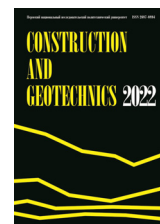




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 2, 2023

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.03

УДК 624.159.4

ОСОБЕННОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ СЛАБОСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ АВАРИЙНО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ИНЪЕКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ф.Н. Калач

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 12 января 2023
Одобрена: 22 марта 2023
Принята к публикации:
03 июля 2023

Ключевые слова:

инъекционное закрепление оснований, микроразрыв грунта, управляемый гидроразрыв, стабилизация грунтов.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время усиление грунтового основания часто выполняется высоконапорным инъецированием – нагнетанием раствора под давлением, превышающим структурную прочность грунта (режим гидроразрыва). Высоконапорное инъецирование позволяет успешно решать разные геотехнические задачи, однако имеет ряд недостатков, в первую очередь неопределенность формы и размеров инъекционных тел, создаваемых в грунтовом массиве, а также невозможность прогнозирования конечных деформационных и прочностных характеристик, необходимых для проектирования. Следует отметить, что непосредственно от производства инъекционных работ в режиме неуправляемого гидроразрыва наблюдаются непрогнозируемые технологические деформации (подъем с последующей неравномерной осадкой) объектов, основание которых стабилизируется, вследствие чего развиваются процессы трещинообразования в надземных конструкциях и фрагментарное разрушение несущих элементов.

В статье рассматривается возможность решения задачи прогнозируемого повышения механических свойств стабилизируемых грунтов на примере опытно-производственной площадки в центральном районе Санкт-Петербурга. Предлагаемый способ позволяет обеспечить отсутствие технологических деформаций от производства инъекционных работ путем использования авторской кинематической схемы производства работ и применения современных растворов на основе тонкодисперсных вяжущих в режиме пропитки с элементом микроразрыва грунта, т.е. в режиме управляемого гидроразрыва при пониженном давлении нагнетания инъекционного раствора.

© ПНИПУ

© Калач Филипп Николаевич – преподаватель, ведущий инженер, e-mail: fkalach@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8258-5182.

Filipp N. Kalach – Assistant Professor, Civil Engineer, e-mail: fkalach@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8258-5182.



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)

FEATURES OF STABILIZATION OF SOFT SOILS AT THE BASE OF EMERGENCY DEFORMED BUILDINGS USING FINELY POWDERED INJECTION MATERIALS IN LOW PRESSURE MODE

F.N. Kalach

Saint-Petersburg State Architectural and Civil Engineering University,
Saint Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 12 January 2023
Approved: 22 March 2023
Accepted for publication:
03 July 2023

Keywords:

injection consolidation of foundations, microdiscontinuity of soil, controlled hydraulic fracturing, ground stabilization.

ABSTRACT

At present, the strengthening of the soil base is often performed by high-pressure injection - injection of a solution under pressure that exceeds the structural strength of the soil (hydraulic fracturing mode). High-pressure injection makes it possible to successfully solve various geotechnical problems, but it has a number of disadvantages, first of all, the uncertainty of the shape and size of injection bodies created in the soil mass, as well as the impossibility of predicting the final deformation and strength characteristics necessary for design. It should be noted that directly from the production of injection works in the uncontrolled hydraulic fracturing mode, unpredictable technological deformations (rise followed by uneven settlement) of the Objects are observed, the base of which is stabilized, as a result of which crack formation processes in above-ground structures and fragmentary destruction of load-bearing elements develop.

The article considers the possibility of solving the problem of predictable increase in the mechanical properties of stabilized soils on the example of a pilot production site in the central region of St. Petersburg. The proposed method makes it possible to ensure the absence of technological deformations from the production of injection works by using the author's kinematic scheme for the production of works and the use of modern solutions based on fine binders in the impregnation mode with an element of soil microfracture, that is, in the mode of controlled hydraulic fracturing at a reduced injection pressure of the injection solution.

© PNRPU

Введение

При нагнетании инъекционного раствора в слабые водонасыщенные грунты с давлением, превышающим структурную прочность грунта, происходит нарушение сплошности массива грунта с заполнением образовавшейся полости инъекционной суспензией [1–4]. На практике образование гидроразрывов в грунте носит хаотичный характер, точно спрогнозировать направление, количество и размер тел, армирующих основание, не представляется возможным [5]. В результате нарушения природного сложения слабого водонасыщенного грунта основания путем нагнетания инъекционного раствора при давлениях 0,5–0,8 МПа происходит уплотнение окружающего массива грунта, что способствует временному повышению порового давления с возникновением неравномерных деформаций, сопровождающихся подъемом здания (рис. 1).

В зависимости от инженерно-геологических условий и конструктивных особенностей здания в течение 5–10 сут после нагнетания происходят диссипация нейтральных напряжений и в целом обратимые к первоначальному состоянию грунтового массива деформации [6]. В случае использования инъекционных растворов на основе цементного вяжущего дополнительным негативным фактором является свойство контракции раствора с возникновением последующих непрогнозируемых неравномерных осадок здания.

Стабилизация оснований зданий с использованием современных тонкодисперсных инъекционных материалов, позволяющих спрогнозированно повысить прочностные и деформационные свойства слабых грунтов, путем нагнетания раствора в режиме пропитки с элементом микроразрыва грунта, т.е. в режиме управляемого гидроразрыва при пониженном давлении нагнетания инъекционного раствора, позволяет исключить технологическое

влияние от процесса производства инъекционных работ и понизить чувствительность квазитропной дисперсной среды к внешним техногенным воздействиям.

