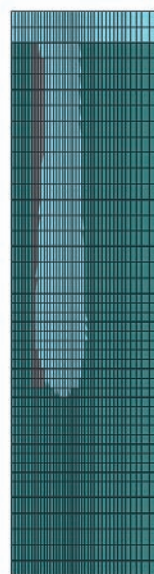
Численные расчёты позволяют установить распределение температур вокруг свай в любой момент времени. Это даёт возможность определить несущую способность свай и, следовательно, выполнить расчёт свайного фундамента по первой группе предельных состояний. При расчётах осадок численное моделирование позволяет очертить габариты условного фундамента, что, однако, не является обязательным, так как расчёт даёт и значения осадок свайного фундамента. Заметим, что присутствие СОУ способно существенно изменить размеры условного фундамента (рис. 11) и, следовательно, снизить величину



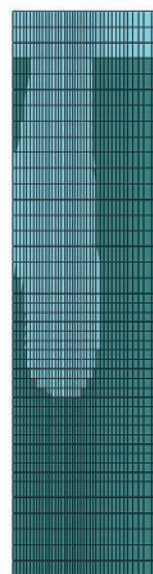
Рис. 3. Области замерзания грунта на разные месяцы для сечения 1–1



октябрь

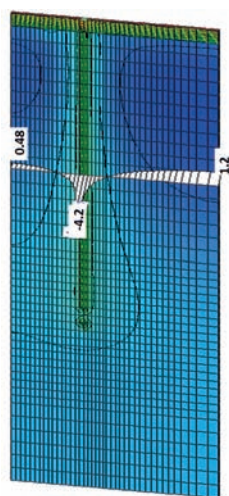


ноябрь

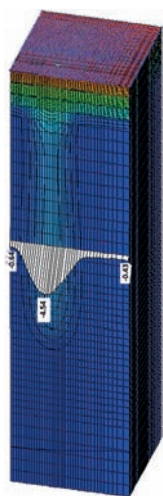


декабрь

Рис. 4. Зоны мёрзлого грунта вокруг СОУ в первые холодные месяцы



октябрь

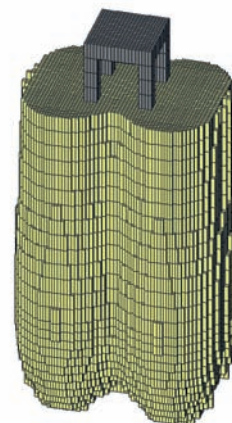


ноябрь

Рис. 5. Эпюры температур в горизонтальной плоскости в разные моменты времени работы СОУ



а)



б)

Рис. 6. Зоны намороженного грунта: а) через два холодные месяца; б) через четыре холодные месяца

осадок, что будет иметь смысл в сильнодеформированных пластичномёрзлых грунтах.

Как следует из результатов расчёта, действие СОУ наиболее эффективно в приближенных к атмосфере верхних горизонтах, сильно снижаясь с глубиной. Это позволяет существенно сократить длины испарителей, которые до настоящего времени обычно принято было задавать равными длинам свай [3]. Обсуждая возможность определения распределения температур вокруг свай практически в любой момент времени, следует указать, что принимать за расчётное распределение максимальные температуры нецелесообразно, так как эти температуры действуют в течение непродолжительного времени и не постоянно, а периодически [3–7].

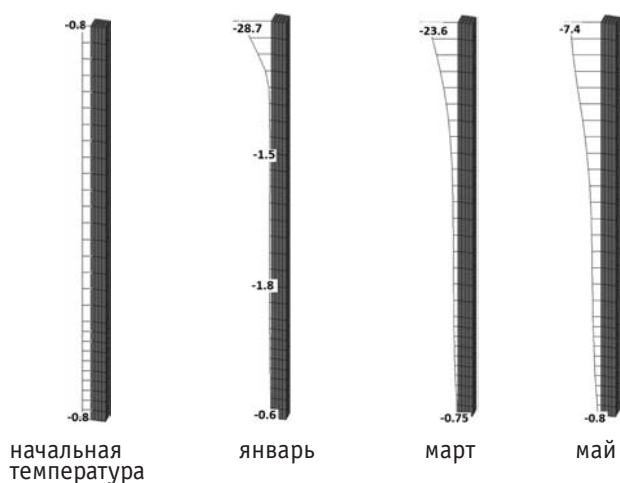


Рис. 7. Распределение температур по острию и боковой поверхности свай при работе СОУ

