

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ДЛЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПО ПРИНЦИПУ II

Д.В. ЗОРИН¹, канд. техн. наук,

П.М. САЗОНОВ¹

В.В. ХМЫЗОВ*¹,

Т.С. ГОРБАЧЕВА¹

¹Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Россия

Аннотация

Введение. Основной причиной деформаций фундаментов сооружений в Арктической зоне является значительная сжимаемость многолетнемерзлых грунтов при их оттаивании. Эти процессы активизируются из-за техногенного воздействия и климатических изменений, скорость потепления в регионе, согласно данным Росгидромета, достигает 0,5 °С за десятилетие. Подобные условия требуют разработки методов, которые не только усиливают конструкции, но и кардинально улучшают деформационные свойства самого грунтового основания. В качестве перспективного решения рассматривается закрепление грунтов технологией струйной цементации. Данная технология позволит расширить арсенал средств улучшения строительных свойств оснований, сложенных частично или полностью мерзлыми породами, что в свою очередь позволит с большей технико-экономической эффективностью решать сложные геотехнические задачи на проблемных объектах. Закрепление и армирование высокотемпературных мерзлых грунтов представляется эффективной технологией для обеспечения долговременной устойчивости фундаментов в криолитозоне.

Цель. Разработка технологии струйной цементации в условиях высокотемпературных мерзлых грунтов (выше минус 0,5 °С) для возможности одновременного оттаивания и армирования основания, а также выполнение оценки степени изменения деформационных свойств мерзлого грунта после оттаивания и закрепления.

Материалы и методы. Методология заключается в проведении анализа архивной изыскательской и проектной документации, а также нормативной и другой технической литературы по теме работы с определением направлений дальнейших экспериментальных исследований, их анализе и обобщении, а также в разработке рекомендаций по применению технологии струйной цементации для многолетнемерзлых грунтов, используемых по принципу II.

Результаты. Изложены результаты анализа современной научно-технической, нормативной и методической литературы. Выполнены лабораторные исследования по определению физических, теплофизических и деформационных свойств грунта в естественном состоянии и закрепленном, которые в последствии использовались при моделировании теплового воздействия от устройства грунтоцементных элементов, а также при расчетно-аналитическом исследовании на примере расчета осадки. Выданы рекомендации по применению технологии струйной цементации для закрепления оснований в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, используемых по принципу II.

Выводы. На основе анализа литературы, результатов экспериментальных исследований и исследований по закреплению высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов разработаны рекомендации по применению технологии струйной цементации для закрепления оснований в рамках распространения многолетнемерзлых грунтов, используемых по принципу II. Разработаны предложения по при-

менению результатов НИОКР при разработке и изменении нормативно-технических и методических документов.

Ключевые слова: многолетнемерзлый грунт, струйная цементация, армирование грунтового основания, закрепление грунтов, деформационные свойства грунтов, улучшение свойств грунтов

Для цитирования: Зорин Д.В., Сазонов П.М., Хмызов В.В., Горбачева Т.С. Разработка технологии струйной цементации для многолетнемерзлых грунтов, используемых по принципу II // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2026. 1(48). С. 183–201. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-183-201](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-183-201)

Вклад авторов

Зорин Д.В., Сазонов П.М., Хмызов В.В. – на основе анализа литературы и результатов исследований разработаны рекомендации по применению технологии струйной цементации для закрепления оснований в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, используемых по принципу II, и предложения по использованию результатов НИОКР при разработке и изменении нормативно-технической и методических документов.

Хмызов В.В. – проведен обзор и анализ современных нормативных требований, выполнен анализ результатов экспериментальных исследований грунтов и результатов экспериментальных исследований закрепления многолетнемерзлых грунтов.

Горбачева Т.С., Хмызов В.В. – выполнена разработка программы экспериментальных исследований применения струйной цементации в условиях высокотемпературных мерзлых грунтов, проведение лабораторных испытаний, проведение расчетно-аналитических исследований.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках договорных работ между АО «НИЦ «Строительство» и ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 26.12.2025

Поступила после рецензирования 03.02.2026

Принята к публикации 12.02.2026

DEVELOPMENT OF JET CEMENTATION TECHNOLOGY FOR PERMAFROST SOILS USED ACCORDING TO PRINCIPLE II

D.V. ZORIN¹, Cand. Sci. (Engineering),

P.M. SAZONOV¹

V.V. KHMZYOV^{1*}

T.S. GORBACHEVA¹

¹*Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russia*

Abstract

Introduction. The main cause of foundation deformation in Arctic structures is the significant compressibility of permafrost soils during thawing. These processes are accelerated by anthropogenic impacts and climate change; according to Roshydromet, the rate of warming in the region is reaching 0.5°C per decade. These conditions require the development of methods that not only strengthen structures but also dramatically improve the deformation properties of the soil base itself. Soil stabilization using jet grouting is being considered as a promising solution. The key effect is the virtual elimination of subsidence during thawing. Therefore, stabilization and reinforcement of high-temperature frozen soils appears to be an effective technology for ensuring the long-term stability of foundations in the permafrost zone.

Aim. Development of jet grouting technology in conditions of high-temperature frozen soils (above minus 0.5 °C) to enable simultaneous thawing and reinforcement of the foundation, and an assessment of the degree of change in the deformation properties of frozen soil after thawing and consolidation.

Materials and methods. The methodology consists in analyzing archival survey and design documentation, as well as regulatory and other technical literature on the topic of work, identifying areas for further experimental research, analyzing and summarizing them, as well as developing recommendations for the use of jet cementation technology for permafrost soils used according to principle II.

Results. The results of the analysis of modern scientific, technical, normative and methodological literature are presented. Laboratory studies were performed to determine the physical, thermophysical and deformation properties of the soil in its natural state and fixed, which were later used in modeling the thermal effects from the device of soil cement elements, as well as in computational and analytical research using the example of subsidence calculation. Recommendations have been issued on the use of jet cementation technology for fixing foundations in areas of permafrost soils used according to principle II.

Conclusions. Based on the analysis of the literature, the results of experimental studies and studies on the consolidation of high-temperature permafrost soils, recommendations have been developed for the use of jet cementation technology for the consolidation of foundations within the framework of the distribution of permafrost soils used according to principle II. Proposals have been developed for the application of R&D results in the development and modification of regulatory, technical and methodological documents.

Keywords: permafrost soil, jet grouting, soil reinforcement, soil stabilization, soil deformation properties, soil properties improvement

For citation: Zorin D.V., Sazonov P.M., Khmyzov V.V., Gorbacheva T.S. Development of jet cementation technology for permafrost soils used according to principle II. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, 1(48), pp. 183–201. [In Russian] [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-183-201](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-183-201)

Authors contribution statement

Zorin D.V., Sazonov P.M., Khmyzov V.V. – based on a literature review, recommendations were developed for the use of jet grouting technology for foundation stabilization in areas with permafrost soils, used according to the ii principle, and proposals for the use of R&D results in the development and revision of regulatory, technical, and methodological documents.

Khmyzov V.V. – a review and analysis of current regulatory requirements was conducted, and the results of experimental soil studies and the results of experimental studies on permafrost soil stabilization were analyzed.