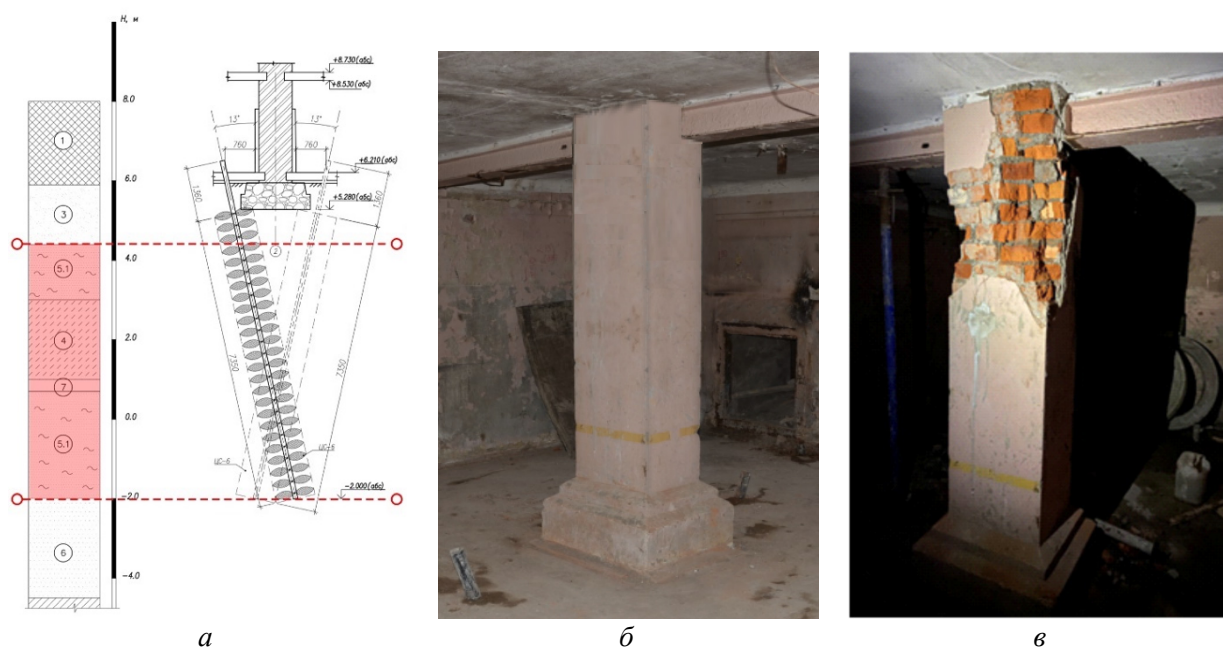


Рис. 1. Пример разрушения оголовка колонны в результате неконтролируемого нагнетания раствора в режиме гидроразрыва: *а* – проектное решение усиления основания колонны. Красным цветом обозначен диапазон водонасыщенных тиксотропных грунтов в основании; *б* – фотография колонны до начала инъекционных работ; *в* – фотография колонны после завершения работ через 3 сут
Fig. 1. Full-scale example of the destruction of the head of the column as a result of uncontrolled injection of the solution in the hydraulic fracturing mode: *a* – design solution for strengthening the base of the column, composed of water-saturated soil (range indicated in red); *б* – photograph of the column before the start of injection work; *в* – photograph of the column after completion of work after 3 days

Проблема широкого практического использования рассматриваемого способа сдерживается отсутствием научно обоснованной методики проектирования, достаточной апробацией данной технологии в натуральных условиях и относительно высокой стоимостью по сравнению с классическими методами цементации. Однако в случае корректного определения граничных условий применения предлагаемого способа, комплекса дополнительных лабораторных и полевых исследований, а также сравнения удельных затрачиваемых ресурсов рассматриваемый метод является более эффективным в рамках решения конкретных узкопрофильных инженерных задач для аварийно-деформированных зданий в условиях слабых грунтов основания и плотной городской застройки [7].

Формирование рабочей гипотезы и ее лабораторная проверка

В рамках поставленной задачи была сформирована гипотеза о наличии возможности пропитывать мелкие пески твердеющими растворами на основе микроцемента [8–10] со среднем диаметром частиц по массе 95% не более 0,005 мм при давлении, не превышающем 0,3 МПа, для исключения переупаковки частиц скелета грунта, т.е. без нарушения его структуры (рис. 2).

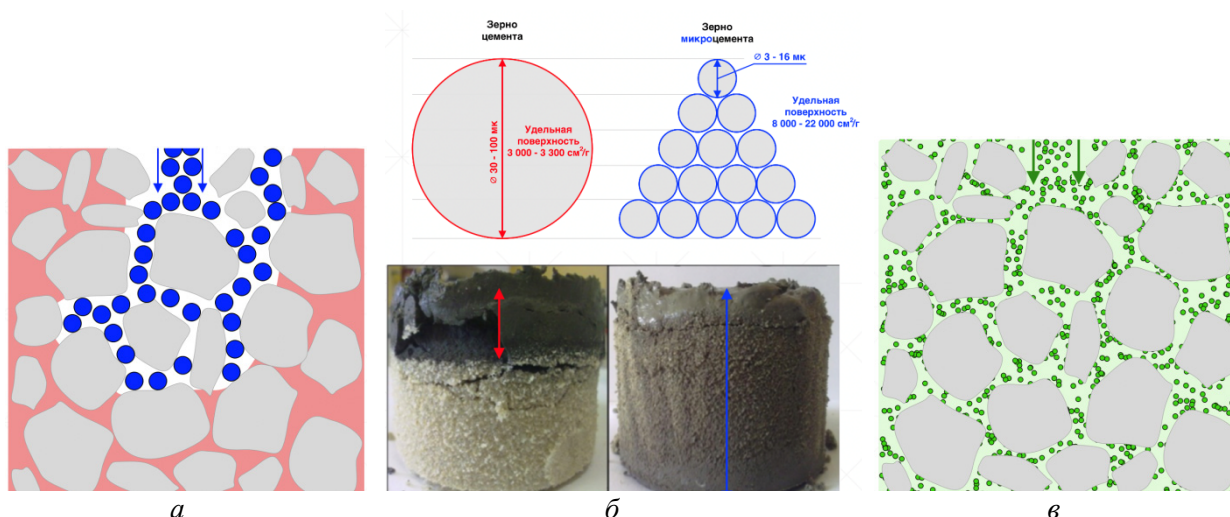


Рис. 2. Схема проникновения раствора в структуру грунта: *а* – структура грунта при нагнетании ПЦ500; *б* – лабораторный эксперимент на проникающую способность; *в* – структура грунта при нагнетании микроцемента

Fig. 2. Constructing and testing a hypothesis: *a* – soil structure during PTS500 injection; *b* – laboratory experiment on penetrating ability; *c* – soil structure during injection of microcement

Для проверки данной гипотезы были выполнены лабораторные исследования проникающей способности растворов на основе ПЦ500 при водоцементном соотношении $V/C = 0,8$ с добавкой $CaCl_2$ и на основе микроцемента со средним диаметром частиц до $0,005$ мм при водоцементном соотношении $V/C = 2,5$ на пресс-фильтре низкого давления по линейной схеме испытания.

