



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.06

УДК 624.159.4

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНЪЕКЦИОННОГО УКРЕПЛЕНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ ФУНДАМЕНТОВ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ САМОРАСШИРЯЮЩИМИСЯ РАСТВОРАМИ

Ф.Н. Калач

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

О СТАТЬЕ

Получена: 20 февраля 2020
Принята: 20 апреля 2020
Опубликована: 30 июня 2020

Ключевые слова:

инъекционное усиление, пропитка грунта, укрепление пылевато-глинистых грунтов, усиление фундаментов, слабые грунты.

АННОТАЦИЯ

При организации новых подземных объектов в сложных инженерно-геологических условиях центральной части города Санкт-Петербурга необходимо применение технологий, обеспечивающих безопасность зданий соседней застройки, подающих в зону влияния производства работ. Вследствие неоднородности напряженно-деформированного состояния грунтов, неравномерной загрузки фундаментов и дополнительного влияния технологических процессов по устройству подземного пространства, конструкции существующих зданий испытывают значительное негативное влияние от неравномерности вертикальных деформаций. При этом возникает необходимость дополнительных исследований компенсационных мероприятий, исключающих данный вид деформаций, направленных на изучение процессов закрепления грунтов с использованием современных инъекционных материалов на цементной и полимерной основе, увеличивающих значения физико-механических характеристик слабых пылевато-глинистых грунтов, преимущественно слагающих основания зданий старой застройки.

В статье рассмотрен метод инъекционного укрепления основания фундаментов мелкого заложения, сложенного пылеватыми текучими супесями, в качестве компенсационного мероприятия, исключающего дополнительные вертикальные неравномерные деформации исторического здания, вызванные в процессе производства работ по устройству ограждающей конструкции котлована.

Выполненные лабораторные исследования позволили определить приращение значений прочностных и деформационных характеристик грунтового массива после его укрепления, опытно-экспериментальные работы позволили установить наиболее эффективные параметры нагнетания инъекционного раствора и визуально оценить степень его распространения в слабом грунте, а физико-математическое моделирование в программном комплексе PLAXIS позволило оценить эффективность применения данной технологии в качестве превентивной меры по исключению неравномерных технологических осадок при производстве работ по устройству ограждающей конструкции котлована «стена в грунте».

© ПНИПУ

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

Filipp N. Kalach – Postgraduate Student, ORCID: 0000-0002-8258-5182, e-mail: fkalach@yandex.ru.

PERFORMANCE EVALUATION OF USING INJECTION REINFORCEMENT TECHNOLOGY WITH SELF-EXPANDING GROUT OF SOFT SOILS AT THE SUB-BASE OF SHALLOW FOUNDATIONS

F.N. Kalach

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

ARTICLE INFO

Received: 20 February 2020

Accepted: 20 April 2020

Published: 30 June 2020

Keywords:

injection grouts, permeation grouting, grouted clayed sand, shoring of foundation, soft soils.

ABSTRACT

In the process of organizing new underground volumes in difficult engineering and geological conditions of the central part of the city of St. Petersburg, it is necessary to use technologies that ensure the safety of neighboring buildings, which supply work to the zone of influence. Due to the heterogeneity of the stress-strain state of soils, the uneven loading of foundations and the additional influence of technological processes on the arrangement of underground space, the structures of existing buildings experience a significant negative effect from the unevenness of vertical deformations. At the same time, there is a need for additional research of compensatory measures that exclude this type of deformation, aimed at studying the processes of soil grouting using modern injection materials on a cement and polymer basis, increasing the physicommechanical characteristics of weak silty-clayed soils, mainly the components of the sub-base of old buildings.

The article discusses the method of injection reinforcement of a shallow foundation, folded by fluid silt sandy loam, as a compensation measure, eliminating additional vertical uneven deformations of the historical building caused by the construction of the pit enclosing structure.

The performed laboratory research made it possible to determine the increment in the values of the strength and deformation characteristics of the soil mass after its strengthening, the experimental work allowed us to establish the most effective injection parameters of the injection solution and visually assess the degree of its distribution in soft soil, and the physico-mathematical modeling in the PLAXIS software package made it possible to evaluate the effectiveness of the use of this technology as a preventive measure to eliminate uneven technological deposits during the construction of the «cast-in-place trench wall» foundation pit enclosing structure.