Gorbacheva T.S., Khmyzov V.V. – development of the experimental research program for the use of jet grouting in high-temperature frozen soils.

Funding

The study was carried out within the framework of contractual work between JSC Research Center of Construction and the Federal Center for Regulation, Standardization and Technical Assessment in Construction (FAU “FCC”).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 26.12.2025

Revised 03.02.2026

Accepted 12.02.2026

Введение

Основной причиной деформаций фундаментов сооружений в Арктической зоне является значительная сжимаемость многолетнемерзлых грунтов при их оттаивании. Эти процессы активизируются из-за техногенного воздействия и климатических изменений, скорость потепления в регионе, согласно данным Росгидромета, достигает 0,5 °С за деся-

тилетие. Подобные условия требуют разработки новых технологий строительства фундаментов и улучшения механических свойств грунтов оснований в условиях криолитозоны, которые не только усиливают конструкции, но и кардинально улучшают деформационные свойства самого грунтового основания.

В качестве перспективного решения рассматривается закрепление грунтов технологией струйной цементации, тем временем возможность применения данной технологии в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов оставляет еще множество вопросов. Данная технология позволит расширить арсенал средств улучшения строительных свойств оснований, сложенных частично или полностью мерзлыми породами, что в свою очередь позволит с большей технико-экономической эффективностью решать сложные геотехнические задачи на проблемных объектах. Закрепление и армирование высокотемпературных мерзлых грунтов представляется эффективной технологией для обеспечения долговременной устойчивости фундаментов в криолитозоне.

Целью являлась оценка возможности применения струйной цементации в условиях высокотемпературных мерзлых грунтов (выше 0,5 °С) для возможного одновременного оттаивания и армирования основания; оценка степени изменения деформационных свойств мерзлого грунта после оттаивания и закрепления.

Для достижения цели решался комплекс задач:

- проведение анализа отечественной и зарубежной нормативной, методической и научной литературы, касающейся технологии струйной цементации, закрепления и армирования грунтов, а также опыта применения данной технологии в условиях многолетнемерзлых грунтов;
- проведение комплекса экспериментальных исследований по определению степени изменения деформационных свойств мерзлых грунтов в естественном и закрепленном состояниях;
- обобщение и сопоставление результатов экспериментов, оценка изменения деформационных свойств образцов мерзлого грунта и преобразованного в грунтоцемент мерзлого и оттаявшего грунта в результате закрепления;
- разработка рекомендаций по применению технологии струйной цементации для закрепления оснований в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, используемых по принципу II;
- подготовка предложений по использованию результатов НИОКР в нормативных документах.

Обзор и анализ современной научно-технической, нормативной и методической литературы

Технологии закрепления грунтов отлично зарекомендовали себя в немерзлых грунтах. Они позволяют повысить несущую способность слабых, сильно сжимающихся грунтов, уплотняя грунты, увеличивая их прочностные и деформационные свойства.

Перспективной технологией для улучшения грунтового основания мерзлых грунтов является струйная цементация за счет устройства искусственного основания из закрепленного грунта в виде сплошного массива или армирующих элементов. Это позволит производить одновременное оттаивание и закрепление высокотемпературных мерзлых грунтов. В рамках настоящего исследования далее рассматривается данный способ закрепления грунта.

Основным действующим нормативным документом, используемым при устройстве армированного массива грунта по методу струйной цементации в немерзлых грунтах, является СП 291.1325800.2017 [1], устанавливающий основные геотехнические требования и правила на проектирование армированных грунтоцементных конструкций.

Над развитием технологии струйной цементации в многолетнемерзлых грунтах работают многие российские ученые, результаты работ которых отражены в статьях А.Г. Алексеева, Д.В. Зорина [2], В.А. Ильичева [3], С.С. Зуева [4], А.Г. Малинина [5, 6] и многих других.

Важным техническим решением по закреплению грунтов является выбор способа устройства грунтоцементных элементов. Грунтоцементные конструкции могут выполняться из комбинации грунтоцементных элементов, отличающихся в зависимости от расположения: одиночно, в один, два, три ряда, по треугольной или квадратной сетке с заданным шагом, а также в виде ячеистой структуры и сплошным массивом.

Нормируемыми показателями качества и контролируемыми параметрами при проектировании струйной цементации грунтов являются [7]:

- способ цементации (jet-1, jet-2, jet-3);
- расчетный условный радиус закрепления, глубина закрепления / длина элемента закрепленного грунта (грунтоцементного элемента – ГЦЭ);
- нормируемые показатели качества закрепленного грунта – базовые;
- номинальный состав раствора;
- технологические параметры цементации: диаметр форсунок монитора, давление, скорость вращения, скорость подъема монитора при формировании ГЦЭ, объем раствора и расход цемента на 1 м;
- расчетные характеристики армирующих элементов при применении армирования.

В настоящее время технологии струйной цементации по устройству грунтоцементных элементов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов не описываются в нормативно-технической литературе, что ограничивает набор доступных методов по укреплению основания в криолитозоне.

Экспериментальные исследования применения струйной цементации в условиях высокотемпературных мерзлых грунтов

В рамках исследований проведены лабораторные испытания песчаного и супесчаного мерзлых грунтов в естественном и закрепленном состояниях. Для того чтобы определить температурное распределение в массиве закрепленного грунта, его оттаивания за счет устройства ГЦЭ, проводилось теплотехническое моделирование ГЦЭ и рассматриваемых высокотемпературных мерзлых грунтов.

В рамках подготовки к лабораторным исследованиям в программном комплексе «Борей 3D» выполнен теплотехнический расчет оттаивания грунта в результате устройства ГЦЭ для определения температурного распределения и значения температуры в теле ГЦЭ, при которой впоследствии проводилась выстойка образцов для набора прочности. Значение температуры принималось на 3 суток. Полученные результаты применены в качестве температуры твердения грунтоцементных образцов для дальнейших исследований в рамках этапа лабораторных испытаний.

В данной работе рассматривались два типа грунтов:

– Песок средней крупности незасоленный, без включений органики, влажность – 0,18 д.е., плотность – 1,86 г/см³.

– Супесь песчанистая незасоленная, без включений органики, влажность – 0,20 д.е., плотность – 1,95 г/см³.

Данные параметры грунтов достигнуты путем изготовления образцов дисперсного грунта нарушенного сложения с заданными значениями плотности и влажности в соответствии с ГОСТ 30416-2020 [8]. Также для двух типов грунтов были определены физические и теплофизические характеристики.

Элемент грунтоцемента принимался круглого сечения диаметром 1,2 и 0,6 м, что соответствует реалистичным достигнутым диаметрам на опытных участках [4–6]. Длина ГЦЭ принята 20,0 м. Начальная температура ГЦЭ принята 24 °С. Для ГЦЭ диаметром 0,6 м расход цемента на 1 пог. м принят равным 100 кг/пог. м, для диаметра 1,2 м – 400 кг/пог. м, что соответствует опытным параметрам и нижнему рекомендованному пределу расхода цемента. Соответственно, содержание цемента на 1 м³ составляет 354 кг/ м³. Суммарное тепловыделение рассчитано на 3, 7, 28 и 90 суток. Принято, что процесс тепловыделения прекращается в возрасте 28 суток. По полученным значениям построена логарифмическая кривая, по уравнению которой определено значение суммарного тепловыделения через каждые сутки.