Серия лабораторных испытаний проводилась на образцах мелкозернистого сухого грунта с низким содержанием пылеватых частиц (до 5 %). По результатам исследований отмечается, что при пропитке образцов грунта раствором на основе ПЦ500, в связи с соизмеримым диаметром частиц грунта ($0,07-0,15$ мм) и цементных частиц ($0,05$ мм), происходит кольматация части порового пространства, что препятствует дальнейшему распространению раствора – образец пропитался на $1/3$ высоты (см. рис. 2). При пропитке образцов грунта раствором на основе микроцемента, в связи с кратным отличием размера зерен минеральных частиц грунта ($0,07-0,15$ мм) и микроцемента ($0,005$ мм), пропитка образца грунта была выполнена на полную его высоту (см. рис. 2).

Серией лабораторных исследований была подтверждена гипотеза о возможности пропитки мелкозернистых песков. При этом обеспечение ламинарного движения инъекционного раствора является одним из основных критериев положительного результата, который достигается при постоянном давлении нагнетания, не превышающем структурную прочность грунта, на протяжении всего времени эксперимента. Оптимально подобранное V/C отношения для конкретных видов грунтов и использование добавок позволяет регулировать время первичного схватывания нагнетаемой инъекционной суспензии, что позволяет пропитывать грунт на протяжении длительного времени (более 15 мин) при постоянном давлении.

Методика и результаты полевого эксперимента

В 2022 г. на строительной площадке в историческом центре г. Санкт-Петербурга был организован опытно-исследовательский участок с целью оценки эффективности стабилизации толщи водонасыщенных тиксотропных грунтов по манжетной технологии нагнета-

нием инъекционного раствора на основе микроцемента со среднем диаметром частиц по массе 95 % до 0,005 мм и водоцементным отношением В/Ц = 3,0.

На опытном участке было выполнено устройство трех манжетных колонн под углом 5° к вертикальной оси, образующих в плане равносторонний треугольник с длиной стороны 700 мм (рис. 3). В манжетную колонну, в заданный интервал горизонта нагнетания, выполнялась установка двойного пакера (обтюратора) Ø 28 мм, оснащенного прижимными зажимами, которые расширяются и плотно удерживают пакер в манжетной колонне на заданном интервале. Для нагнетания раствора был использован инъекционный комплекс, обеспечивающий ламинарное движение инъекционного раствора при постоянном давлении нагнетания, с установленным на устье насоса манометром с ценой деления 0,05 МПа.

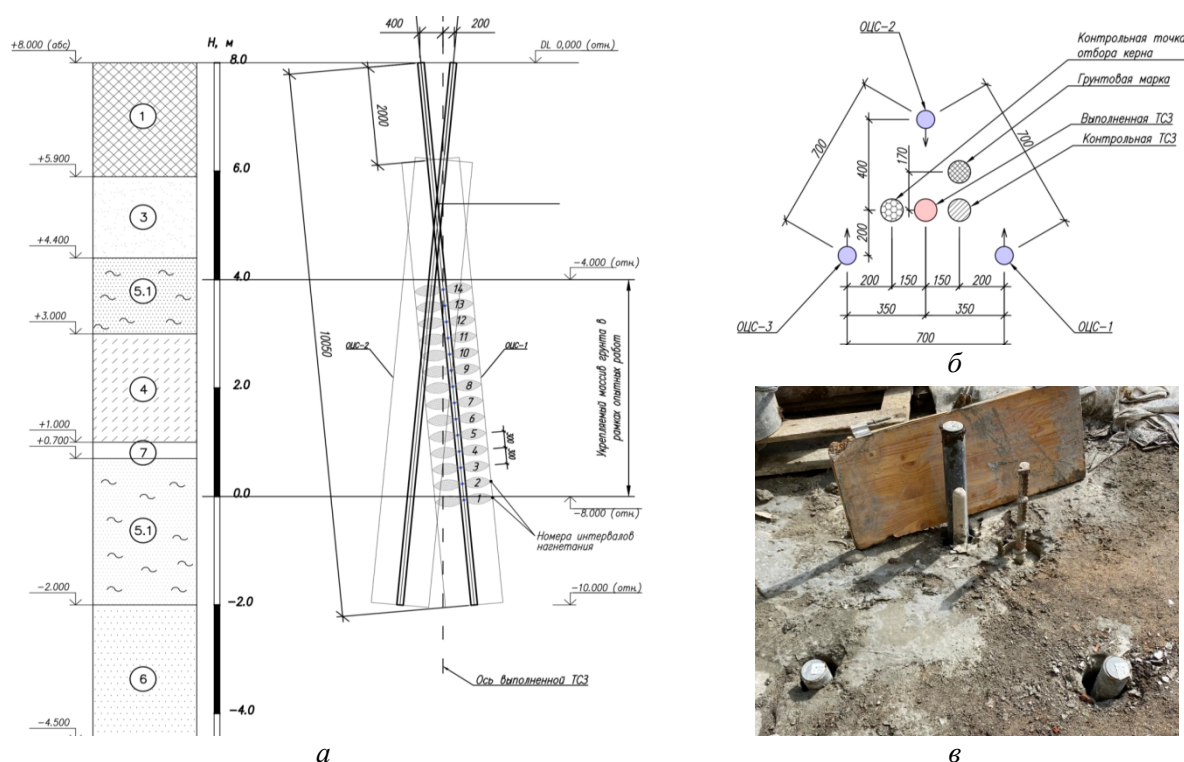


Рис. 3. Опытный участок в историческом центре г. Санкт-Петербурга: *а* – схема разреза инъекционных скважин с указанием характера напластования грунтов; *б* – схема плана инъекционных скважин с указанием методов контроля выполненных работ; *в* – фотография опытного участка
 Fig. 3. Experimental site in the historical center of St. Petersburg: *a* – a diagram of the section of injection wells indicating the nature of the bedding of soils; *б* – scheme of the plan of injection wells with indication of methods for monitoring the work performed; *в* – photograph of the experimental area

При проведении опытных работ был принят интервал закрепления грунтового массива, характеристики которого представлены в табл. 1, от а.о. 0,000 (отн. отм. –8,000) до а.о. +4,000 (отн. отм. –4,000) на основании ранее выполненных работ по статическому зондированию грунтов (рис. 4). Нагнетания выполнялось по 14 горизонтам для стабилизации толщи водонасыщенных тиксотропных грунтов.

