

Струйная цементация для устройства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах

Андрей Григорьевич АЛЕКСЕЕВ^{1, 2}, кандидат технических наук, руководитель центра «Геокриологические и геотехнические исследования», доцент НИУ МГСУ, e-mail: adr-alekseev@yandex.ru

Дмитрий Васильевич ЗОРИН¹, инженер, e-mail: zorinsved@mail.ru

Валентин Андреевич АЛЕКСЕЕНКО³, начальник отдела геотехнических решений дирекции по реализации региональных проектов, e-mail: 9175961738@mail.ru

¹ НИИОСП им. Н. М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство», 109428 Москва, 2-я Институтская ул., 6

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

³ ООО «ПИК-Проект», 123242 Москва, Баррикадная ул., 19, стр. 1

Аннотация. Рассмотрена возможность применения технологии струйной цементации многолетнемерзлых грунтов для устройства фундаментов из грунтоцементных свай. Изложены результаты лотковых лабораторных испытаний по определению несущей способности грунтоцементных свай в мерзлом грунте. Представлены методика проведения исследований, примененные параметры струйной цементации, результаты статических испытаний фрагментов грунтоцементных свай в мерзлом грунте, а также результаты испытаний по определению прочности грунтоцемента, твердевшего при отрицательной температуре. Сделано предположение, что использование технологии струйной цементации в криолитозоне возможно и перспективно. В определенных геотехнических условиях применение рассмотренной технологии позволит сократить сроки строительства и снизить экономические затраты. Выявлены направления дальнейшего исследования данной технологии, к которым следует отнести проведение подробного анализа свойств грунтоцемента в талых и мерзлых грунтах с идентичными характеристиками, опытных полевых работ по устройству грунтоцементных свай в реальных условиях распространения многолетнемерзлых грунтов с использованием разных параметров струйной цементации и др.

Ключевые слова: грунтоцементная свая, струйная цементация, многолетнемерзлые грунты, свайный фундамент, статические испытания, несущая способность грунтоцемента.

JET-GROUTING FOR THE CONSTRUCTION OF FOUNDATIONS ON PERMAFROST SOILS

Andrey G. ALEKSEEV^{1,2}, e-mail: adr-alekseev@yandex.ru

Dmitry V. ZORIN¹, e-mail: zorinsved@mail.ru

Valentin A. ALEKSEENKO³, e-mail: 9175961738@mail.ru

¹ NIIOSP named after N. M. Gersevanov, Research Center of Construction, 2-ya Institutskaya ul., 6, Moscow 109428, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

³ PIK-Project, Barricadnaya ul., 19, str. 1, Moscow 123242, Russian Federation

Abstract. The possibility of using the technology of jet-grouting of permafrost soils for the construction of foundations from soil-cement columns is considered. The results of tray laboratory tests for determining the load-bearing capacity of soil-cement columns in frozen soil are presented. The research methodology, the applied parameters of jet-grouting, the results of static tests of fragments of soil-cement columns in frozen soil, the results of tests to determine the strength of soil-cement that hardened at negative temperature are described. The authors believe that the use of jet-grouting technology in the cryolithozone is possible and promising. In certain geotechnical conditions, the use of the technology will reduce the construction time and reduce economic costs. The directions of further research of this technology are identified, which should include a detailed analysis of the properties of ground cement in thawed and frozen soils with identical characteristics, experimental field work on the installation of ground cement piles in real conditions of the spread of permafrost soils using different parameters of jet cementation, etc.

Key words: jet-grouting, permafrost soils, pile foundation, static testing, bearing capacity.