Теплотехнический расчет показал, что на третий день диаметр зоны оттаивания от одиночного ГЦЭ диаметром 0,6 м достигает 3,64 м в песке и 2,54 м в супеси, а при диаметре ГЦЭ 1,2 м увеличивается до 4,8 и 3,68 м соответственно. Результаты температурного распределения на 3 сутки представлены на рис. 1–4.



Рис. 1. Температурное распределение ГЦЭ диаметром 0,6 м в песке на 3 сутки

Fig. 1. Temperature distribution of the soil-cement element with a diameter of 0.6 m in sand for 3 days

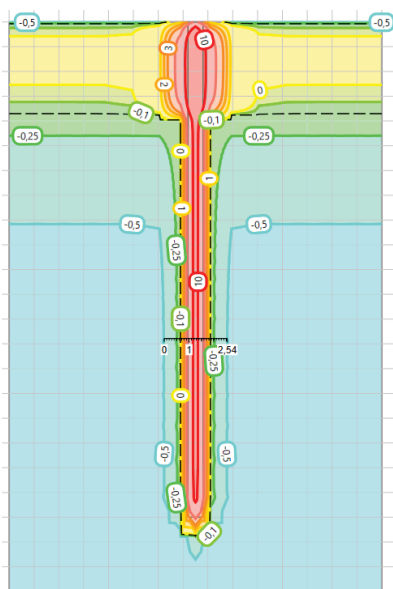


Рис. 2. Температурное распределение ГЦЭ диаметром 0,6 м в супеси на 3 сутки

Fig. 1. Temperature distribution of the soil-cement element with a diameter of 0.6 m in sandy loam for 3 days

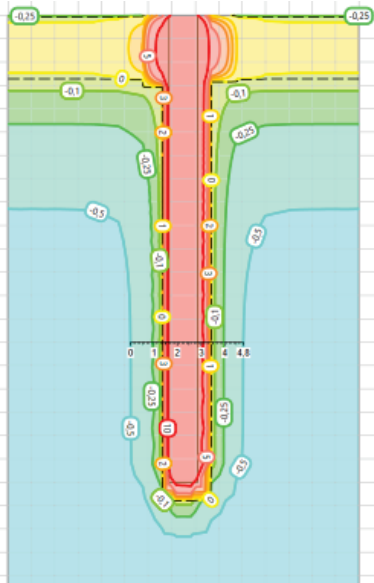


Рис. 3. Температурное распределение ГЦЭ диаметром 1,2 м в песке на 3 суток

Fig. 3. Temperature distribution of the soil-cement element with a diameter of 1.2 m in sand for 3 days

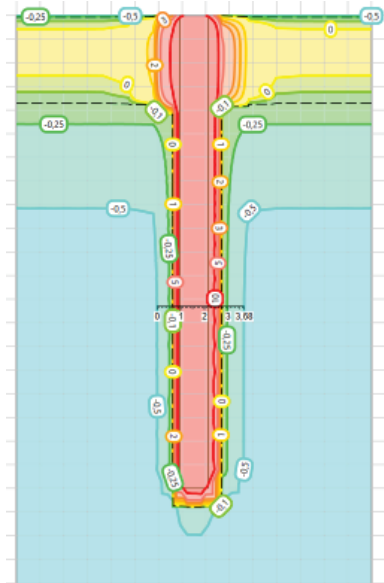


Рис. 4. Температурное распределение ГЦЭ диаметром 1,2 м в супеси на 3 суток

Fig. 4. Temperature distribution of the soil-cement element with a diameter of 1.2 m in sandy loam for 3 days

На 3 суток с начала расчета в теле ГЦЭ диаметром 1,2 м температура составляла около плюс 3 °С, для ГЦЭ диаметром 0,6 м температура составляла около плюс 2,8 °С. Для дальнейших лабораторных исследований при выдержке образцов принята температура, равная 3 °С.

Для оценки изменения деформационных свойств сравнивались результаты лабораторных испытаний методом компрессионного сжатия естественного грунта и закрепленного согласно ГОСТ 12248.10-2020 [9], а также проводились расчетно-аналитические исследования на примере расчета осадки плитного фундамента модели сооружения с полами по грунту размерами в плане 24 × 24 м.

Создание образцов исходного грунта осуществлялось по стандартной методике путем формирования образца нарушенного сложения с заданными значениями плотности и влажности в соответствии с ГОСТ 30416-2020 [8].

Образцы грунтоцемента формировались в лаборатории по специальной методике путем смешивания предварительно выдержанного в холодильной камере (при температуре –0,5 °С) грунта заданной влажности с цементным раствором.

По истечению суток температура грунта составляла около 0,3–0,6 °С у песка и супеси соответственно.

Для подготовки цементного раствора применялся портландцемент ЦЕМ I 32.5Н (ГОСТ 31108-2020 [10]). Водоцементное отношение (В/Ц) раствора – 0,8.

Необходимый объем раствора вычислялся исходя из объема закрепляемого грунта и объема заполняемых пор.

Изготовление образцов закрепленного грунта выполнялось при температуре воздуха 21–25 °С. После образцы переносились в климатическую камеру на расчетный период времени набора прочности, принятый равным 14 суткам. Температура воздуха в климати-

ческой камере применялась по результатам предварительного теплотехнического расчета и была равна 3 °С.

Всего проведено 12 испытаний по определению плотности грунтов и грунтоцемента, 12 испытаний по определению влажности грунтов и грунтоцемента, 6 испытаний по определению теплопроводности и теплоемкости грунта в талом и мерзлом состояниях, а также 3 испытания по определению температуры фазового перехода грунта и грунтоцемента.

В ходе исследований сделан вывод, что физические классификационные характеристики грунта соответствуют изначально заданным значениям. Осредненные значения физических и теплофизических характеристик грунтов, принятых в расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Осредненные значения физических и теплофизических характеристик грунтов и грунтоцемента

Table 1

Average values of physical and thermophysical characteristics of soils and soil-cement

Наименование грунта	Суммарная влажность, W_{tot} , %	Плотность, ρ , г/см ³	Температура начала замерзания, $T_{зр}$, °С	В мерзлом состоянии		В талом состоянии	
				к-т тепл-ти, λ_r , Вт/(м×К)	об-я тепл-ть, C_r , МДж/(м ³ ×К)	к-т тепл-ти, λ_t , Вт/(м×К)	об-я тепл-ть, C_t , МДж/(м ³ ×К)
Песок средней крупности	18,0	1,89	-0,05	2,80	1,65	2,10	2,00
Супесь песчанистая, незасоленная	20,0	1,96	-0,17	2,54	1,96	2,04	2,74
Грунтоцемент (песок средней крупности)	17,4	2,28	-0,05	3,39	2,47	2,39	2,97
Грунтоцемент (супесь песчанистая, незасоленная)	19,8	2,23	-0,32	2,71	2,68	1,93	3,34

Проведено 8 испытаний по определению деформационных свойств мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия, 8 испытаний по определению деформационных свойств мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия при оттаивании, 6 испытаний по определению деформационных свойств мерзлого грунтоцемента методом компрессионного сжатия, 12 испытаний по определению деформационных свойств мерзлого грунтоцемента методом компрессионного сжатия при оттаивании. Всего проведено 34 испытания.