Нагнетание выполнялось при следующих параметрах: начальное давление (для разрыва обойменного раствора) до 1,5 МПа, рабочее давление нагнетания принято от 0,1 до 0,3 МПа с расходом инъекционного раствора в диапазоне 0,5–5 л/мин. За отказ на горизонте нагнетания было принято давление 0,4 МПа или общий расход 50 л (в рамках опытных работ).

Таблица 1

Физические свойства и гранулометрический состав грунта основания

Table 1

Physical properties and grading of the base soil

ИГЭ	ρ , г/см ³	e	W	I_L	ϕ , град	c , кПа	E , МПа	Наименование грунта
ИГЭ-5.1	1,92	0,741	–	–	26	2	11	Пески пылеватые средней плотности серые насыщенные водой с растительными остатками, тиксотропные
ИГЭ-4	1,93	0,789	0,29	1,08	13	9	9,0	Супеси пылеватые с прослоями песка с растительными остатками, тиксотропные
ИГЭ-7	1,63	1,533	0,60	0,85	–	–	2,5	Слабозаторфованные грунты черные, насыщенные водой

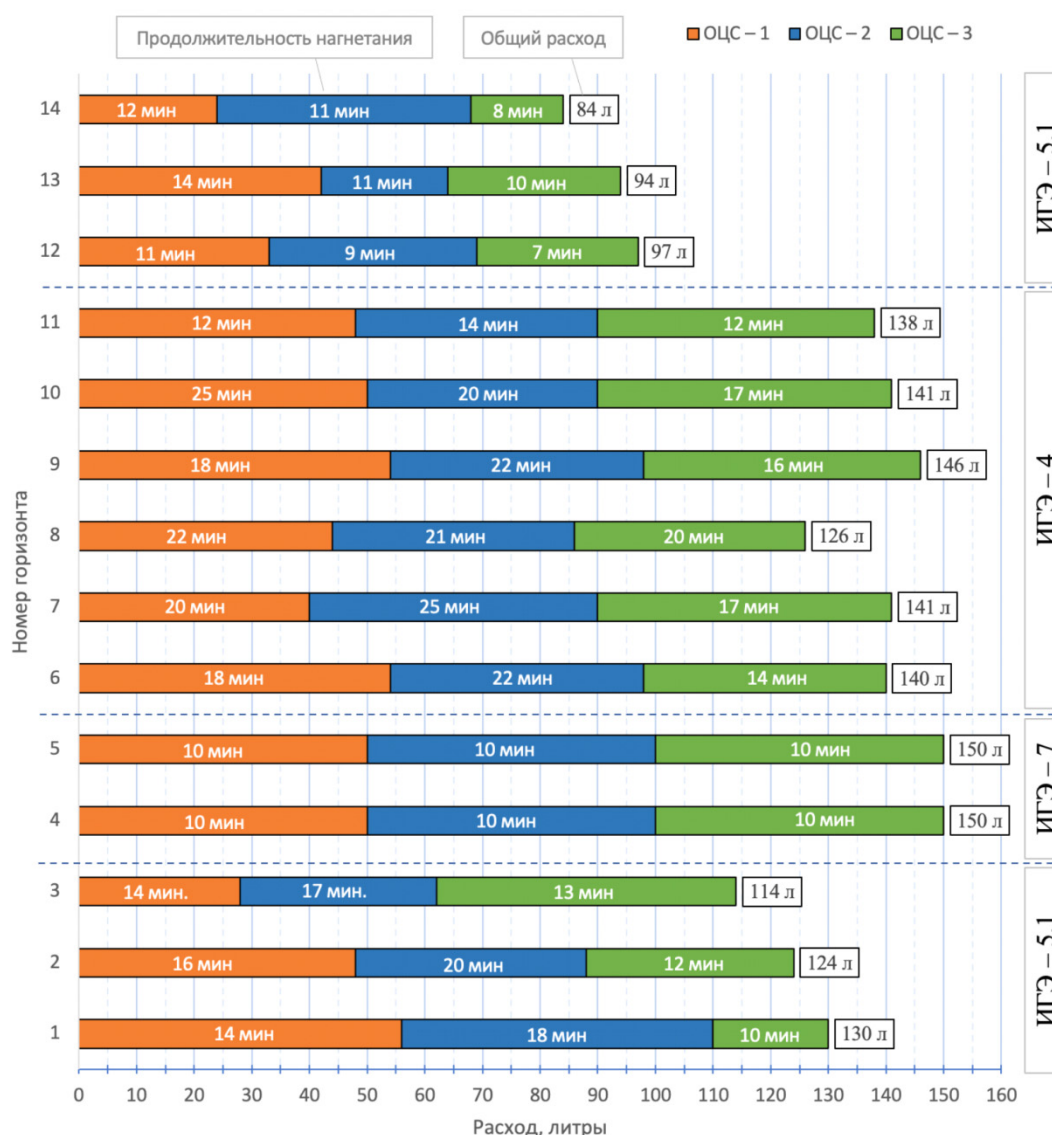


Рис. 4. Контролируемые параметры при выполнении опытно-исследовательских работ при давлении нагнетания от 0,1 до 0,3 МПа (ИГЭ – инженерно-геологический элемент, ОЦС – объем цементной смеси)

Fig. 4. Controlled parameters when performing experimental research at discharge pressure from 0,1 to 0,3 MPa

Давление инъекционного раствора контролировалось по показаниям поверенного манометра, установленного на шланге пакера-инъектора на расстоянии десяти метров от места подачи раствора в заданный горизонт нагнетания. Установка манометра в данное место обусловлено технологическим аспектом: при установке манометра на меньшее расстояние он будет препятствовать погружению пакера на требуемую глубину в скважину. Объем нагнетаемого инъектированного раствора в грунт контролировался по изменению уровня раствора в баке инъекционного комплекса (см. рис. 4).

Для оценки эффективности стабилизации грунтового массива использовались следующие методы (см. рис. 3):

1. Статическое зондирование грунта на полную глубину закрепления до и через один календарный месяц после стабилизации массива грунта.

2. Контрольное бурение через один месяц с отбором керна с опытной площадки на полную глубину закрепления для последующего исследования выбуренных монолитов грунта в аккредитованных лабораториях СПбГАСУ.

