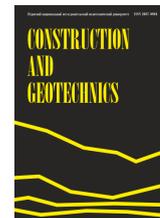




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 15, № 4, 2024

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.01

УДК 692.113 692.115

## ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ОТ УСТРОЙСТВА ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

В.А. Ильичев<sup>1</sup>, Н.С. Никифорова<sup>2</sup>, А.В. Коннов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Российская академия архитектуры и строительных наук, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Российская Федерация

### О СТАТЬЕ

Получена: 25 апреля 2024  
Одобрена: 12 сентября 2024  
Принята к публикации:  
05 ноября 2024

### Ключевые слова:

многолетнемерзлые грунты, струйная технология, криолитозона, тепловое воздействие, грунтоцементный элемент, гидратация бетона, теплотехнический расчет.

### АННОТАЦИЯ

Технология струйной цементации является перспективной технологией для применения в криолитозоне. Существующие методы устройства грунтоцементных элементов в многолетнемерзлых грунтах оказывают тепловое воздействие на окружающий грунтовый массив при оттаивании и твердении грунтобетона. Целью исследования было определение теплового воздействия устройства грунтоцементных элементов на многолетнемерзлые грунты при предварительном их оттаивании с помощью пара. Численным методом в программном комплексе Frost 3D осуществлено моделирование устройства грунтоцементных элементов диаметром 1200 мм в многолетнемерзлых песчаных грунтах и прогнозирование изменения температурного режима окружающего массива грунта. Повышение температуры в ходе устройства грунтоцементных элементов и твердения грунтобетона принято согласно натурным данным. Моделировалось единовременное выделение тепла всего грунтобетона. Определены размеры талой зоны, образующейся вокруг грунтоцементных элементов, спрогнозировано время смерзания элемента с окружающим массивом грунта и полного восстановления исходного температурного поля, которое оказалось меньше, чем при устройстве буроопускным способом сваи-оболочки диаметром 325 мм, заполняемой бетоном. В тех же условиях моделировалось устройство грунтоцементных элементов с различным шагом. Установлено расстояние между центрами элементов, при котором исключается увеличение сроков смерзания с окружающим грунтом в результате их теплового взаимодействия. Сделан вывод, что устройство грунтоцементных элементов в многолетнемерзлых грунтах при предварительном их оттаивании с помощью пара оказывает заметное влияние на окружающий грунтовый массив. При преобразовании по струйной технологии оснований в криолитозоне необходимо производить теплотехнический прогноз с учетом тепловыделения при предварительном оттаивании зоны закрепления и твердении грунтобетона.

© Ильичев Вячеслав Александрович – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, e-mail: [ilyichev@bk.ru](mailto:ilyichev@bk.ru).  
Никифорова Надежда Сергеевна – доктор технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: [n.s.nikiforova@mail.ru](mailto:n.s.nikiforova@mail.ru).  
Коннов Артем Владимирович – кандидат технических наук, e-mail: [konnov.sci@gmail.com](mailto:konnov.sci@gmail.com).

Vyacheslav A. Ilyichev – RAACS Academician, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: [ilyichev@bk.ru](mailto:ilyichev@bk.ru).  
Nadezhda S. Nikiforova – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: [n.s.nikiforova@mail.ru](mailto:n.s.nikiforova@mail.ru).  
Artem V. Konnov – Ph. D. in Technical Sciences, e-mail: [konnov.sci@gmail.com](mailto:konnov.sci@gmail.com).



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

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

## THERMAL IMPACT ON THE CONDITION OF SOILS IN THE PERMAFROST REGIONS DURING THE PRODUCTION OF JET GROUT ELEMENTS

V.A. Ilyichev<sup>1</sup>, N.S. Nikiforova<sup>2</sup>, A.V. Konnov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAACS), Moscow, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 25 April 2024  
Approved: 12 September 2024  
Accepted for publication:  
05 November 2024

#### Keywords:

permafrost soils, jet grouting, permafrost region, thermal impact, jet grout element, hydration of concrete, thermal forecast.