Введение

Технология струйной цементации грунтов (jet-grouting) получила широкое распространение в

практике промышленного и гражданского строительства в части оснований и фундаментов на талых (не мерзлых) грунтах. При-

менение этой технологии при возведении вертикальных ограждений глубоких котлованов и усилении оснований сегодня счи-

1. Характеристики грунтов

Показатели	Песок средней крупности, влажный	Суглинок легкий, мягкопластичный
Влажность, %: $W/W_L/W_p$	17/-/-	18/20,5/13,3
Плотность, г/см ³ : $\rho/\rho_d/\rho_s$	2,12/1,81/2,65	1,84/1,46/2,7
Коэффициент пористости e , д. е.	0,46	0,84
Относительная влажность S_r , д. е.	0,78	0,56



Рис. 1. Струйная цементация мерзлых грунтов в лотках

тается стандартным решением [1–5]. Кроме того, возникают новые направления, к которым следует отнести устройство горизонтальных и вертикальных противодиффузионных завес, сооружаемых в обводненных грунтах, и др. [6, 7].

В настоящее время на территории России применяется несколько видов технологии струйной цементации грунтов, а именно:

- однокомпонентные технологии MiniJet и Jet 1 (давление подачи цементного раствора соответственно 15–20 и 40–45 МПа без применения сжатого воздуха) [8];
- двухкомпонентные технологии Jet2 и SuperJet (давление подачи цементного раствора 40–45 МПа с применением сжатого воздуха). Для технологии SuperJet используют насосы повышенной мощности с более долгим временем размыва грунта на интервале.

Выбор вида технологии струйной цементации грунтов обусловлен целью производства работ и инженерно-геологическими условиями площадки. Подробное описание различных режимов технологии струйной цементации приведено в монографиях [9, 10].

В то же время еще в 1970-х гг. разработан способ струйного размыва многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Данный способ применялся для образования скважин и уширений за счет подачи воды под высоким давлением. Установлено, что для разру-

шения мерзлых грунтов достаточно давления 20–40 МПа.

Цель настоящей исследовательской работы – определение возможности применения технологии струйной цементации в мерзлом грунте.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- проведение опытных работ по устройству грунтоцементных свай (ГЦС) в лотках, содержащих мерзлый грунт, с подбором параметров струйной цементации;
- исследование прочности при сжатии грунтоцемента, полученного в лотках с мерзлым грунтом;
- выполнение лотковых испытаний ГЦС статической вдавливающей нагрузкой с определением несущей способности по боковой поверхности;
- проведение сравнительного анализа результатов исследований и архивных данных.

Методика проведения исследований

Устройство ГЦС в лотках с мерзлым грунтом производилось на территории действующей строительной площадки в Москве (февраль 2019 г.) компанией ООО «ГеоСет». Предварительно подготовленные лотки в количестве четырех штук (Ø600 мм и высотой 1200 мм), заполненные мерзлым грунтом, помещали в траншею глубиной около 1,5 м (рис. 1). Опытные работы прово-

дились при средней температуре воздуха –5 °С.

Грунты внутри лотков предварительно утрамбовывались до достижения коэффициента уплотнения $K_{упл} = 0,95$ и замораживались. Для испытаний применяли два типа грунта: мерзлый песок средней крупности и мерзлый суглинок мягкопластичный. Характеристики грунтов, использованных при испытаниях, представлены в табл. 1.

При выполнении опытных работ по струйной цементации мерзлых грунтов в лотках применялось следующее оборудование:

- буровая установка Klemm-909;
- высоконапорный плунжерный насос Tesciwell TW400;
- миксерная станция Tesciwell TWM20;
- силос со шнековым транспортом;
- бак для хранения воды.

Подбор параметров струйной цементации

Проектный диаметр ГЦС и параметры струйной цементации подбирались на основании архивных данных и опыта производства работ в талых грунтах [11, 12].

Ввиду ограниченного размера лотков при устройстве свай принято решение применить однокомпонентную технологию MiniJet.