3. Обустройство и контроль высотного положения грунтовой марки до, в процессе и после стабилизации массива грунта. Грунтовая марка устраивалась непосредственно в зоне опытного участка ниже глубины промерзания грунта.

Анализ результатов статического зондирования выполнялся путем наложения графиков, полученных до и после инъекционного закрепления толщи водонасыщенных тиксотропных грунтов мощностью 4 м раствором на основе тонкодисперсного цементного вяжущего (рис. 5).

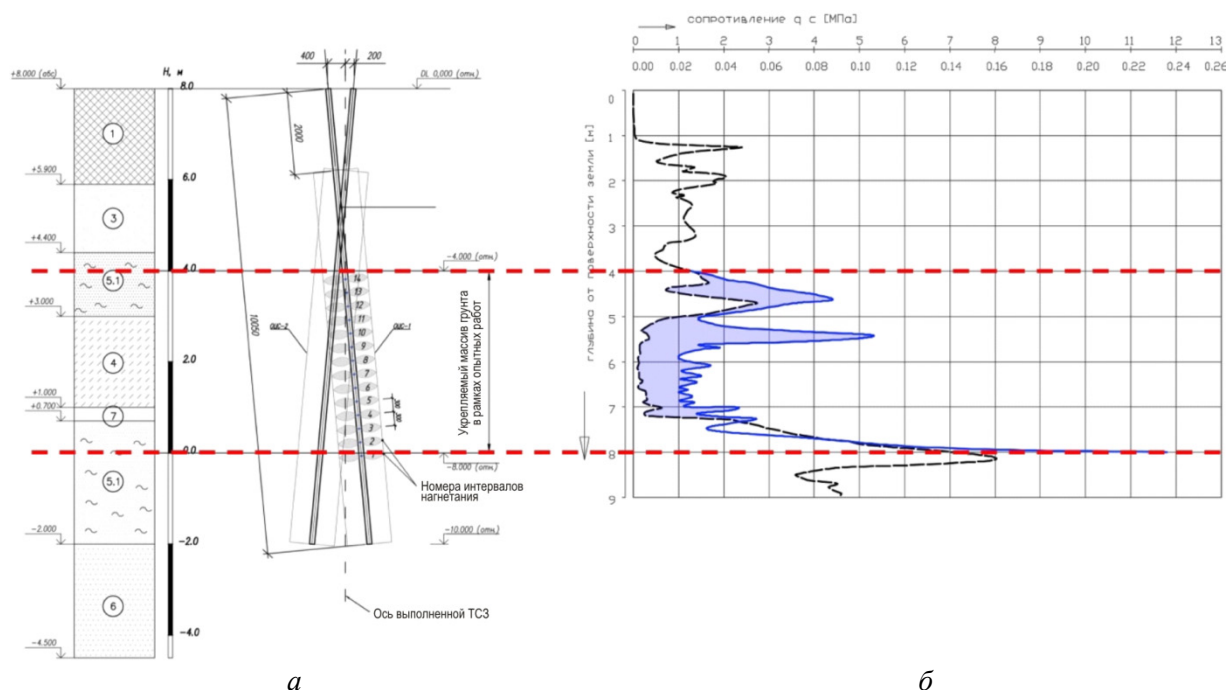


Рис. 5. Схема и результаты статического зондирования грунтов в сопоставлении с толщиной закрепляемого грунта: *а* – схема разреза инъекционных скважин с указанием характера напластования грунтов; *б* – график лобового сопротивления погружения зонда при выполнении статического зондирования (черный – природное состояние; синий – через месяц после завершения работ)

Fig. 5. Graph of static sounding of soils in comparison with the thickness of the fixed soil: *a* – a diagram of the section of injection wells indicating the nature of the bedding of soils; *b* – graph of the frontal resistance of the probe immersion during static sounding (black – natural state; blue – one month after completion of work)

По результатам анализа графика статического зондирования отмечено увеличение значения лобового сопротивления q_c погружения зонда в рассматриваемой толще грунтов с 0,16 до 1,08 МПа (см. рис. 5), что косвенно свидетельствует о повышении механических характеристик стабилизируемых грунтов. Черный график – природное состояние; синий график – через 39 сут после выполнения работ по закреплению.

При контрольном бурении, через 40 сут после завершения работ на опытном участке, был отобран монолит грунта для анализа фактического содержания частиц цементного вяжущего в закрепляемом массиве прямыми методами. Проба отобранного грунта высушивалась в печи при температуре 105 °С на протяжении суток, истиралась в агатовой ступке, после чего подготовленный материал помещался в кювету.

Первый метод исследования заключался в оценке рентгеновских спектров, полученных в результате рассеивания излучения на кристаллических решетках исследуемого материала. Для проведения анализа использовался порошковый дифрактометр D2 PHASER (BRUKER). Для сравнения на рис. 6 представлена рентгенограмма «чистого» цемента (график черного цвета). Из рассмотрения графиков следует, что характеристическое излучение для цементов, соответствующее характерным клинкерным минералам, совпадает с исследуемым образцом грунта (интенсивность дифракционных максимумов грунтов находится в одном диапазоне), что качественно свидетельствует о наличии цементных частиц в массиве грунта.

Второй метод исследования заключался в определении наличия в пробах грунта гидроксида кальция, содержание которого характерно для гидратированных цементов. Навески исследуемых грунтов были помещены в конические колбы вместимостью 250 мл, после чего было добавлено 150 мл дистиллированной воды, затем был произведен нагрев в течение 7 мин до температуры кипения, после полученный раствор был охлажден до температуры 20 °С. После того как раствор «отстоялся» (дисперсные частицы осели), в водную вытяжку было добавлено две-три капли 1% спиртового раствора фенолфталеина. В результате произошло изменение цвета на розовый, что соответствует щелочной среде и качественно свидетельствует о наличии цементных частиц в массиве грунта (рис. 6).

Лабораторные исследования по определению физических, прочностных и деформационных характеристик выполнялись в грунтовой лаборатории кафедры геотехники СПбГА-СУ, где в качестве референсного грунта были выбраны супеси пылеватые тиксотропные (ИГЭ-4), в табл. 2 и 3 приведен сравнительный анализ характеристик.