---

### ABSTRACT

Jet grouting technology is a promising technology for use in the permafrost regions. Existing methods of producing jet grout elements in permafrost soils have a thermal impact on the surrounding soil mass during thawing of the improving zone and hardening of the soil cement. The aim of the study was to determine the thermal effect of the jet grout elements production on permafrost soils during their preliminary thawing with steam. The numerical method in the Frost 3D software package is used to simulate the jet grout elements production and predict changes in the temperature regime of the surrounding soil mass. The temperature increase during the jet grout elements production and the hardening of the soil cement is considered according to the field data. The freezing time of the jet grout element with the surrounding soil mass and the complete restoration of the temperature distribution has been determined. It is concluded that installation of soil cement elements in permafrost soils, during their preliminary thawing with steam, has a noticeable thermal impact on the surrounding soil mass. When improving bases in the permafrost regions using jet technology, it is necessary to make a thermal forecast taking into account heat release during preliminary thawing of the improving zone and hardening of the soil cement.

---

## Введение

Преобразование грунтовых оснований при строительстве зданий и сооружений в криолитозоне можно рассматривать как конструктивное мероприятие, позволяющее обеспечивать их длительную эксплуатационную пригодность в условиях потепления климата [1]. Результаты исследований по применению технологии струйной цементации в мерзлых грунтах (Н.С. Никифорова, И.В. Бессонов, А.В. Коннов и др. [2], С.С. Зуев, О.А. Маковецкий и др. [3, 4], А.Г. Алексеев и др. [5], А.Г. Малинин и др. [6, 7]) говорят о перспективности применения данной технологии в криолитозоне.

Основной принцип данной технологии состоит в разрушении струей высокого давления грунта в скважине и смешивании его с цементным раствором с образованием грунтоцементных элементов (ГЦЭ), обладающих заданными прочностными и деформационными характеристиками.

При строительстве в криолитозоне по I принципу, предполагающему сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии, необходимо ограничивать тепловое воздействие на массив грунта при возведении геотехнических конструкций. Несоблюдение данных мер либо неучет выделения тепла в рамках теплотехнического прогноза могут приводить к таянию многолетнемерзлых грунтов и вызвать неравномерные осадки зданий и сооружений.

Например, при устройстве свай согласно п. 7.2.3. СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» в теплотехнических расчетах рекомендуется учитывать тепловое воздействие на массив грунта в ходе заполнения бетоном внутренней полости полых свай и применения раствора при устройстве буропускных свай.

Тепло выделяется не только в момент устройства бетонных конструкций в мерзлых грунтах, но и в течение промежутка времени после, когда бетон набирает прочность. Этот процесс сопровождается экзотермическую реакцию твердения (гидратации) бетона [8].

Тепловое воздействие на многолетнемерзлые грунты основания в процессе твердения бетона свайных фундаментов вносит значительный вклад в формирование температурного режима основания и, как следствие, его несущей способности [9,10]. Устройство буронабивных свай В.А. Ильичев с соавторами [11] рекомендуют в грунтах, имеющих температуру не выше  $-0,5$  °С, при отсутствии мощных подземных льдов, сильнольдистых торфяников и засоленных сильнольдистых грунтов. В исследованиях А.В. Рязанова и А.А. Усачева [9, 12, 13] рассмотрено тепловое воздействие устройства буронабивных свай и свай-оболочек на многолетнемерзлые грунты основания. Результаты расчетов показали, что время восстановления исходного температурного поля грунтов в зависимости от диаметра и шага свай (буроопускной способ) изменяется в широком диапазоне от 1 мес. до 4,2 г. [9]. С другой стороны, тепловыделение при гидратации может рассматриваться для применения в практических целях, в частности при подготовке основания для использования мерзлых грунтов по принципу II [14]. Существуют методики расчета тепловыделения при гидратации для прогнозных теплотехнических расчетов [9, 12, 15].

При устройстве грунтоцементных элементов также происходит тепловыделение, связанное с технологией их устройства и процессами твердения грунтобетона, что доказывалось натурными наблюдениями [6, 7]. Однако отсутствуют методики расчета теплового воздействия при устройстве ГЦЭ.

В настоящее время разработано несколько новых технологий, позволяющих устраивать ГЦЭ в многолетнемерзлых грунтах.

С.С. Зуевым, Е.М. Каменских и О.А. Маковецким для устройства ГЦЭ в условиях монолитных многолетнемерзлых грунтов было предложено производить оттаивание вертикальной цилиндрической зоны грунта с помощью установки подачи пара. Решение предполагает подавать пар через форсунки основного монитора установки. Затем в талой зоне возможно применение струйной технологии для формирования в грунте новых цементационных связей. Отобранные ими в ходе проведения опытных работ из тела ГЦЭ керны имели однородную структуру и высокие прочностные и деформационные характеристики (прочность при сжатии 6–8 МПа, секущий модуль деформации 1800–2000 МПа) [3].