Параметры струйной цементации, подобранные в ходе прове-


Рис. 2. Испытательный стенд

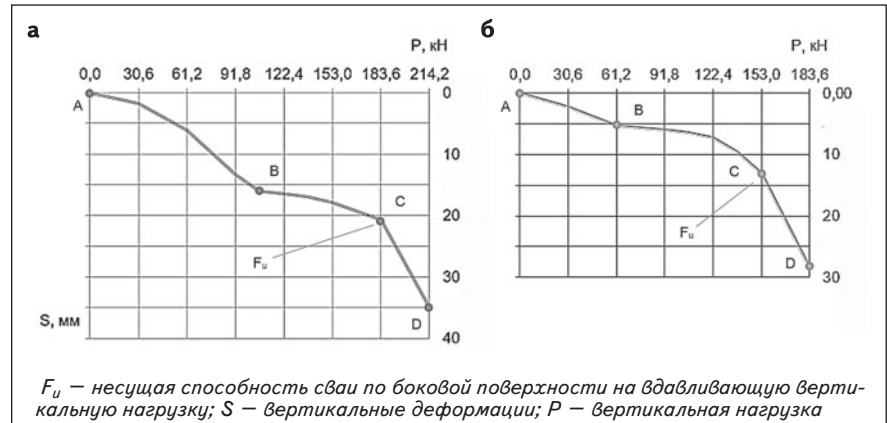
дения опытных работ, следующие:

технология.	MiniJet
проектный диаметр ГВС	
в талом грунте, мм	400
содержание цемента	
на 1 м ГЦС, кг/м.	100
то же, на 1 м ³ ГЦС, кг/м ³	796
количество форсунок, шт.	1
диаметр форсунок, мм.	3
давление нагнетания	
цементного раствора, МПа.	15
водоцементное соотношение.	1
скорость подъема монитора,	
см/мин	30
время обработки	
1 интервала, с.	8
скорость вращения монитора,	
об/мин	15
количество оборотов	
монитора на интервале, шт.	2
количество ходов плунжера	
в минуту	16

На следующий день после устройства опытных свай лотки изымали из траншеи и помещали в лабораторную морозильную камеру, воздух в которой поддерживался при заданной температуре $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты испытаний

По истечении 14 сут выдержки свай при отрицательной темпера-


Рис. 3. Результаты статических испытаний грунтоцементных свай в мерзлом песке (а) и мерзлом суглинке (б)

туре ($T = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$) проводились статические испытания ГЦС в двух лотках с мерзлым песком и суглинком по методике, изложенной в статье [13]. Длина ГЦС составила 1,2 м. Общий вид испытательного стенда представлен на рис. 2.

Нижняя часть лотка с мерзлым грунтом вырезалась для определения несущей способности только по боковой поверхности, без учета лобового сопротивления [14]. Для контроля статического давления на сваю использовали электронный манометр в гидравлической системе нагружения, деформации измеряли индикаторами часового типа.

Расчетную нагрузку, кН, определяли в соответствии с действующей нормативной документацией по формуле

$$F_u = R_{af} F_{af} \quad (1)$$

где R_{af} — расчетное сопротивление мерзлого грунта по боковой поверхности смерзания с ГЦС, кПа; F_{af} — площадь поверхности смерзания грунта с боковой поверхностью ГЦС, м².

При осредненном диаметре ГЦС $\varnothing 300$ мм в мерзлом песке нагрузка составила 153 кН. В суглинке для проведения испытаний использовалось то же значение.

Нагружение свай проводилось равномерно, без ударов, ступенями, равными 20 % наиболь-

шей нагрузки для первых трех ступеней, и 10 % — для последующих ступеней нагружения.

На каждой ступени нагружения отсчеты снимали по всем приборам для измерения деформаций в следующей последовательности: нулевой отсчет — перед нагружением свай, первый отсчет — сразу после приложения нагрузки, затем последовательно: через 30 мин, 1; 2; 4; 8; 16 и 24 ч, далее с интервалом 24 ч.

Каждая ступень нагружения выдерживалась до условной стабилизации деформации (осадки) свай, но не менее 24 ч. За критерий условной стабилизации деформации принималась скорость осадки свай на данной ступени нагружения, не превышающая 0,2 мм за последние 24 ч наблюдений.