По результатам комплексного анализа изменения физическо-механических характеристик референсного грунта зафиксировано повышение деформационных характеристик до 1,5 раз, прочностных – в среднем до 3 раз. При этом отмечено, значительное понижение влажности грунта до 1,7 раз, числа пластичности – до 1,4 раз и показателя текучести – до 1,5 раз. Зафиксированные изменения свидетельствует о переходе рассматриваемого грунта из текучей консистенции в пластичную.

Таблица 2

Приращение прочностных и деформационных характеристик ИГЭ-4

Table 2

Increment of strength and deformation soil characteristic
of geological engineering element № 4

Параметр	Природное состояние	После закрепления	Δ , раз
Модуль деформации, E	9 МПа	13 МПа	1,45
Угол внутреннего трения, φ	13°	32°	2,46
Сцепление, c	9 кПа	28 кПа	3,12

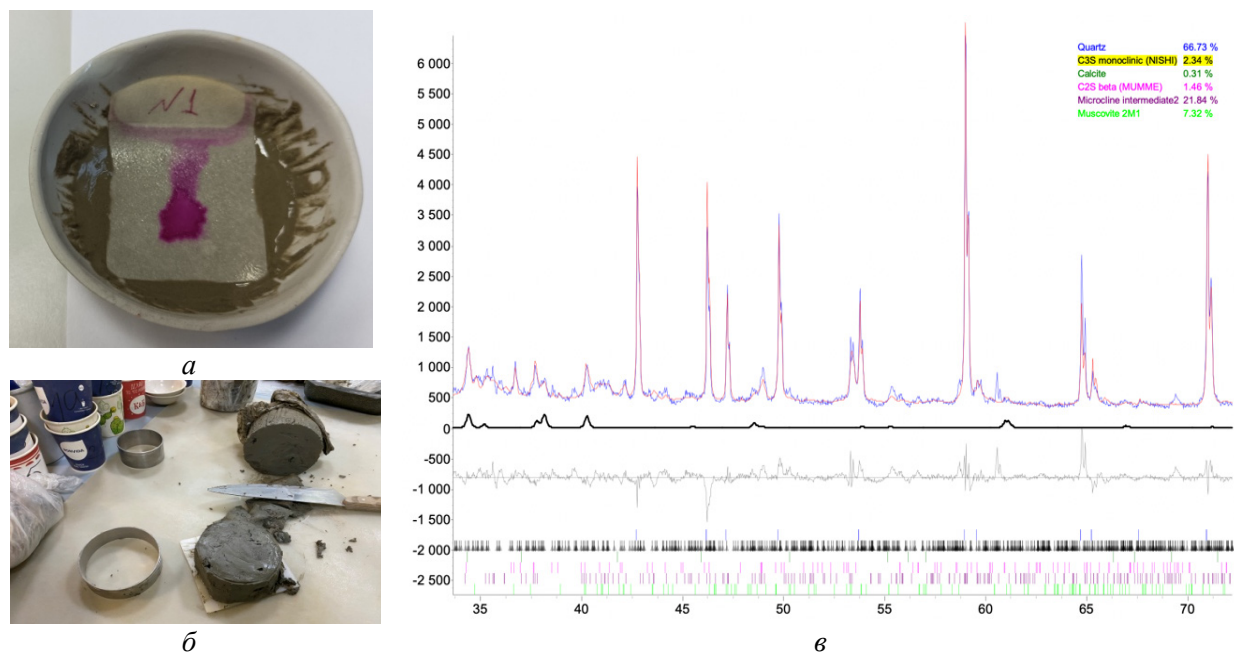


Рис. 6. Лабораторные исследования закрепленного грунта: *а* – химический анализ наличия цемента в грунте; *б* – исследования в грунтовой лаборатории; *в* – рентгенограмма образца грунта, отобранного с глубины 7 м
 Fig. 6. Laboratory studies of fixed soil: *a* – chemical analysis of the presence of cement in the soil; *б* – research in the soil laboratory; *в* – radiograph of a soil sample taken from a depth of 7 m

Таблица 3

Изменение физических характеристик ИГЭ-4

Table 3

Modification of physical properties soil characteristic of geological engineering element № 4

Физические свойства в природном состоянии					
Влажность, дол. ед.	Число пластичности, дол. ед.	Плотность, г/см ³		Коэффициент пористости, дол. ед.	Показатель текучести, дол. ед.
		грунта	частиц		
<i>W</i>	<i>I_p</i>	ρ	ρ_s	<i>e</i>	<i>I_L</i>
0,293	0,059	1,93	2,69	0,818	1,08
Физические свойства после закрепления					
Влажность, дол. ед.	Число пластичности, дол. ед.	Плотность, г/см ³		Коэффициент пористости, дол. ед.	Показатель текучести, дол. ед.
		грунта	частиц		
<i>W</i>	<i>I_p</i>	ρ	ρ_s	<i>e</i>	<i>I_L</i>
0,176	0,042	2,01	2,74	0,612	0,748

Важнейшими внутренними факторами [10–13], определяющими пространственную плотность и прочность структуры грунта, являются влажность и физико-химическая активность [14]. На основании вышеизложенного следует полагать, что уменьшение в 1,7 раза влажности грунта снижает чувствительность дисперсной среды к внешним техногенным (динамическим) воздействиям [15].

Одним из главных оцениваемых параметров является технологическая деформация непосредственно от производства инъекционных работ [16, 17]. Грунтовая марка (см. рис. 3) устраивалась в зоне опытного участка на глубине 2 м от планировки поверхности. На осно-

вании произведенных геодезических наблюдений высотного положения грунтовой марки в процессе выполнения работ по инъекционному нагнетанию твердеющего состава технологические деформации (подъем/осадка) не были зафиксированы (табл. 4).

Таблица 4

Результаты мониторинга грунтовой марки

Table 4

Monitoring of deformation control benchmark

Цикл 0 (начало отсчета)	Цикл 1 (1-я неделя)	Цикл 2 (2-я неделя)	Цикл 3 (3-я неделя)	Цикл 4 (4-я неделя)	Цикл 5 (5-я неделя)
0 мм	0 мм	+1 (1 мм)	0 (1 мм)	- 1 (0 мм)	0 (0 мм)

Примечание: в скобках указано суммарное перемещение грунтовой марки.