Другую технологию без применения дополнительного оборудования предложили А.Г. Малинин, И.А. Салмин и А.Г. Колосов [6]. Техническое решение заключается в трехкратном выполнении струйной цементации по технологии jet-1 с выдержкой скважин в течение 30–40 мин. Результаты измерений при выполненных опытных работах в песчаных мерзлых грунтах показали, что трехкратная обработка скважины привела к повышению температуры до положительных значений на расстоянии до 0,3 м. После проведения работ была произведена откопка ГЦЭ, их диаметр составил 0,52–0,6 м. Также был разработан вариант данной технологии с использованием подачи горячей воды через струйный монитор [7], что позволило получить ГЦЭ большего диаметра. Вариант технологии с использованием горячей воды в рамках данной статьи не рассматривался.

Для технологии устройства ГЦЭ в многолетнемерзлых грунтах, предполагающей использование установки подачи пара, отсутствуют натурные и прогнозные данные по изменению температуры окружающего массива грунта после начала закрепления.

Цель исследования – определить тепловое воздействие устройства ГЦЭ в многолетнемерзлых грунтах при предварительном их оттаивании с помощью пара.

Была поставлена задача осуществить моделирование устройства ГЦЭ в многолетне-мерзлых грунтах с учетом повышения температуры в результате тепловых воздействий, возникающих при предварительном оттаивании зоны закрепления паром и протекании реакции гидратации в процессе твердения грунтобетона.

## Методика исследования

Моделирование осуществлялось численным методом в программном комплексе Frost 3D. В однородном массиве грунта, представленного песком мелким и средней крупности, среднесоленным, устраивался ГЦЭ диаметром  $d = 1200$  мм, длиной 2,2 м.

Теплофизические характеристики грунта: теплоемкость талого грунта  $C_{th} = 3,14 \times 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·°C), мерзлого грунта  $C_f = 2,34 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·°C), теплопроводность талого грунта  $\lambda_{th} = 2,5$  Вт/(м·°C), мерзлого грунта  $\lambda_f = 2,73$  Вт/(м·°C), температура фазового перехода  $T_{bf} = -0,7$  °C.

Для моделирования использовались климатические условия Якутска. Тепловое распределение по глубине грунта было определено в результате расчета модели в естественных условиях при условии сохранения энергетического баланса. Температура многолетне-мерзлого грунта  $-1,2$  °C. Толщина сезонно-талого слоя 2,2 м. Начало работ по устройству ГЦЭ было принято в феврале.

Для расчета повышения температуры при устройстве ГЦЭ были использованы данные полевых измерений сразу после завершения процесса оттаивания паром (таблица), полученные С.С. Зуевым и др. в ходе опытно-исследовательских работ [3]. В результате данных работ была сформирована вертикальная цилиндрическая зона талого грунта диаметром 1,2 м. Измерения температуры производились вдоль радиуса талой зоны с шагом 0,1 м на глубине 1 м от поверхности.

Значение повышения температуры грунтобетона в процессе твердения зафиксировано в результате опытных работ по формированию ГЦЭ в мерзлых грунтах, проведенных А.Г. Малининым и др. [6]. Наблюдения велись с помощью термокос на глубинах от 1 до 3 м на протяжении 45 сут. Приблизительно на 2–3-и сутки произошло значительное выделение тепла в процессе реакции гидратации. Максимально температура поднялась до значений  $+25$  °C.

Повышение температуры при устройстве ГЦЭ определялось суммированием температуры после предварительного оттаивания паром зоны закрепления и подъема температуры при твердении бетона (см. таблицу). Полученная температура задавалась в качестве исходной для ГЦЭ. Моделировалось единовременное выделение тепла всего грунтобетона.

### Изменение температуры в зависимости от расстояния до центра ГЦЭ

#### Temperature change depending on the distance to the center of the jet grout element

Расстояние от центра элемента, м	Температура после оттаивания грунта паром для устройства ГЦЭ [3], °C	Максимальная температура ГЦЭ с учетом тепловыделения при гидратации, °C
0	24	49
0,1	23	48
0,2	22	47
0,3	20	45
0,4	17	42
0,5	10	35
0,6	6	31

Теплопроводность ГЦЭ задавалась согласно значениям, определенным диэлькометрическим методом Н.С. Никифоровой и др. [2] для грунтоцемента, который был получен по струйной технологии в песчаном грунте.