Нагрузка доводилась до значения, при котором на данной ступени нагружения не происходило условной стабилизации деформации. Испытание на этой ступени нагружения заканчивалось после достижения значения осадки, не менее чем в 3 раза превышающего значение осадки на предыдущей ступени при общей осадке не менее 25 мм.

Результирующие графики зависимости вертикальных деформаций свай от нагрузки представлены на рис. 3.

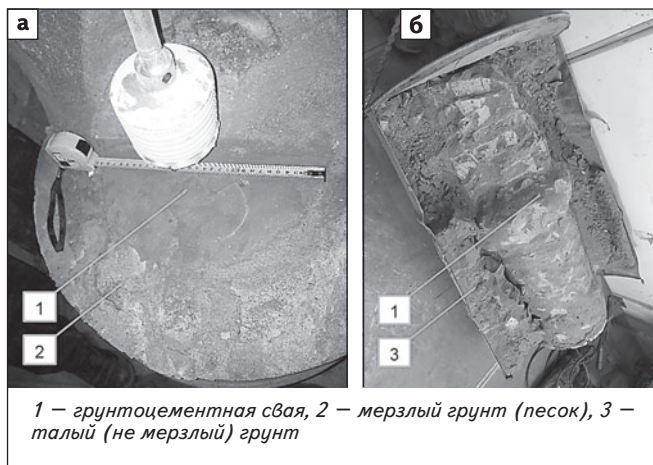


Рис. 4. Результаты вскрытия лотков после проведения испытаний

Несущая способность опытных свай, определенная в ходе статических испытаний в лотках, превысила расчетные значения. Средняя несущая способность 1 м ГЦС составила в мерзлом песке 184 кН, в мерзлом суглинке — 153 кН.

В ходе проведения анализа результатов статических испытаний было установлено:

- деформации, показанные на первых участках графиков А–В (см. рис. 3) до нагрузок 90–100 кН, возникли в результате сжатия материала ГЦС (предположительно грунтоцементной пульпы, которая обычно остается в оголовке ГЦС);
- при нагрузке, превышающей расчетную на 40 % в песке и 20 % в суглинке (участки графиков С–D, см. рис. 3), достигли критерия срыва сваи, изложенного в [13], что говорит о потере несущей способности сваи по грунту.

После проведения статических испытаний лотки вскрывали (разрезали в вертикальной плоскости) и производили анализ характера взаимодействия нагнетаемого под давлением цементного раствора с мерзлым грунтом. В результате экспериментально подтверждена возможность струйного размыва и цементации мерзлого грунта (рис. 4). Граница контакта ГЦС с многолетне-

мерзлым грунтом достаточно четкая, проникания цементного раствора за пределы ГЦС в мерзлый грунт отмечено не было.

Образованные в лотках ГЦС имели сплошную структуру. Осредненный диаметр ГЦС, выполненных в лотках с мерзлым песком, составил $\varnothing 250\text{--}350$ мм, в мерзлом суглинке — $\varnothing 150\text{--}250$ мм, при этом проектный диаметр ГЦС $\varnothing 400$ мм. В этой связи можно говорить о снижении эффективности размыва в мерзлом грунте по сравнению с талым (не мерзлым).

Из материала ГЦС подготавливали образцы (кубики) для испытаний по определению прочности при сжатии [15].

В ходе данных испытаний производилось:

- определение кубиковой прочности грунтоцемента $R_{ГЦ}$ и цементного раствора $R_{ЦР}$ марки М 500, набравших прочность при отрицательных температурах;
- проведение сравнительного анализа прочности кубиков цементного раствора и грунтоцемента.

При испытаниях использовали образцы номинальных размеров $70,7 \times 70,7 \times 70,7$ мм, которые выпиливали из тела грунтоцементных свай по достижении необходимого времени твердения (7, 14 и 28 сут).