Технология стабилизации слабых грунтов в основании аварийно-деформированных зданий

Основой положительного результата при выполнении данных видов работ является строгое соблюдение технологии производства работ по бурению скважин и инъекционному нагнетанию с соблюдением одного из определяющих критериев обеспечения качества – ламинарного движения инъекционного раствора при постоянном заданном давлении нагнетания на протяжении всего времени подачи раствора через пакер-инжектор.

На основании опыта успешно реализованных объектов автором совместно с научным коллективом кафедры геотехники СПбГАСУ разработана принципиальная кинематическая схема производства работ, обеспечивающая удовлетворение предъявляемых требований к рассматриваемой технологии (рис. 7).

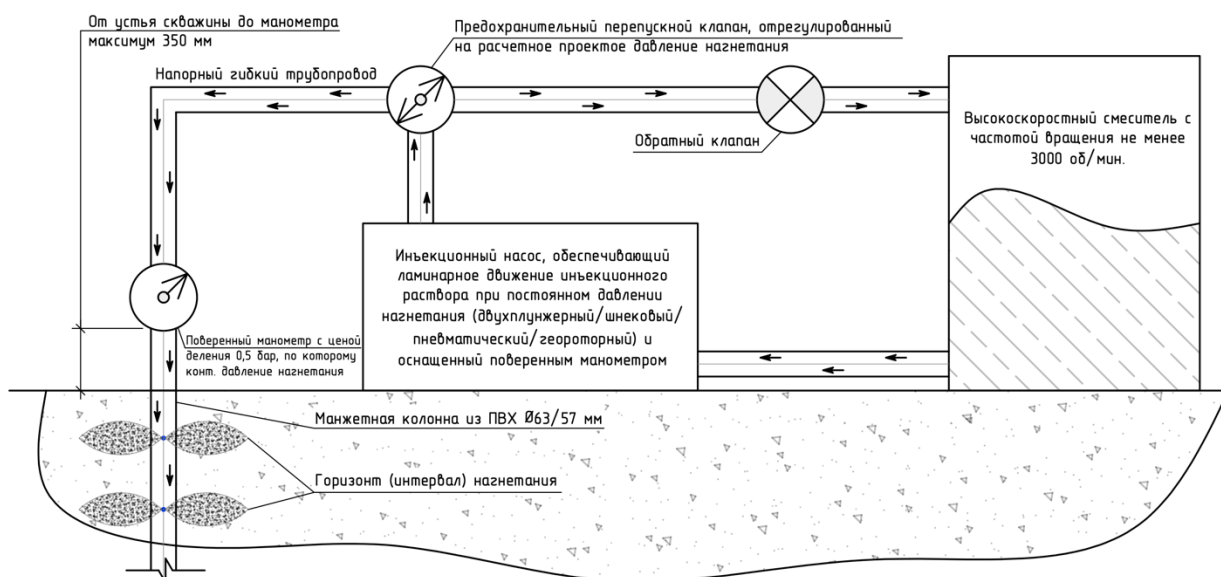


Рис. 7. Кинематическая схема производства работ по стабилизации грунтов

Fig. 7. Kinematic scheme of soil stabilization works

Следует отметить, что, помимо вышеуказанного критерия обеспечения качества выполняемых работ, существует ряд не менее важных требований:

- привлечение высококвалифицированных организаций, производящих работы и сопровождающих их;
- операционный, входной, приемочный контроль качества, а также контроль исправности оборудования, соответствие технологических режимов нагнетания и т.д.;
- полнота и достоверность инженерно-геологических изысканий;
- оценка изменения физико-механических свойств грунтов до и после выполнения работ на опытных участках для возможности апробирования и уточнения технологических параметров;
- регулярный геотехнический мониторинг с интерактивным наблюдением за напряженно-деформированным состоянием массива грунта, слагающего основание, и оценкой общего технического состояния здания;
- комплексный анализ контролируемых при нагнетании параметров.

Выводы

Выполненный комплекс опытно-исследовательских работ позволяет сформировать следующие основные выводы:

1. Стабилизация основания фундаментов путем нагнетания инъекционного раствора в режиме пропитки с элементом микроразрыва грунта, т.е. в режиме управляемого гидроразрыва при пониженном давлении нагнетания, позволяет прогнозируемо повысить прочностные (до 3 раз) и деформационные (до 1,5 раз) свойства слабых грунтов, исключить технологическое влияние от процесса производства инъекционных работ и понизить чувствительность квазитиксотропной дисперсной среды к внешним техногенным (динамическим) воздействиям.

2. Достижение поставленных целей по стабилизации толщи тиксотропных водонасыщенных грунтов выполнялось по манжетной технологии посредством нагнетания инъекционного раствора на основе микроцемента со средним диаметром частиц по массе 95 % до 0,005 мм и водоцементным отношением В/Ц = 3,0. По результатам анализа графика статического зондирования зафиксировано увеличение значения лобового сопротивления q_c погружения зонда в рассматриваемой толщине грунтов с 0,16 до 1,08 МПа, что косвенно свидетельствует о повышении механических характеристик стабилизируемых грунтов.

3. По результатам анализа выполненных изыскательских работ (статическое зондирование, геодезические исследования, отбор кернов, операционные наблюдения за давлением инъецирования и расходом инъекционного раствора) и произведенных лабораторных исследований (определение прочностных и деформационных характеристик, рентгенофазовый и химический анализы проб грунта) в рассматриваемых инженерно-геологических и гидрогеологических условиях зафиксирован положительный эффект в части перехода рассматриваемого грунта из текучей консистенции в пластичную, а уменьшение влажности грунта в 1,5 раза косвенно свидетельствует о снижении чувствительности к тиксотропным изменениям.

4. Для обеспечения однородности и сплошности закрепляемого массива грунта рекомендуется установить расстояние между горизонтами (интервалами) нагнетания 200–300 мм по высоте манжетной колонны. После завершения работ необходимо выполнять исследования сплошности и при необходимости производить контрольное нагнетание в зонах зафиксированных неоднородных характеристик. Основой положительного результата при выполнении данных видов работ является строгое соблюдение технологии производства

работ по бурению скважин и инъекционному нагнетанию с соблюдением одного из определяющих критериев обеспечения качества – ламинарного движения инъекционного раствора при постоянном заданном давлении нагнетания.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора. 100 %.