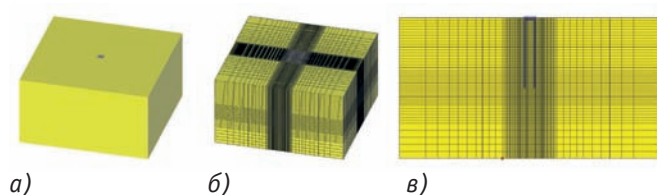
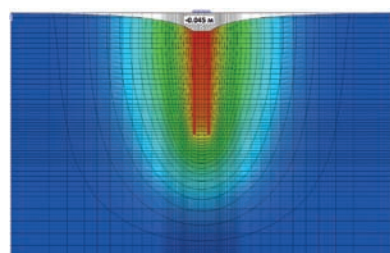
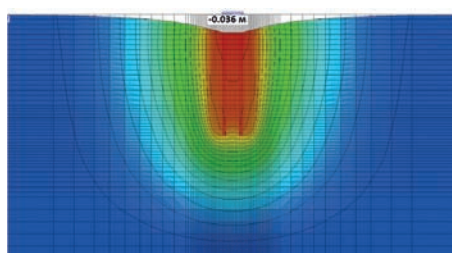


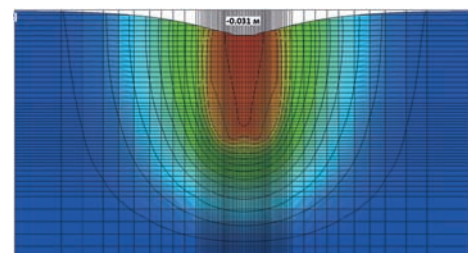
Рис. 8. Расчётные схемы деформационной задачи: а) общая; б) с разбивкой на конечные элементы; в) разбивка области на конечные элементы



а)



б)



в)

Рис. 9. Изолинии осадок: а) до замерзания. Максимальная осадка – 4,5 см; б) через 6 месяцев работы СОУ (период отрицательных температур воздуха – 2 месяца). Осадка – 3,6 см; в) через 7 месяцев работы СОУ (период отрицательных температур воздуха – 4 месяца). Осадка – 3,1 см

Другим следствием численных расчётов является возможность определения температурных полей вокруг окружающего групп СОУ свайных фундаментов. А это, в свою очередь, позволяет оценивать деформации (например, морозного пучения) в окрестностях пятна застройки. Последнее может оказаться полезным при оценке поведения у здания дорог и инженерных коммуникаций.

В заключение необходимо подчеркнуть, что численные температурные расчёты, являющиеся в криолитозоне основой для расчёта напряжённо-деформированного состояния в системе «фундамент – основание», основываются на прогнозах температуры воздуха, что не может быть полностью достоверным. В связи с этим таким расчётам не следует приписывать абсолютную точность,

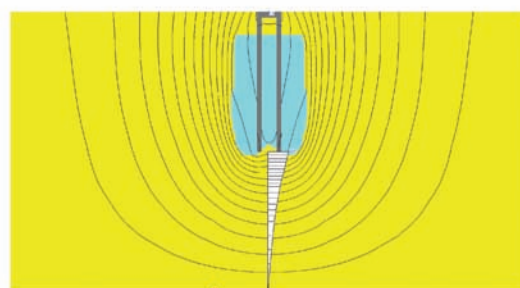


Рис. 10. Эпюра осадок фундамента через 8 месяцев

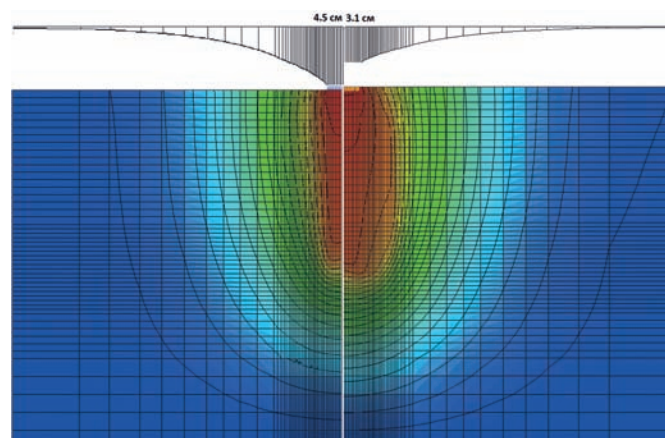


Рис. 11. Изолинии осадок в сечении до замораживания (левая часть) и после двухлетней работы СОУ (правая часть) для понимания изменения размеров условного фундамента

однако в настоящее время какие-либо другие подходы пока нереализуемы.

Выводы

Результаты расчёта температурных полей свайных фундаментов, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, позволят корректнее оценивать несущую способность свай и осадок фундамента. Это позволяет увеличить жизненный цикл зданий и сооружений.

1. Выполнение численного моделирования мерзлых грунтов позволяет установить все температурные и деформационные параметры в системе «свайный фундамент – мерзлое основание» в случае применения СОУ.

2. Выполненные расчёты показывают, что влияние СОУ с глубиной резко снижается, что позволяет сократить длину их испарительных частей, ограничиваясь несколькими метрами.

3. Осадки свайного фундамента могут быть снижены за счёт увеличения размеров условного мерзлого фундамента, что достигается отнесением СОУ от нейтральных осей.

Список источников

1. Гаврилов, И.И. Техническая надёжность и эффективность сезонно действующих охлаждающих установок / И.И. Гаврилов, И.В. Носков, В.Н. Шемелин. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 3. – С. 16–20.