Осредненные значения деформационных свойств приведены в табл. 2.

Осредненные значения деформационных свойств грунтов и грунтоцемента

Table 2

Average values of deformation properties of soils and soil-cement

Тип грунта	Состояние закрепления	Коэф. сжимаемости, МПа-1	Модуль деформации, МПа	Коэф. оттаивания, д.е.	Коэф. сжимаемости при оттаивании, МПа-1
Песок	Естественное	0,052	15,6	0,016	0,038
	Грунтоцемент	0,020	46,3	0,000	0,017
Супесь	Естественное	0,066	12,2	0,097	0,090
	Грунтоцемент	0,014	62,1	0,000	0,020

Моделирование теплового воздействия от устройства грунтоцементных элементов в многолетнемерзлых грунтах

В рамках исследований проведены теплотехнические расчеты моделирования оттаивания грунтового массива от устройства ГЦЭ в рассматриваемых высокотемпературных многолетнемерзлых грунтах.

Всего выполнено четыре типа расчетов:

- песок – ГЦЭ Ø 0,6 м;
- супесь – ГЦЭ Ø 0,6 м;
- песок – ГЦЭ Ø 1,2 м;
- супесь – ГЦЭ Ø 1,2 м.

Во всех вариантах ГЦЭ имеет соответствующие диаметры и длину 20 м. Шаг принимался по результатам предварительного теплотехнического расчета одиночного ГЦЭ так, чтобы он не превышал половину величины оттаявшей зоны при расчете одиночного ГЦЭ. Климатические условия и параметры грунтов приняты идентично расчету одиночной сваи.

Прогнозный расчет выполнен на период одного месяца. Результаты теплотехнического расчета для закрепленного грунта элементами диаметром 0,6 представлены в виде сечений распределения температуры грунтов по глубине для различных моментов времени на рис. 5–7 для песка и 8–10 для супеси.

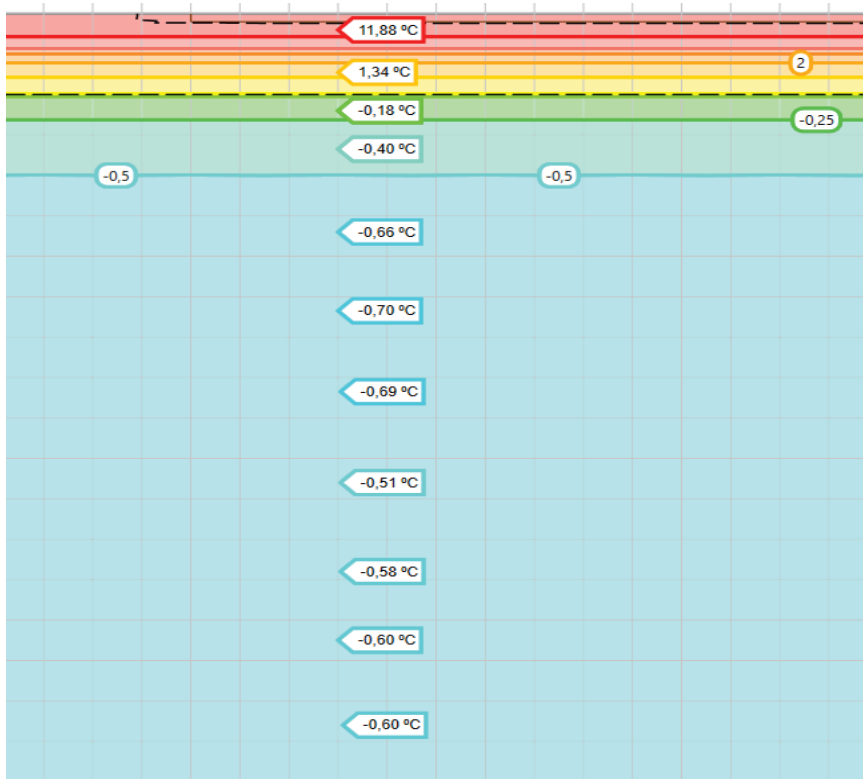


Рис. 5. Исходное температурное распределение грунта для песка до устройства ГЦЭ
Fig. 5. Initial temperature distribution of the sand before the soil-cement element making

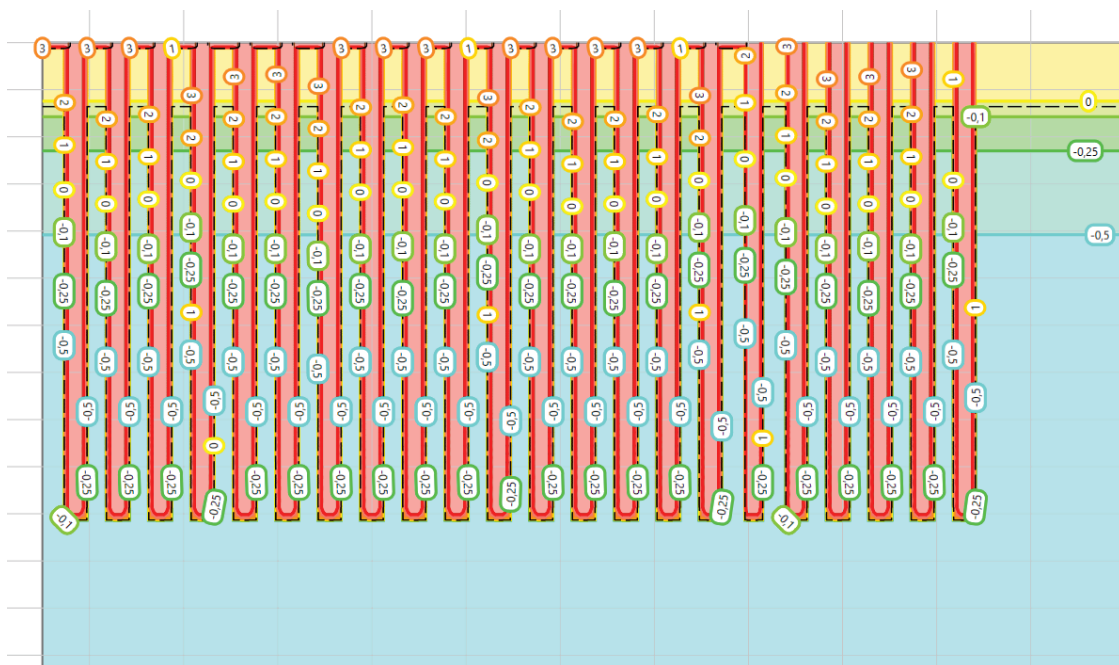


Рис. 6. Температурное распределение ГЦЭ через 1 день
Fig. 6. Temperature distribution of the soil-cement element after 1 day