## Результаты

В результате численного моделирования была получена зона грунта, оттаявшего вокруг ГЦЭ под тепловым воздействием от его устройства. Наибольший диаметр оттаявшего массива грунта достиг через 2 сут 1600 мм, и под ГЦЭ образовалась талая зона толщиной 0,25 м. Диаметр зоны теплового влияния от устройства ГЦЭ  $d_t$ , где произошло изменение температуры более чем на  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительно температуры окружающего грунтового массива, составил 3 м (рис. 1, а). Далее зона талого грунта сбоку от ГЦЭ стала уменьшаться, а под ГЦЭ увеличиваться и достигла толщины 0,4 м. Приблизительно через 2 мес. (64 сут) произошло смерзание боковой поверхности ГЦЭ с окружающим грунтом, а толщина талой зоны под ГЦЭ составила 0,35 м (рис. 1, б). Диаметр зоны теплового влияния  $d_t$  от устройства ГЦЭ составил 7,6 м. Через 3,5 мес. (105 сут) замерзла талая зона грунта под ГЦЭ и произошло его полное смерзание с массивом грунта. Полное восстановление исходного температурного поля массива грунта, вмещающего ГЦЭ, наблюдалось через 4,5 мес. Под восстановлением температурного поля понимается момент, когда полученные температуры отличаются от естественных (т.е. полученных без учета теплового воздействия) не более, чем на  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

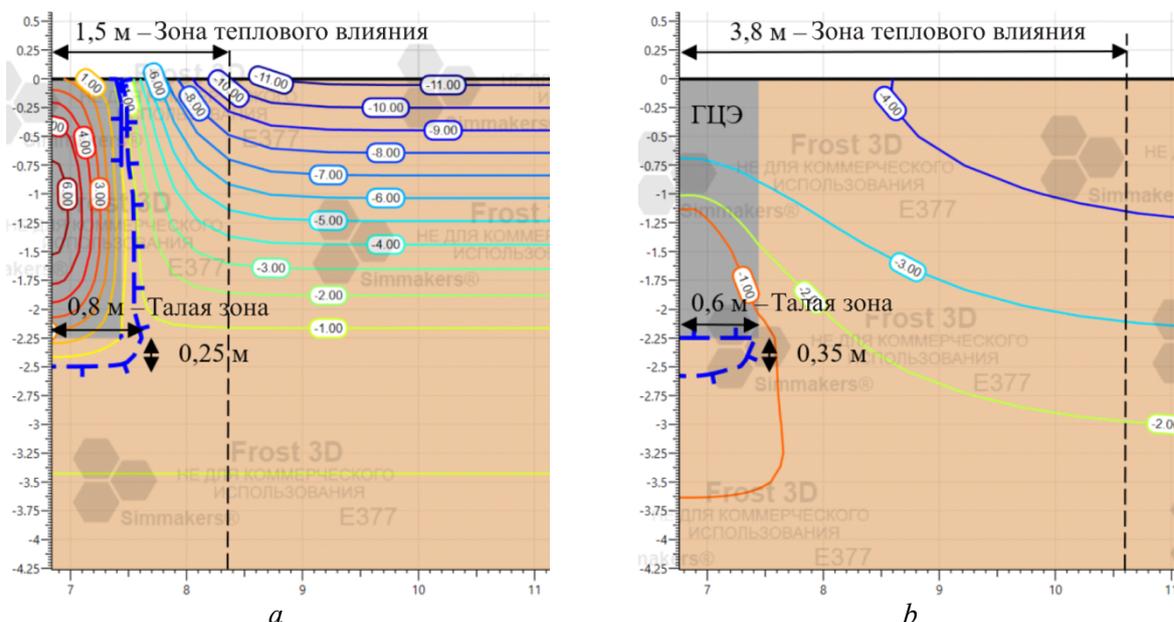


Рис. 1. Температурное распределение в грунтовом массиве, вмещающем ГЦЭ: а – через 2 сут (в феврале); б – через 64 сут (в апреле) после начала работ по его устройству.