Нагружение образцов прово-

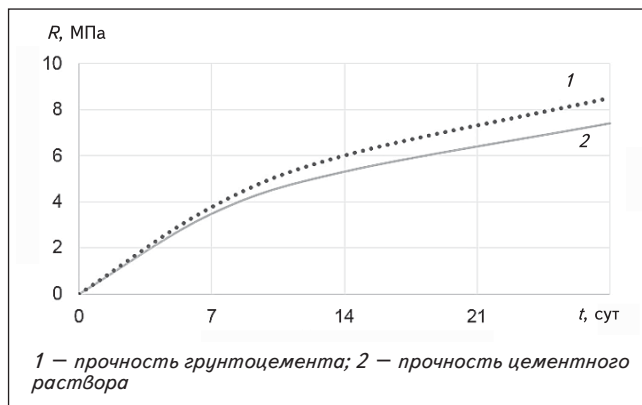


Рис. 5. Изменение прочности R цементного раствора марки М 500 и грунтоцемента в процессе всего срока твердения t ($T = -1$ °C)

дили непрерывно с постоянной скоростью нарастания нагрузки до их разрушения. При этом, время нагружения до разрушения образца составляло не менее 30 с. Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принималось за разрушающую нагрузку. Образец нагружали до разрушения при постоянной скорости нарастания нагрузки $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/с.

Прочность грунтоцемента при сжатии ($R_{ГЦ}$, МПа) вычисляли с точностью до 0,1 МПа по формуле

$$R_{ГЦ} = \alpha F/A, \quad (2)$$

где F — разрушающая нагрузка, кН; A — площадь рабочего сечения образца, мм^2 ; α — масштабный коэффициент для приведения прочности раствора к прочности в образцах базовых размеров и формы.

Образцы цементного раствора и ГЦС выдерживали при температуре -1 °C в процессе всего срока твердения. Результаты испытаний представлены на рис. 5.

Прочность грунтоцемента $R_{ГЦ}$, определенная на 28-е сут, составила от 7,7 до 9,8 МПа. Образцы (кубики) цементного раствора марки М 500, изготовленные отдельно, на 28-е сут набрали прочность $R_{ЦР} = 6,5$ МПа. Прочность грунтоцемента на 7-е сут твердения практически не отличается от прочности цемента марки М500.

Разность в значениях прочно-

сти грунтоцемента и цементного раствора объясняется объемом образцов, твердевших при отрицательной температуре (объем сваи 0,0589 м³ в течение большего времени находится при температуре выше 0 °С по сравнению с объемом образца (кубика) цемента 0,0004 м³). Заморозание поровой влаги в кубиках цементного раствора происходит намного быстрее, чем в грунтоцементных сваях, что сводит к минимуму возможность набора прочности.

Выводы

1. В ходе проведения работ по устройству опытных ГЦС в полевых условиях подобраны параметры струйной цементации мерзлых грунтов:

- расход цемента на 1 м ГЦС — 100 кг/м;
- давление нагнетания цементного раствора — 15 МПа;
- скорость подъема монитора — 30 см/мин.

При использовании данных параметров струйной цементации получены следующие диаметры ГЦС:

- в мерзлом песке средней крупности — 250–350 мм;
- в мерзлом мягкопластичном суглинке — 150–250 мм.

2. Несущая способность опытных свай, определенная в ходе проведения статических испытаний в лотках, превысила расчетные значения. Средняя несущая способность 1 м ГЦС составила в мерзлом песке 184 кН, а в мерзлом суглинке — 153 кН.

3. Образование сплошного ствола сваи и сохранение грунта в мерзлом состоянии позволяют говорить о возможности устройства ГЦС в многолетнемерзлом грунте путем струйного размыва цементным раствором.

4. Прочность $R_{ГЦ}$ кубиков грунтоцемента на 28-е сут с момента устройства ГЦС составила от 7,7 до 9,8 МПа. Хочется отметить, что средняя прочность образцов грунтоцемента в талых грунтах согласно табл. 5.1 СП 291.1325800.2017 «Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования» составляет:

- для песчаных грунтов — 5 МПа;
- для глинистых грунтов — 3 МПа.