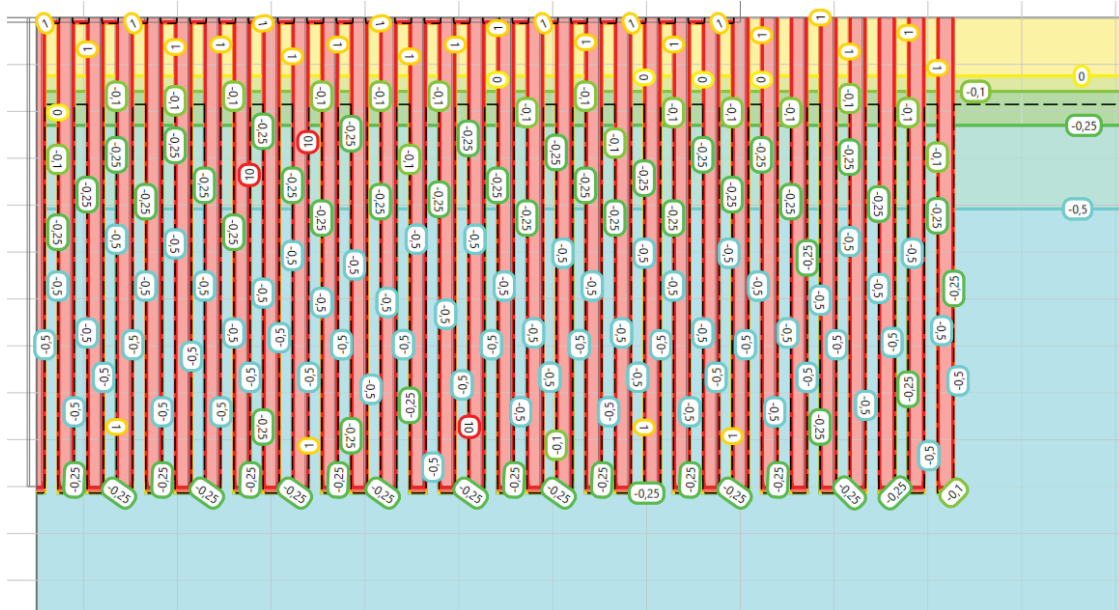


Рис. 9. Температурное распределение ГЦЭ через 1 день
Fig. 9. Temperature distribution of the soil-cement element after 1 day

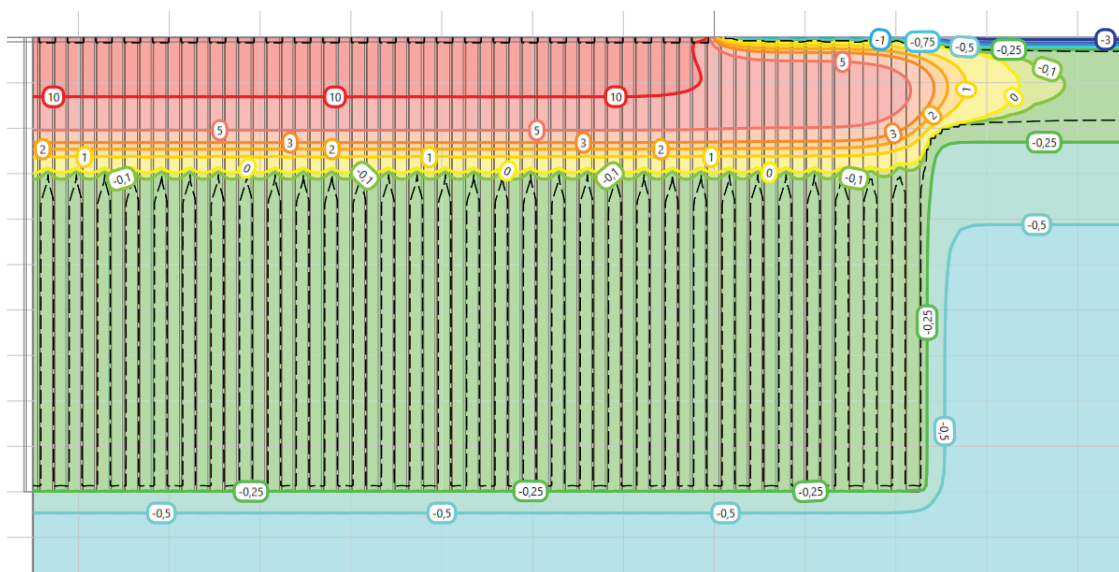


Рис. 10. Температурное распределение ГЦЭ через 30 дней
Fig. 10. Temperature distribution of the soil-cement element after 30 days

Результаты теплотехнического расчета для закрепленного грунта элементами диаметром 1,2 м представлены в виде сечений распределения температуры грунтов по глубине на первый день и через 30 дней на рис. 11, 12 для песка и рис. 13, 14 для супеси.

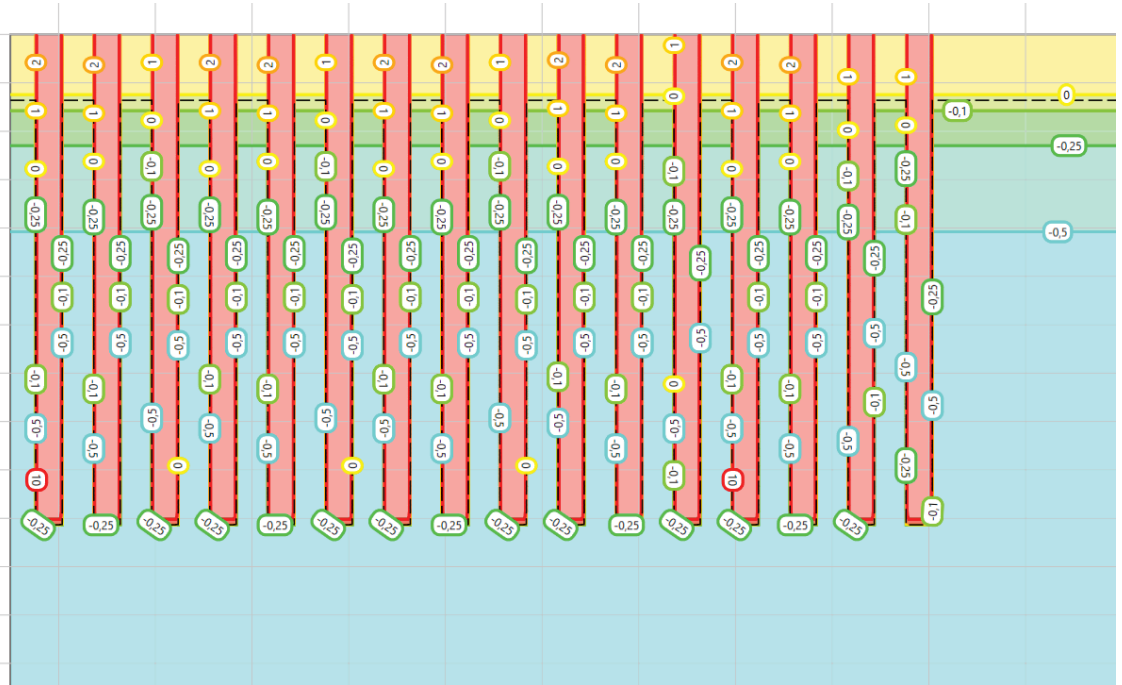


Рис. 11. Температурное распределение ГЦЭ через 1 день
Fig. 11. Temperature distribution of the soil-cement element after 1 day