Показана правая часть сечения расчетной зоны начиная от центра ГЦЭ

Fig. 1. Temperature distribution in the soil mass containing the jet grout element: а – after 2 days (in February); б – after 64 days (in April) since the start of work on its production

Было проведено численное моделирование теплового влияния на грунтовый массив от закрепления его двумя ГЦЭ. Расстояние между центрами элементов было выбрано равным 3 м (диаметр зоны теплового влияния, полученный через двое суток после устройства одиночного ГЦЭ) и 4,2 м (3,5  $d_t$ ). Было принято, что ГЦЭ устраиваются через короткий промежуток времени.

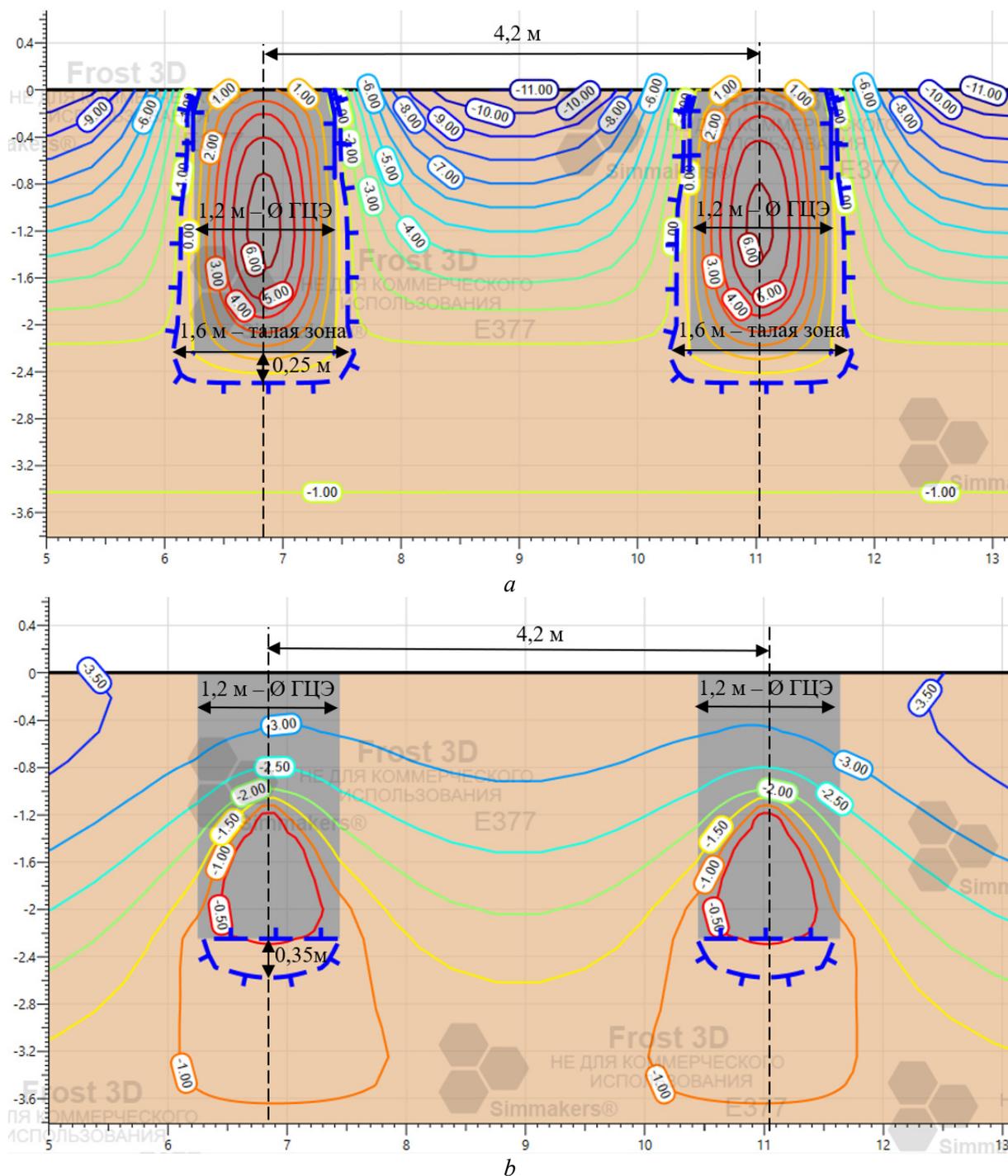


Рис. 2. Температурное распределение в грунтовом массиве, вмещающем ГЦЭ: *a* – через 2 сут (в феврале); *b* – через 2 мес. (в апреле) после начала работ по их устройству