Таким образом, эти данные свидетельствуют о достаточности полученных значений прочности для использования ГЦС в мерзлом грунте. Однако необходимо отметить, что полученная прочность может складываться из

прочности, набранной за счет гидратации цемента и за счет скрывания частиц грунта льдом [16]. В этой связи возникает вопрос о контактном сечении в ГЦС на границе ММГ и слоя сезонного оттаивания.

5. Анализ результатов испытаний позволил определить направления дальнейшего исследования данной технологии, к которым следует отнести:

- выполнение опытных полевых работ по устройству ГЦС в реальных условиях распространения ММГ с использованием разных параметров струйной цементации;
- применение предварительного размыва грунта водой при устройстве ГЦС;
- проведение подробного анализа свойств грунтоцемента, полученного в талых и мерзлых грунтах с идентичными характеристиками.

6. Направление данной исследовательской работы имеет большой потенциал развития. Проведенные исследования и полученные в ходе их выполнения результаты указывают на возможность применения технологии струйной цементации в многолетнемерзлом грунте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang Z. F., Shen S. L., Ho C.E., Kim Y. H. Jet grouting practice: an overview [Практика струйной цементации: обзор] // Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 44(4). Pp. 88–96.
2. Джантимиринов Х. А., Долев А. А. Опыт усиления основания сооружения с помощью струйной геотехнологии // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2006. № 1. С. 20–25. DOI: 10.1007/s11204-006-0018-2.
3. Njock P. G. A., Chen J., Modoni G., Arulrajah A., Kim Y. H. A review of jet grouting practice and development [Обзор практики и развития струйной цементации] // Arabian Journal of Geosciences. 2018. Vol. 11(16). DOI: 10.1007/s12517-018-3809-7.
4. Тер-Мартirosян З. Г., Струнин П. В. Усиление слабых грунтов в основании фундаментных плит с использованием технологии струйной цементации грунтов // Вестник МГСУ. 2010. № 4-2. С. 310–315.
5. Малинин П. А., Струнин П. В. Опыт строительства глубокого котлована с использованием технологии струйной цементации грунтов // Геотехника. 2013. № 2. С. 4–13.
6. Саинов М. П. Пространственная работа противofильтрационной стены // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5(57). С. 20–33. DOI: 10.5862/МСЕ.57.2.
7. Цой М. С.-Д., Алданов А. Г., Радченко В. Г. [и др.]. Возведение противofильтрационной завесы методом струйной цементации в основании плотины Сангтудинской ГЭС-1 // Гидротехническое строительство. 2008. № 5. С. 32–37.
8. Малинин П. А., Струнин П. В. Развитие и применение струйной цементации грунтов для устройства самозабуриваемых анкерных свай // Жилищное строительство. 2015. № 9. С. 50–54.
9. Малинин А. Г. Струйная цементация грунтов. Москва : Стройиздат, 2010. 226 с.

10. Бройд И. И. Струйная геотехнология. М. : АСВ, 2004. 440 с.
11. Shen S. L., Wang Z. F., Yang J., Ho C. E. Generalized approach for prediction of jet grout column diameter [Обобщенный подход для прогнозирования диаметра грунтоцементной колонны] // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2013. Vol. 139(12). Pp. 2060–2069. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000932.
12. Малинин А. Г. Влияние режимов струйной цементации на диаметр грунтоцементных колонн // Метро и тоннели. 2013. № 4. С. 30.
13. Alekseev A. G., Zorin D. V. Interaction of the auger-cast micropiles with permafrost [Взаимодействие буринъекционных микросвай с многолетнемерзлым грунтом] // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365(4). Pp. 042056. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042056.
14. Аксенов В. И., Кистанов О. Г. Оценка составляющих сопротивления осевой нагрузке свай, погруженных в мерзлый грунт // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2008. № 2 (45). С. 28–31. DOI: 10.1007/s11204-008-9001-4.
16. Alekseev A. G., Sazonov P. M., Zorin D. V., Vinogradova S. A. Application of pile foundations in structurally unstable soils [Применение свайных фундаментов в структурно-неустойчивых грунтах] // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 265. Pp. 05020. DOI: 10.1051/mateconf/201926505020.
17. Осипов А. М. Бетонирование при низких температурах // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-2(23). С. 161.