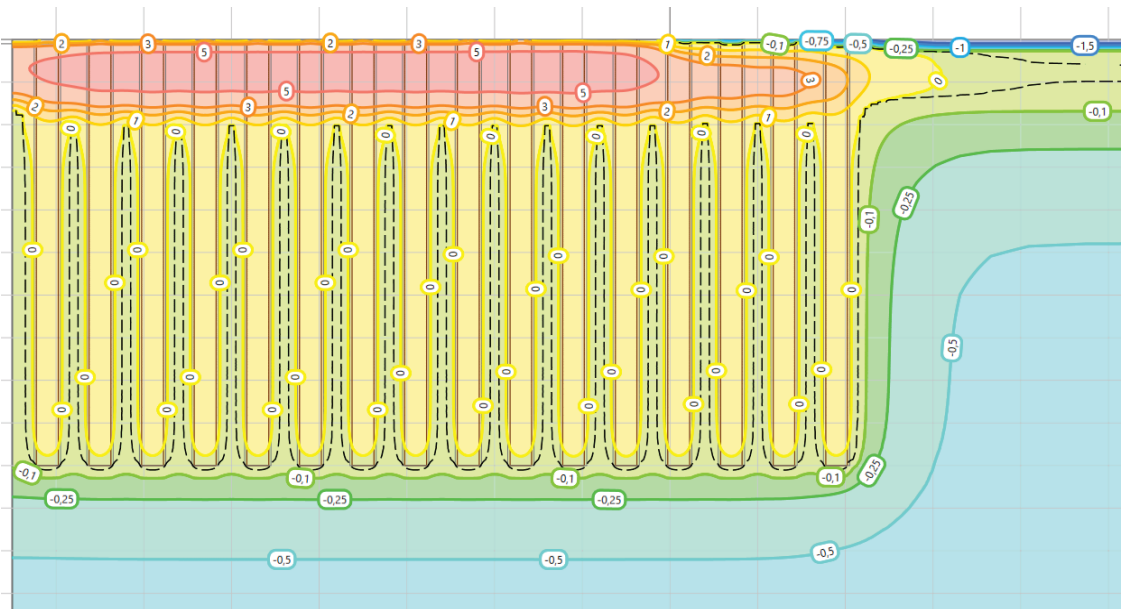


Рис. 12. Температурное распределение ГЦЭ через 30 дней
Fig. 12. Temperature distribution of the soil-cement element after 30 days

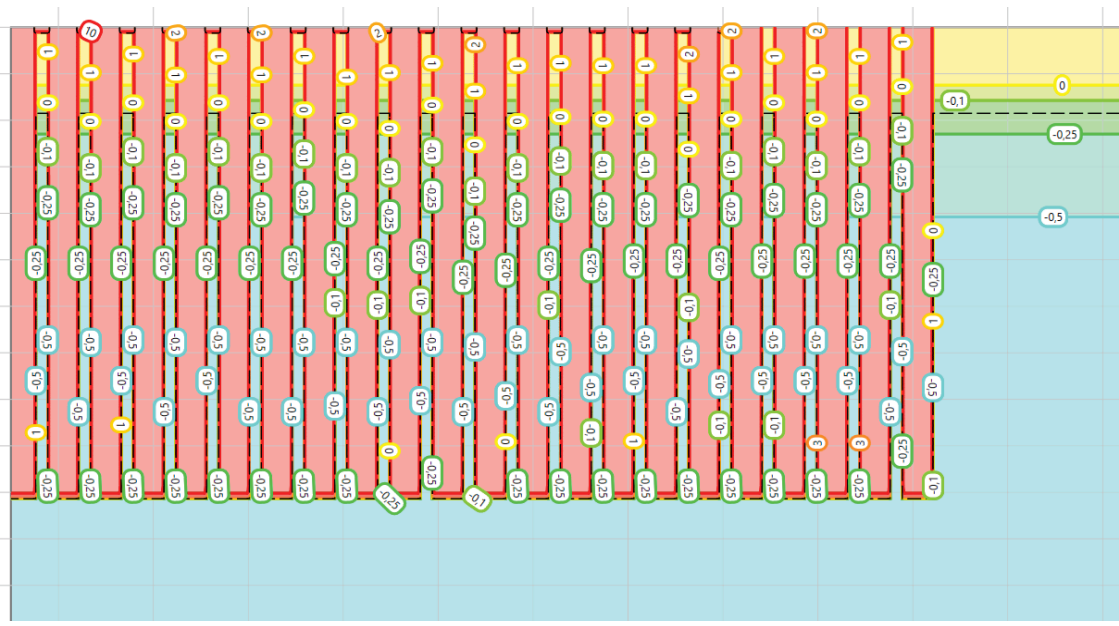


Рис. 13. Температурное распределение ГЦЭ через 1 день
Fig. 13. Temperature distribution of the soil-cement element after 1 day

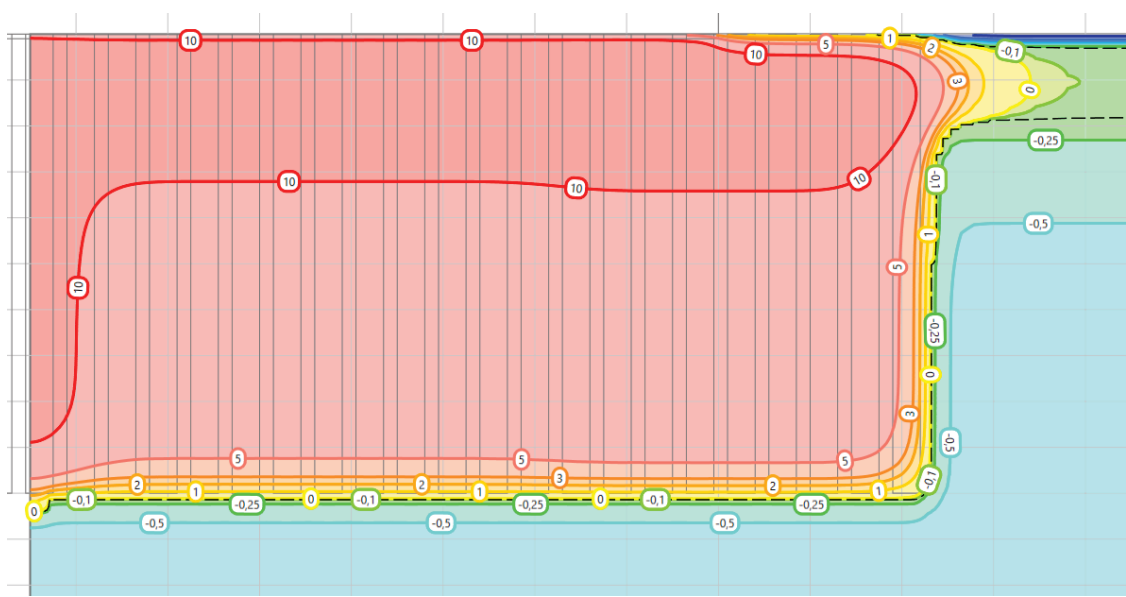


Рис. 14. Температурное распределение ГЦЭ через 30 дней
Fig. 14. Temperature distribution of the soil-cement element after 30 days

Анализ результатов показывает, что в начале устройства ГЦЭ происходит полное оттаивания основания во всех вариантах расчета. Промерзание закрепленного грунта наступает раньше в случаях диаметра 0,6 м в обоих типах грунтов.