Fig. 2. Temperature distribution in the soil mass containing the jet grout elements: *a* – after 2 days (in February); *b* – after 68 days (in April) since the start of work on their production

Моделирование показало, что в обоих случаях через 2 сут после устройства ГЦЭ размер талой зоны грунта (наибольший диаметр 1600 мм, толщина 0,25 м под подошвой элементов) не увеличился от взаимовлияния соседних ГЦЭ (рис. 2, *a*). При расстоянии между ГЦЭ 3 м возросло время, через которое происходит смерзание боковой поверхности элементов с окружающим грунтом (2,5 мес.), и время полного восстановления исходного температурного поля

массива грунта (5 мес.). При расстоянии 4,2 м – время полного смерзания и смерзания по боковой поверхности (рис. 2, *b*) ГЦЭ с окружающим грунтом, а также восстановления исходного температурного поля массива грунта аналогично полученному для одиночного элемента.

## Обсуждение

Для технологии устройства ГЦЭ в многолетнемерзлых грунтах, когда производится трехкратная струйная цементация для оттаивания грунта и достижения проектного диаметра, смерзание ГЦЭ с окружающим грунтом, по данным опытных работ А.Г. Малинина и др., произошло через 30–40 сут [6].

Полученное в результате прогнозирования большее время до смерзания ГЦЭ с окружающим грунтом в случае применения технологии с оттаиванием закрепляемого грунта паром (64 сут – смерзание по боковой поверхности, 105 сут – полное) связано с более высокой температурой закрепляемого массива до начала тепловыделения в процессе твердения грунтобетона. После трехкратного выполнения струйной цементации температура закрепленного массива составила от 0,2 до 5 °С [6], в то время как после оттаивания паром – от 6 до 24 °С. Сказывается также различие в диаметрах зоны закрепления: 0,6 и 1,2 м соответственно.

Необходимо заметить, что при анализе результатов опытных работ с многократной струйной цементацией в статье [6], вероятно, было рассмотрено время смерзания ГЦЭ с окружающим грунтом по боковой поверхности, так как не указаны данные по датчикам, находящимся под ГЦЭ. Кроме того, работы проводились за пределами криолитозоны, и ниже подошвы ГЦЭ должны были залегать талые грунты. По этим причинам время полного смерзания ГЦЭ с окружающим массивом грунта, скорее всего, составило бы более 40 сут.

Сравнение двух данных технологий устройства ГЦЭ в многолетнемерзлых грунтах показывает, что предварительное оттаивание грунтов паром оказывает более значительное тепловое воздействие на грунтовый массив, но позволяет получать ГЦЭ большего диаметра. При закреплении многолетнемерзлого основания по данной технологии необходимо учитывать сроки полного смерзания ГЦЭ с окружающим грунтом.

Полученное в результате численных исследований время восстановления исходного температурного поля массива грунта после устройства ГЦЭ (4,5 мес.) меньше, чем при устройстве буроопускным способом сваи-оболочки, заполняемой бетоном. При диаметре сваи 325 мм расчетное время составит 5 мес., при 530 мм – 8,4 мес. [9].

При исследовании теплового взаимовлияния от устройства двух ГЦЭ получено расстояние  $L = 4,2$  м ( $3,5 d$ ) между их центрами, при котором не увеличивается время смерзания элементов с окружающим грунтом. Диаметр зоны теплового влияния  $d_i$  от устройства одиночного ГЦЭ, определенный в момент смерзания боковой поверхности элемента с грунтом, составил 7,6 м. При условии расположения второго ГЦЭ на границе этой зоны расстояние между центрами элементов составит 4,4 м. Следовательно, на расстоянии  $L \geq 0,5d_i + 0,5d$  тепловое взаимовлияние от устройства элементов не будет приводить к увеличению сроков их смерзания с окружающим грунтом.

Направлениями дальнейших исследований являются рассмотрение теплового влияния на грунтовый массив от устройства ГЦЭ при различных инженерно-геологических условиях и технологических параметрах струйной цементации, а также уменьшение теплового воздействия от их выполнения путем управления температурным режимом многолетнемерзлых грунтов, в том числе с использованием охлаждающих устройств.