© PNRPU

Введение

Необходимость сохранения исторических зданий и памятников архитектуры при интенсивном освоении подземного пространства в условиях плотной городской застройки центральной части Санкт-Петербурга обязывает учитывать все возможные негативные факторы, связанные с производством работ нулевого цикла. В зоне негативного воздействия оказываются здания и сооружения, находящиеся в непосредственной близости к строительной площадке. При устройстве глубоких котлованов в слабых пылевато-глинистых водонасыщенных грунтах г. Санкт-Петербурга в качестве ограждающей конструкции котлована могут быть использованы шпунтовые ограждения, конструкция из секущихся буронабивных свай, закрепление массива грунта при помощи инъекционных технологий (Jet grouting). В последнее время большую популярность получила конструкция ограждения котлована «стена в грунте» (далее СВГ), которая позволяет исключить деформации грунтового массива за пределами разрабатываемого котлована. Однако по результатам исследований [1] установлено, что значительную долю дополнительных осадок существующих зданий окружающей застройки составляет технологическая осадка, возникающая в процессе устройства траншейной «стены в грунте», в связи с особенностью технологии производства работ. При этом максимальное значение технологической осадки приходится на ближайшие к СВГ фундаменты здания, вследствие этого возникает значительная неравномерность осадки здания. При этом появляются дополнительные риски для существующих зданий, которые имеют высокую степень естественного износа, и, в зависимости от категории технического со-

стояния, возникает необходимость принятия конструктивных или технологических мер по исключению неравномерных вертикальных деформаций.

В качестве защитных мероприятий для зданий, попадающих в зону влияния, по опыту работ, регулярно применяется конструктивное решение с использованием геотехнического барьера из шпунтовых свай, подгружаемых на 5 м ниже отметки забоя СВГ. В связи с жесткими нормативными ограничениями допустимых деформаций зданий, в ходе анализа результатов геотехнического мониторинга за подобными зданиями, применение вышеупомянутого защитного мероприятия является недостаточным для исключения неравномерности осадки, поэтому необходимо дополнительно предусматривать комплекс работ по инъекционному усилению грунтов основания фундаментов здания, однако в обводненных, заторфованных слабых грунтах этот процесс недостаточно изучен и требует дополнительных исследований [2–10].

Основная часть

А. Анализ результатов обследования здания

В качестве примера рассмотрим здание дореволюционной постройки (1900 г.), представленное 4- и 5-этажными флигелями без деформационного шва, высотой 15 и 18 м соответственно (рис. 1).

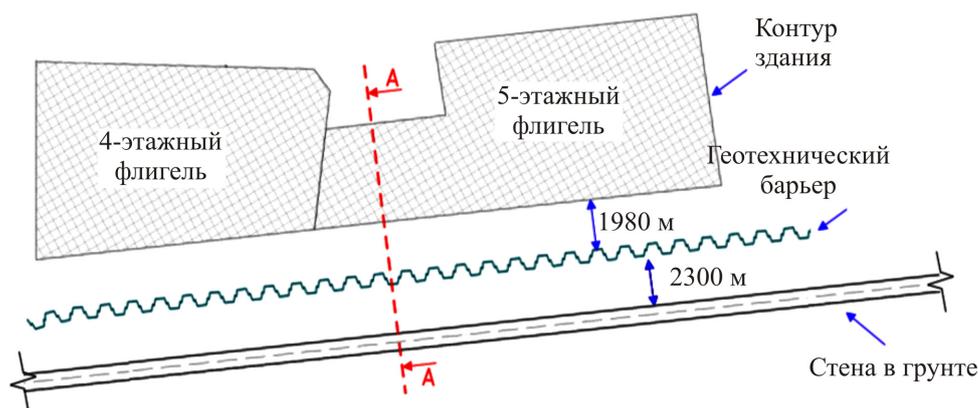


Рис. 1. Схематичное расположение рассматриваемого здания относительно геотехнического барьера и конструкции «стена в грунте». Обозначенный красным цветом разрез А–А подробно рассмотрен в разделе Г

Fig. 1. Sketchy location of the building with respect to the geotechnical barrier and the construction of the "cast-in-place trench wall". sectional view A–A marked in red is discussed in detail in part 4

Как и у большинства зданий того времени [11–13], фундаменты под наружными и внутренними несущими стенами представлены ленточными бутовыми на естественном основании, выложенными из известняковых камней различных габаритов на известково-песчаном растворе (рис. 2) со следующими параметрами:

- ширина фундамента по подошве составляет 1,2 м;
- верхний обрез фундамента расположен на 350 мм ниже уровня дневной поверхности;
- глубина заложения подошвы фундамента (FL) подсечена на отм. –3 м.