R E F E R E N C E S

1. Wang Z. F., Shen S. L., Ho C. E., Kim Y. H. Jet grouting practice: an overview. *Geotechnical Engineering*, 2013, vol. 44(4), pp. 88–96.
2. Dzhantimirov Kh. A., Dolev A. A. Use of jet geotechnology to strengthen the bed of a structure. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*, 2006, vol. 1(43), pp. 20–25. (In Russian). DOI: 10.1007/s11204-006-0018-2.
3. Njock P. G. A., Chen J., Modoni G., Arulrajah A., Kim Y. H. A review of jet grouting practice and development. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11(16). DOI: 10.1007/s12517-018-3809-7.
4. Ter-Martirosyan Z. G., Strunin P. V. Strengthening of weak soils at the base of foundation slabs using the technology of jet cementation of soils. *Vestnik MGSU*, 2010, vol. 4-2, pp. 310–315. (In Russian).
5. Malinin P. A., Strunin P. V. Experience in the construction of a deep pit using the technology of jet cementation of soils. *Geotekhnika*, 2013, vol. 2, pp. 4–13. (In Russian).
6. Sainov M. 3D performance of a seepage control wall in dam and foundation. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, 2015, vol. 5(57), pp. 20–33. (In Russian). DOI: 10.5862/MCE.57.2.
7. Tsoy M. S.-D., Aldanov A. G., Radchenko V. G. et al. Construction of an anti-filtration curtain by jet cementation at the base of the Sangtudinskaya HPP-1 dam. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*, 2008, vol. 5, pp. 32–37. (In Russian).
8. Malinin P. A., Strunin P. V. Development and application of jet cementation of soils for the device of self-drilling anchor piles. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2015, vol. 9, pp. 50–54. (In Russian).
9. Malinin A. G. *Struynaya tsementatsiya gruntov* [Jet cementation of soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2010, 226 p. (In Russian).
10. Broyd I. I. *Struynaya geotekhnologiya* [Jet geotechnology]. Moskva, Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov, 2004, 440 p. (In Russian).
11. Shen S. L., Wang Z. F., Yang J., Ho C. E. Generalized approach for prediction of jet grout column diameter. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, vol. 139(12), pp. 2060–2069. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000932.
12. Malinin A. G. Influence of jet cementation modes on the diameter of soil-cement columns. *Metro i tonneli*, 2013, vol. 4, pp. 30. (In Russian).
13. Alekseev A. G., Zorin D. V. Interaction of the auger-cast micropiles with permafrost. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 365(4), pp. 042056. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042056.
14. Aksenov V. I., Kistanov O. G. Estimation of resistance components to an axial load on piles embedded in permafrost. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*, 2008, vol. 2(45), pp. 28–31. (In Russian). DOI: 10.1007/s11204-008-9001-4.
16. Alekseev A. G., Sazonov P. M., Zorin D. V., Vinogradova S. A. Application of pile foundations in structurally unstable soils. *MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 265, pp. 05020. DOI: 10.1051/mateconf/201926505020.
17. Osipov A. M. Concreting at low temperatures. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2012, vol. 4-2(23), pp. 161. (In Russian).

Для цитирования: Алексеев А. Г., Зорин Д. В., Алексеенко В. А. Струйная цементация для устройства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 8. С. ??–??. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.08.??-??

For citation: Alekseev A. G., Zorin D. V., Alekseenko V. A. Jet-grouting for the construction of foundations on permafrost soils. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 8, pp. ??–??. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.08.??-??