## **Выводы**

1. Проведено численное моделирование устройства грунтоцементного элемента в многолетнемерзлых песчаных грунтах с учетом повышения температуры при предварительном оттаивании зоны закрепления паром и твердении грунтобетона. Результаты моделирования показали, что полное смерзание ГЦЭ с окружающим массивом грунта происходит через 3,5 мес. после производства работ, причем смерзание по боковой поверхности происходит через 2 мес., а затем в течение 1,5 мес. сохраняется зона талого грунта под ГЦЭ. Полное восстановление исходного температурного поля массива грунта, вмещающего ГЦЭ, происходит через 4,5 мес. При данных инженерно-геологических условиях и диаметре ГЦЭ рекомендуется располагать элементы на расстоянии  $3,5 d$  между их центрами, исключая увеличение сроков смерзания с окружающим грунтом в результате их теплового взаимовлияния.

2. Устройство грунтоцементных элементов в многолетнемерзлых грунтах при предварительном их оттаивании с помощью пара оказывает заметное тепловое влияние на окружающий грунтовый массив. При преобразовании по струйной технологии оснований в криолитозоне необходимо производить теплотехнический прогноз с учетом тепловыделения при предварительном оттаивании зоны закрепления и твердении грунтобетона.

3. При закреплении многолетнемерзлого основания ГЦЭ, устроенных по данной технологии, необходимо учитывать сроки полного смерзания ГЦЭ с окружающим грунтом. Сократить время смерзания и уменьшить тепловое влияние от устройства ГЦЭ может уменьшение их диаметра или использование охлаждающих устройств.

***Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.*

***Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

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

## **Библиографический список**

1. Ильичев, В.А. Влияние преобразования грунтов криолитозоны на их температурное состояние в основании здания / В.А. Ильичев, Н.С. Никифорова, А.В. Коннов // Жилищное строительство. – 2022. – № 9. – С. 12–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-12-17

2. Экспериментальные исследования теплофизических свойств грунта, закрепленного методом струйной цементации / Н.С. Никифорова, О.А. Маковецкий, И.В. Бессонов, А.В. Коннов // Жилищное строительство. – 2023. – № 9. – С. 8–13.

3. Зуев, С.С. О возможности применения технологии струйной цементации грунта в зоне многолетнемерзлых грунтов / С.С. Зуев, Е.М. Каменских, О.А. Маковецкий // Жилищное строительство. – 2022. – № 9. – С. 1–8.

4. Маковецкий, О.А. Особенности применения технологии Jet-grouting в многолетнемерзлых грунтах / О.А. Маковецкий, С.С. Рубцова // Фундаменты. – 2022. – № 1. – С. 6–7.

5. Алексеев, А.Г. Струйная цементация для устройства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах / А.Г. Алексеев, Д.В. Зорин, В.А. Алексеенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 8. – С. 27–32. DOI: 10.33622/0869-7019/202108/27-32

6. Малинин, А.Г. Опытные работы по формированию грунтоцементных элементов в мерзлых грунтах / А.Г. Малинин, И.А. Салмин, А.Г. Колосов // Жилищное строительство. – 2023. – № 9. – С. 21–26.

7. Малинин, А.Г. Устройство грунтоцементных элементов в мерзлых грунтах / А.Г. Малинин, И.А. Салмин, Д.А. Малинин // *Фундаменты*. – 2023. – № 4(14). – С. 30–35.
8. Дворкин, Л.И. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 386 с.
9. Рязанов, А.В. Тепловое воздействие свай на многолетнемерзлые грунты основания / А.В. Рязанов, А.А. Усачев // *Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии: труды междунар. научн. конф., Москва, МГУ, 04.02.2021*. – С. 318–323.
10. Ning, Y. Heat transfer between concrete bored cast-in-place piles and surrounding frozen soil in ice-rich area / Y. Ning, Y. Tianlai // *Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering*. – 2020. – № 5(5). – P. 102–107. DOI: 10.11648/j.jcsee.20200505.11
11. Перспективы развития поселений Севера в современных условиях / В.А. Ильичев [и др.]. – М.: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2003. – 151 с.
12. Рязанов, А.В. Учет тепловыделения от буронабивных свай мостовых сооружений при прогнозных расчетах температур грунтов оснований / А.В. Рязанов, А.А. Усачев // *Мир дорог*. – 2021. – № 142. – С. 142–144.
13. Рязанов, А.В. Особенности расчета несущей способности буронабивных свай опор мостовых переходов в многолетнемерзлых грунтах / А.В. Рязанов, А.А. Усачев // *Мероприятия инженерной защиты в транспортном строительстве: материалы всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 16 июня 2023 г.* – Санкт-Петербург, Петергоф: Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева, 2023. – С. 20–26.
14. Кауркин, В.Д. Применение гидратационного тепловыделения бетона буронабивных свай при использовании грунтов основания по Принципу II / В.Д. Кауркин, А.И. Харичкин, А.В. Иоспа // *Вестник НИЦ «Строительство»*. – 2022. – № 3(34). – С. 103–113. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-3(34)-103-113
15. Скибина, Н.П. Учет тепловыделения при гидратации цемента в прогнозных расчетах температурного режима грунтов основания / Н.П. Скибина // *Комплексный инжиниринг в нефтегазодобыче: опыт, инновации, развитие: 5-я науч.-практ. междунар. конф., Самара, 16 июля – 17 2023 г.* / АО «Гипровостокнефть». – Самара: АО «Гипровостокнефть», 2023. – С. 902–931.