Библиографический список

1. Эффективность применения активных и пассивных методов защиты окружающей застройки в зоне влияния подземного строительства / В.А. Ильичев, Н.С. Никифорова, Ю.А. Готман, Е.Ю. Трофимов // Жилищное строительство. – 2015. – № 6. – С. 11–15.
2. Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства / под ред. Р.А. Мангушева. – М.: АСВ, 2017. – 168 с.
3. Некоторые особенности технологии закрепления грунтов «манжетной» инъекцией с использованием микроцемента / Э.С. Аргал, В.М. Королев, О.Е. Смирнов, В.А. Ашихмен // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2008. – № 1. – С. 25–28.
4. Харченко И.Я., Алексеев С.В. Комбинированная цементация грунтов при освоении подземного пространства в условиях плотной городской застройки // Метро и тоннели. – 2013. – № 5. – С. 18–20.
5. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Некоторые проблемы закрепления грунтов растворами из микроцементов // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 4. – С. 114–120.
6. Калач Ф.Н. Оценка эффективности использования технологии инъекционного укрепления слабых грунтов в основании фундаментов мелкого заложения саморасширяющимися растворами // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 2. – С. 62–77. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.06
7. Фадеев А.Б., Мангушев Р.А. Проблемы уплотнительной застройки Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. – 2005. – № 4(5). – С. 61–65.
8. Викулин А.М., Щукина А.Б. Анализ проникающей способности инъекционных материалов на минеральной основе // Транспортное строительство. – 2017. – № 5. – С. 16–29.
9. Баженова О.Ю., Баженова С.И., Баженов М.И. Исследования некоторых свойств цементов с тонкодисперсной добавкой // Молодой ученый. – 2013. – № 10. – С. 96–97.
10. Харченко И.Я., Дмитриев В.В. Научно-техническое сопровождение реконструкции объекта «Мавзолей В.И. Ленина на Красной площади» в части усиления грунтов основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 1. – С. 2–7.
11. Крамаренко В.В. О структурной прочности слабых грунтов и новых нормативных документах по определению характеристик их механических свойств // Известия Тульского государственного университета Естественные науки. – 2012. – Вып. 3. – С. 242–252.
12. Строкова Л.А. Динамика грунтов. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2018. – 190 с.
13. Захаров М.С., Мангушев Р.А. Инженерно-геологические и инженерно-геотехнические изыскания для строительства / под ред. Р.А. Мангушева. – М.–СПб., 2014.
14. Пономарева И.Н., Мордвинов В.А. Подземная гидромеханика. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. – 103 с.

15. Мангушев Р.А., Гурский А.В., Полуниин В.М. Оценка динамического воздействия от вибропогружения шпунтовых свай на здания окружающей застройки в условиях слабых водонасыщенных грунтов // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 102–116. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.10
16. Essler R.D., Drooff E.R., Falk E. Compensation grouting: concept, theory and practice // *Advances in grouting and ground modification*. – 2000. – № 104. – P. 1–15. DOI: 10.1061/40516(292)1
17. Amnieh H.B., Masoudi M., Kolahchi R. Pressure analysis in grouting and water pressure test to achieving optimal pressure // *Geomechanics and Engineering*. – 2017. – № 13(4). – P. 685–699. DOI: 10.12989/gae.2017.13.4.685

References

1. Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Gotman Yu.A., Trofimov E.Yu. The effectiveness of the use of active and passive methods of protecting the surrounding buildings in the zone of influence of underground construction. *Housing construction*, 2015, no. 6, pp. 11-15.
2. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Technological settlements of buildings and structures in the zone of influence of underground construction. Ed. R.A. Mangushev. Moscow, ASV, 2017, 168 p.
3. Argal E.S., Korolev V.M., Smirnov O.E., Ashikhmen V.A. Some features of the technology of fixing soils by "sleeve" injection using microcement. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2008, no. 1, pp. 25-28.
4. Kharchenko I.Ya., Alekseev S.V. Combined cementation of soils during the development of underground space in conditions of dense urban development. *Metro and tunnels*, 2013, no. 5, pp. 18–20.
5. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Some problems of fixing soils with microcement mortars. *Academia. Architecture and construction*, 2016, no. 4, pp. 114–120.
6. Kalach F.N. Evaluation of the efficiency of using the technology of injection strengthening of weak soils at the base of shallow foundations with self-expanding mortars. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 2, pp. 62-77. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.06.
7. Fadeev A.B., Mangushev R.A. Problems of seal building in Sainr Petersburg. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2005, no 4(5), pp. 61-65.
8. Vikulin A.M., Shchukina A.B. Analysis of the penetrating ability of mineral-based injection materials. *Transport Construction*, 2017, no. 05, pp. 16–29.
9. Bazhenova O.Yu., Bazhenova S.I., Bazhenov M.I. Studies of some properties of cements with a finely dispersed additive. *Young scientist*, 2013, no. 10, pp. 96–97.
10. Kharchenko I.Ya., Dmitriev V.V. Scientific and technical support for the reconstruction of the facility "Mausoleum of V.I. Lenin on Red Square" in terms of strengthening the foundation soils. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2015, no. 1, pp. 2-7.
11. Kramarenko V.V. On the structural strength of weak soils and new regulatory documents for determining the characteristics of their mechanical properties. *Izvestiya Tula State University Natural Sciences*, 2012, iss. 3, pp. 242–252.
12. Strokova L.A. Soil dynamics. Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2018, 190 p.
13. Zakharov M.S., Mangushev R.A. Engineering-geological and engineering-geotechnical surveys for construction: Ed. R. A. Mangushev. Moscow, Saint Petersburg, 2014.

14. Ponomareva I.N., Mordvinov V.A. Underground hydromechanics. Perm, Permskii gosudarstvennyi technicheskii universitet, 2009, 103 p.
15. Mangushev R.A., Gursky A.V., Polunin V.M. Evaluation of the dynamic impact from vibration penetration of sheet piles on buildings of surrounding buildings in conditions of weak water-saturated soils. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 102-116. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.10
16. Essler R.D., Drooff E.R., Falk E. Compensation grouting: Concept, theory and practice. *Advances in Grouting and Ground Modification*, 2000, no. 104, pp. 1-15. DOI: 10.1061/40516(292)1.
17. Amnieh H.B., Masoudi M., Kolahchi R. Pressure analysis in grouting and water pressure test to achieving optimal pressure. *Geomechanics and Engineering*, 2017, no. 13(4), pp. 685-699. DOI: 10.12989/gae.2017.13.4.685.