2. Улицкий, В.М. Расчёт системы «основание – сооружение» при промерзании и оттаивании грунтов с помощью программы «Termoground» / И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов, С.А. Кудрявцев. – Текст : непосредственный // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 5. – С. 3–7.

3. Далматов, Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии) / Б.И. Далматов ; 2-е изд. перераб. и доп. – Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1988. – 415 с. – Текст : непосредственный.

4. Кудрявцев, С.А. Промерзание и оттаивание грунтов. Практические примеры и конечноэлементные расчёты / С.А. Кудрявцев, И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов. – Санкт-Петербург : Георекострукция, 2014. – 248 с. – Текст : непосредственный.

5. 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. – Текст : непосредственный // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : Научные труды РААСН : В 2 томах : Том 2. – Москва : АСВ, 2022. – С. 157–164.

6. Кудрявцев, С.А. Геотехнический мониторинг инфраструктуры железных дорог Дальнего Востока России в

условиях деградации многолетнемерзлых грунтов / Т.Ю. Вальцева, К.Б. Ушерович [и др.]. – Текст : непосредственный // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2022–2023 годы : Научные труды РААСН : В 2 томах : Том 2. – Москва : АСВ, 2024. – С. 241–250.

7. Гаврилов, И.И. Numerical Modeling of the Process Of Degradation Of Permafrost Soils of the Base of the Railway Roadbed in the Area of Passage of Construction Equipment / С.А. Кудрявцев, Т.Ю. Вальцева – Текст : электронный // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2023. – № 19 (3). – С. 31–38. URL: <https://ijccse.iasv.ru/index.php/ijccse/article/view/699/373> (дата обращения 5.08.2024).

References

1. Gavrilov I.I., Hoskov I.V., Shemelin V.N. Tekhnicheskaya nadezhnost' i effektivnost' sezonno deistvuyushchikh okhlazhdayushchikh ustanovok [Technical Reliability and Efficiency of Seasonally Operating Cooling Units]. In: *Put' i putevoe khozyaistvo [Railway Track and Facilities]*, 2023, no. 3, pp. 16–20. (In Russ., abstr. in Engl.)

2. Ulitskii V.M., Sakharov I.I., Paramonov V.N., Kudryavtsev S.A. Raschet sistemy «osnovanie – sooruzhenie» pri promerzanii i ottaivanii gruntov s pomoshch'yu programmy "TERMOGROUND" [Bed – Structure System Analysis for Soil Freezing and Thawing Using the Termoground Program]. In: *Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov [Soil Mechanics and Foundation Engineering]*, 2015, no. 5, pp. 3–7. In Russ., abstr. in Engl.)

3. Dalmatov B.I. Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamente (vklyuchaya spetsial'nyi kurs inzhenernoi geologii) [Soil Mechanics, Substructures and Foundations (Including a Special Course in Engineering Geology)]. Leningrad, Stroyizdat, Leningrad branch Publ., 1988, 415 p. (In Russ.)

4. Kudryavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N. Promerzanie i ottaivanie gruntov. Prakticheskie primery i konechnoelementnye raschety [Freezing and Thawing of Soils. Practical Examples And finite Element Calculations]. St. Petersburg, Georekonstruktsia Publ., 2014, 248 p. (In Russ.)

5. Kudryavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N. Sozdanie uslovii normativnogo sostoyaniya degradiruyushchikh mnogoletnemerzlykh osnovanii zdaniy i sooruzhenii Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga i Arktiki [Creating Conditions for the Regular State of Degrading Permafrost Buildings and Structures in the Far Eastern Federal District and the Arctic]. In: *Fundamental'nye, poiskovyie i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noi otrasli Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu. Sbornik nauchnykh trudov RAASN [Fundamental Search and Applied Research of the RAASN on*

Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021 year], Scientific works, In 2 volumes, Vol. 2. Moscow, ASV Publ., 2022, pp. 157–164. (In Russ., abstr. in Engl.)

6. Kudryavtsev S.A., Val'tseva T.Yu., Usherovich K.B., Granev I.V., Burov V.N. Geotekhnicheskii monitoring infrastruktury zheleznnykh dorog Dal'nego Vostoka Rossii v usloviyakh degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov [Geotechnical Monitoring of the Infrastructure of the Railways of the Russian Far East in Conditions of Degradation of Permafrost Soils]. In: *Fundamental'nye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noi otrasli*

Rossiiskoi Federatsii v 2022–2023 gody [Fundamental Search and Applied Research of the RAASN on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning and the construction industry of the Russian Federation in 2022–2023 years], Scientific works, In 2 volumes, Vol. 2. Moscow, ASV Publ., 2024, pp. 241–250. Moscow, ASV Publ., 2024, pp. 241–250. (In Russ., abstr. in Engl.)

7. Gavrilov I.I., Kudryavtsev S.A., Val'tseva T.Yu. Numerical Modeling of the Process of Degradation of Permafrost Soils of the Base of the Railway Roadbed in the Area of Passage of Construction Equipment. In: *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2023, no. 19 (3), pp. 31–38. (In Russ., in Engl.)