Ниже представлены результаты теплотехнического расчета закрепленного грунта, рассчитанного на конец срока эксплуатации 50 лет для песка диаметром 0,6 м при допущении оттаивания и закреплении на рис. 15 и 16.

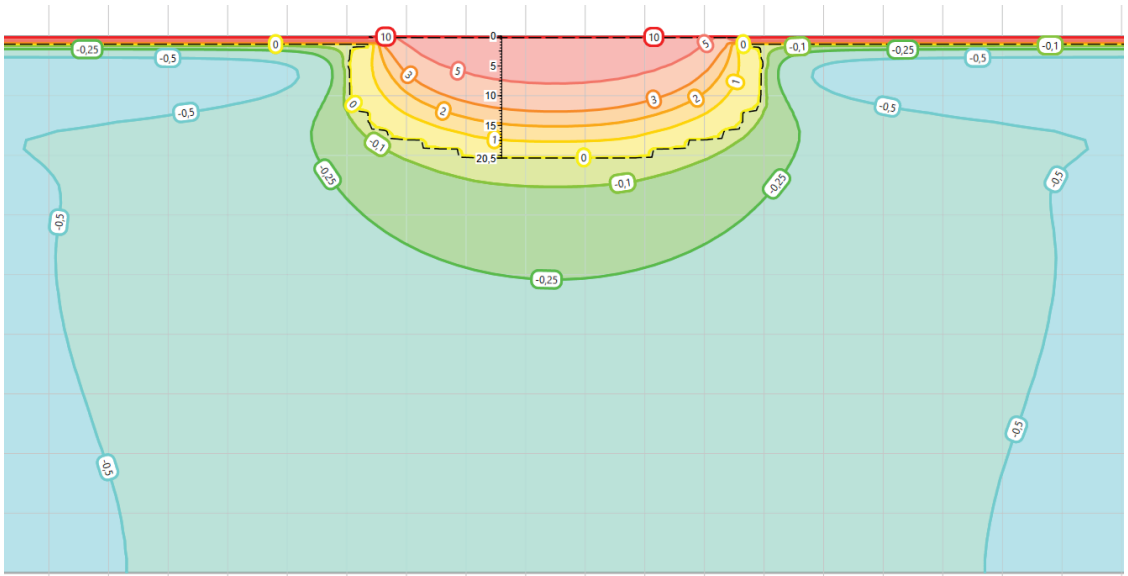


Рис. 15. Температурное распределение грунта при допущении оттаивания на конец срока эксплуатации
Fig. 15. Temperature distribution of the soil when thawing is allowed at the end of the service life



Рис. 16. Температурное распределение закрепленного грунта на конец срока эксплуатации
Fig. 16. Temperature distribution of the fixed soil at the end of the service life

Расчетная глубина оттаивания в варианте при допущении оттаивания составила около 20,5 м, в свою очередь глубина оттаивания закрепленного грунта составила 19,5 м.

Расчетное аналитическое исследование ГЦЭ на примере расчета осадки

Эффективность применения технологии струйной цементации с точки зрения деформационных свойств показана на примере расчета осадки плитного фундамента габаритами в плане 24×24 м для песка в трех вариантах: при допущении оттаивания основания, при сплошном закреплении грунтового основания и при армировании основания ГЦЭ диаметром 1,2 м по квадратной сетке с шагом $2,4 \times 2,4$ м. Характеристики для расчета приняты по результатам проведенных экспериментальных исследований.

Мощность оттаивания принята по результатам теплотехнического расчета и составляет 20,5 м для расчетной схемы с допущением оттаивания и 19,5 м для расчетной схемы при устройстве ГЦЭ.

Осадку основания рассчитывали на разные периоды времени: после применения струйной цементации и на конец срока эксплуатации здания.

На первом этапе расчета определялась осадка основания, обусловленная действием собственного веса оттаивающего грунта по п. 7.3.7 СП 25.13330.2020 [11]. Для расчета армированного грунта модуль деформации E определен согласно п. 6.10.20 СП 22.13330.2016 [12] как приведенный интегральный модуль деформации армированного основания. Коэффициент сжимаемости оттаивающего массива m_{th} , коэффициент оттаивания A_{th} и удельный вес армированного грунта ρ определены аналогичным образом.

По результатам расчета осадка основания, обусловленная действием собственного веса оттаивающего грунта, составила:

- при допущении оттаивания 0,646 м;
- при сплошном закреплении 0,145 м;
- при армировании основания $2,4 \times 2,4$ м.

На втором этапе определяется дополнительная осадка за счет продавливания ГЦЭ на уровне подошвы условного фундамента по п. 7.4.10 СП 24.13330.2021 [13]. Для сплошного закрепления грунтового массива дополнительную осадку за счет продавливания принимаем равной нулю.

Осадку основания при предварительном оттаивании на конец срока эксплуатации s вычислена как сумма осадок, состоящая из уплотнения закрепленного массива грунта $s_{p,th}$, оттаянного грунта s_{nf} и мерзлого грунта s_f , дополнительной осадки за счет продавливания ГЦЭ на уровне подошвы закрепленного массива Δs_p , а также дополнительной осадки основания при оттаивании закрепленного массива s_{ad} .

В результате расчета на конец срока эксплуатации получены следующие значения осадок:

- 0,701 м при допущении оттаивания;
- 0,150 м при сплошном закреплении;
- 0,529 м при армировании основания.

В результате расчетов в процентном отношении осадка основания при допущении оттаивания на конец срока эксплуатации здания на 30 % больше полученной осадки при армировании основания. Основной эффект в улучшение деформационных свойств основания вносит практическое отсутствие осадки при оттаивании закрепленного массива.

Выводы

1. В результате анализа современной научно-технической, нормативной и методической литературы выявлено, что в настоящее время технологии струйной цементации по устройству грунтоцементных элементов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов не описываются в нормативно-технической литературе, что ограничивает набор доступных методов по укреплению основания в криолитозоне.

2. Для всех диапазонов нагрузок коэффициенты сжимаемости закрепленного грунта оказались ниже, чем у грунта в естественном состоянии: в среднем на 62 % для песка и на 79 % для супеси.

3. Зафиксировано увеличение модуля деформации для закрепленного грунта для всех диапазонов нагрузок в обоих типах грунтов. Стоит также отметить отклонения значений модуля деформации для разных стадий приложения нагрузок, это может объясняться количеством проведенных испытаний. Среднее значение модуля деформации закрепленного песка выше почти в три раза, чем грунта в естественном состоянии. Для супеси среднее значение модуля деформации выше практически в пять раз.

4. Коэффициент сжимаемости при оттаивании закрепленного грунта в песке ниже в 2,5 раза, чем у исходного песка. Такой же характер наблюдается для супеси: коэффициент сжимаемости при оттаивании закрепленного грунта ниже в 4,5 раза. Стоит также отметить, что разница коэффициента сжимаемости при оттаивании закрепленных грунтов незначительна и составляет 15 %.