## References

1. 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. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*, 2022, iss. 9, pp. 12-17. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-12-17.
2. Nikiforova N.S., Makovetskiy O.A., Bessonov I.V., Konnov A.V. Experimental studies of the thermo-physical properties of soil fixed by the method of jet grouting. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*, 2023, iss. 9, pp. 8-13.
3. 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. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*, 2022, iss. 9, pp. 1-8.
4. Makovetskiy O.A., Rubtsova S.S. Features of application of Jet-grouting technology in permafrost *Fundamenty*, 2022, iss. 1, pp. 6-7.
5. Alekseev A.G., Zorin D.V., Alekseenko V.A. Jet-cementation for the construction of foundations on permafrost soils. *Industrial and civil engineering*, 2021, iss. 8, pp. 27-32. DOI:10.33622/0869-7019/202108/27-32.

6. Malinin A.G., Salmin I.A., Kolosov A.G. Experimental works on the formation of soil-cement elements in frozen soils. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*, 2023, iss. 9, pp. 21-26.
7. Malinin A.G., Salmin I.A., Malinin D.A. Production of soil-cement elements in frozen soils. *Foundations*, 2023, iss. 4(14), pp. 30-35.
8. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Raschetnoye prognozirovaniye svoystv i proyektirovaniye sostavov betona [Calculation forecasting of properties and design of concrete compositions]. Moscow, Infra-Inzheneriya, 2016, 386 p.
9. Ryazanov A.V., Usachev A.A. Thermal impact of piles on permafrost soils of the base // *New ideas and theoretical aspects of engineering geology: Proc. Of Int. Sc. Conf.* Moscow, MSU, 4 February 2021. pp. 318-323.
10. Ning Yan, Tianlai Yu. Heat Transfer Between Concrete Bored Cast-In-Place Piles and Surrounding Frozen Soil in Ice-Rich Area. *Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering*, 2020, iss. 5(5), pp. 102-107. DOI: 10.11648/j.jccee.20200505.11
11. Ilyichev V.A. [et al.]. Prospects for the development of settlements in the North in modern conditions. Moscow, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 2003, 151 p.
12. Ryazanov A.V., Usachev A.A. Accounting for heat release from bored piles of bridge structures in predictive calculations of base soil temperatures. *Mir dorog*, 2021, iss. 142, pp. 142-144.
13. Ryazanov A.V., Usachev A.A. Features of calculating the bearing capacity of bored piles of bridge crossing supports in permafrost soils // *Engineering protection measures in transport construction: proc. Of All-Russian Sc. Conf.* Saint Petersburg, 16 June 2023. pp. 20-26.
14. Kaurkin V.D., Kharichkin A.I., Iospa A.V. Application of the hydration heat of concrete bored piles when using foundation soils according to principle II (active method). *Vestnik NIC Stroitel'stvo*, 2022, iss. 3(34), pp. 103-113. DOI 10.37538/2224-9494-2022-3(34)-103-113.
15. Skibina N.P. Uchet teplovydeleniya pri gidratatsii tsementa v prognoznykh raschetakh temperaturного rezhima gruntov osnovaniya [Taking into account heat release during cement hydration in predictive calculations of the temperature regime of foundation soils] *Integrated Engineering in Oil and Gas Production: Experience, Innovation, Development: 5th Scientific and Practical International Conference*, 16-17 July, Samara, 2023, pp. 902-931.