5. Во время проведения испытаний оттаивание закрепленного грунта не наблюдалось. Причиной этому возможно последствие реакции цемента с водой в образцах ГЦЭ, в результате которого жидкий или пластичный цементный клей превращается в цементный камень.

Результаты экспериментальных исследований указывают на отсутствие деформаций за счет оттаивания грунтоцемента, а также увеличение деформационных свойств после закрепления высокотемпературных мерзлых грунтов.

6. По результатам теплотехнического расчета одиночного ГЦЭ видно, что на 3 сутки с начала расчета в теле ГЦЭ диаметром 1,2 м температура составляет около плюс 3 °С, для ГЦЭ диаметром 0,6 м температура составляет около плюс 2,8 °С. Для дальнейших лабораторных исследований при выдержке образцов принята температура, равная 3 °С. Анализ результатов показывает, что в начале устройства ГЦЭ происходит полное оттаивание основания во всех вариантах расчета. Промерзание закрепленного грунта наступает раньше в случаях диаметра 0,6 м в обоих типах грунтов.

7. В ходе расчетно-аналитического исследования получены осадки на примере плитного фундамента габаритами в плане 24 × 24 м для песка в трех вариантах: при допущении оттаивания основания, при сплошном закреплении грунтового основания и при армировании основания ГЦЭ диаметром 1,2 м по квадратной сетке с шагом 2,4 × 2,4 м. В результате расчетов осадка основания на конец срока эксплуатации здания составила 0,701 м при допущении оттаивания, что в 4,5 раза больше полученной осадки при сплошном закреплении массива – 0,150 м. В результате расчетов в процентном отношении осадка основания при допущении оттаивания на конец срока эксплуатации здания на 30 % больше полученной осадки при армировании основания, которая составила 0,529 м. Основной эффект в улучшение деформационных свойств основания вносит практическое отсутствие осадки при оттаивании закрепленного массива.

8. Данная методика позволяет проводить закрепление и армирование высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов, способствует их оттаиванию и улучшению деформационных свойств.

Список литературы

1. СП 291.1325800.2017. Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ; 2017.
2. Алексеев А.Г., Зорин Д.В., Алексеенко В.А. Струйная цементация для устройства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 8. С. 27–32. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.08.27-32>. EDN: QFEFIL.
3. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Влияние преобразования грунтов криолитозоны на их температурное состояние в основании здания // *Жилищное строительство*. 2022. № 9. С. 12–17. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-9-12-17>. EDN: CUQFNP.
4. Зуев С.С., Каменских Е.М., Маковецкий О.А. О возможности применения технологии струйной цементации грунта в зоне многолетнемерзлых грунтов // *Жилищное строительство*. 2022. № 9. С. 32–39. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-9-32-39>. EDN: TXLBHM.
5. Малинин А.Г., Салмин И.А., Малинин Д.А. Устройство грунтоцементных элементов в мерзлых грунтах // *Фундаменты*. 2023. № 4(14)ю С. 30–35. EDN: ELBLMK.
6. Малинин А.Г., Салмин И.А., Колосов А.Г. Опытные работы по формированию грунтоцементных элементов в мерзлых грунтах // *Жилищное строительство*. 2023. № 9. С. 21–26. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-9-21-26>. EDN: PUUXDQ.
7. Методическое пособие по укреплению грунтов методами струйной цементации, глубинным перемешиванием, инъекции растворами на основе микроцементов, манжетной инъекцией в режиме гидроразрывов. Москва: Минстрой РФ; 2020, 89 с.
8. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. Москва: Российский институт стандартизации; 2021.
9. ГОСТ 12248.10-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия. Москва: Стандартинформ; 2020.
10. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2020.
11. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная версия СНиП 2.02.04-88. Москва: Стандартинформ; 2021.
12. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. Москва: Стандартинформ; 2016.
13. СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. Актуализированная версия СНиП 2.02.03-85. Москва: Российский институт стандартизации; 2022.
14. СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты. СНиП 3.02.01-87. Москва: Стандартинформ; 2017.

References

1. SP 291.1325800.2017. Armed grouted structures. Rules of architectural design. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russian).
2. Alekseev A.G., Zorin D.V., Alekseenko V.A. Jet-cementation for the construction of foundations on permafrost soils. *Industrial and civil engineering*, 2021, no. 8, pp. 27–32. (In Russian). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.08.27-32>. EDN: QFEFIL.
3. Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. The effect of the transformation of cryolithozone soils on their temperature state at the base of the building. *Housing Construction*, 2022, no. 9, pp. 12–17. (In Russian). <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-9-12-17>. EDN: CUQFNP.
4. Zuev S.S., Kamenskikh E.M., Makovetskiy O.A. On the possibility of applying the technology of jet grouting of soil in the zone of permafrost soils. *Housing Construction*, 2022, no. 9, pp. 32–39. (In Russian). <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-9-32-39>. EDN: TXLBHM.

5. Malinin A.G., Salmin I.A., Malinin D.A. Construction of soil-cement elements in frozen soils. *Foundations*, 2023, no. 4(14), pp. 30–35. (In Russian). EDN: ELBLMK.
6. Malinin A.G., Salmin I.A., Kolosov A.G. Experimental Works On The Formation Of Soil-Cement Elements In Frozen Soils. *Housing Construction*, 2023, no. 9, pp. 21–26. (In Russian). <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-9-21-26>. EDN: PUUXDQ.
7. Methodological guide for soil reinforcement using jet grouting, deep mixing, microcement-based injections, and hydraulic fracturing. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation; 2020, 89 p. (In Russian).
8. State Standard 30416-2020. Soils. Laboratory testing. General. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021. (In Russian).
9. State Standard 12248.10-2020. Soils. Determination of strain deformation parameters of frozen soils by compression testing. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).
10. State Standard 31108-2020. Common cements. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).
11. SP 25.13330.2020. Soils bases and foundations on permafrost soils. Updated version of SNiP 2.02.04-88. Moscow: Standartinform Publ.; 2021. (In Russian).
12. SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83*. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. (In Russian).
13. SP 24.13330.2021. Pile foundations. Updated version of SNiP 2.02.03-85. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021. (In Russian).
14. SP 45.13330.2017. Earthworks, grounds and footings. SNiP 3.02.01-87. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Васильевич Зорин, заведующий сектором сопровождения строительства на мерзлых грунтах, НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: zorinsved@mail.ru

Dmitry V. Zorin, Head of the Construction Support Sector for Frozen Soils, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: zorinsved@mail.ru

Павел Михайлович Сазонов
e-mail: sazonov-pm@yandex.ru
Pavel M. Sazonov
e-mail: sazonov-pm@yandex.ru

Вадим Валерьевич Хмызов*, инженер сектора сопровождения строительства на мерзлых грунтах, НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: khm.vadim@mail.ru

Vadim V. Khmyzov*, Engineer of the Sector for Support for Construction on Frozen Soils, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: khm.vadim@mail.ru

Татьяна Сергеевна Горбачева, техник сектора сопровождения строительства на мерзлых грунтах, НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: tat.g0rbacheva@yandex.ru

Tatyana S. Gorbacheva, Technician of the Sector for Support for Construction on Frozen Soils, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: tat.g0rbacheva@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author