В процессе выборочного контроля кладки фундаментов ультразвуковым тестером установлена прочность известняковых камней – 218 кг/см, что соответствует марке М1000 согласно ГОСТ 17624–2012. Расчетно установлено предельное давление, передаваемое на грунт основания, которое составляет 125 кН/м². По результатам проведенного обследова-

ния, фундаменты здания находятся в работоспособном техническом состоянии и не требуют дополнительного усиления, однако следует обратить особое внимание на слагающие основание фундаментов слабые грунты, склонные к неравномерным деформациям.

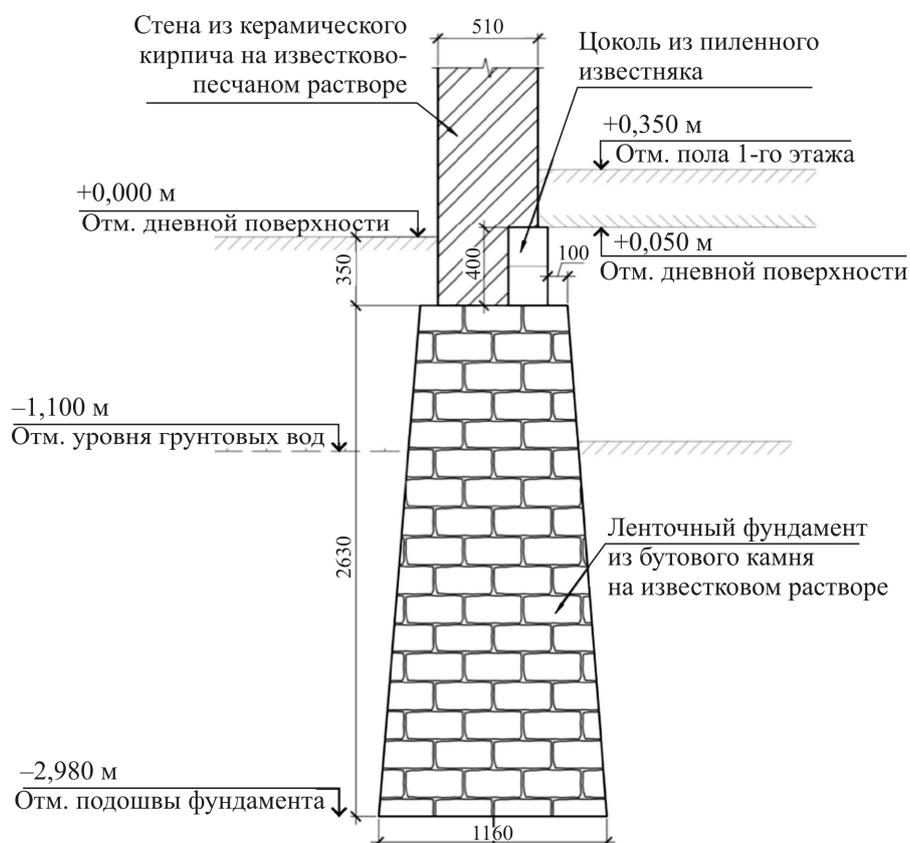


Рис. 2. Ленточный бутовой фундамент под наружные и внутренние стены здания на естественном основании

Fig. 2. Strip rubble stone footing for the outer and inside walls of the building on a sub-base

По материалам, приведенным в техническом обследовании, рассматриваемое здание является историческим с несущими стенами из кирпичной кладки и, согласно нормативной документации (СП 22.13330.2016), относится к III категории технического состояния, в связи с этим предельная дополнительная осадка составляет 5 мм, а относительная разность осадок – 0,0004.

Б. Анализ инженерно-геологических условий

В геологическом строении рассматриваемая территория представлена характерным для центральной части города напластованием [14], по результатам лабораторных исследований определены основные параметры грунтов. Рассмотрим инженерно-геологический элемент (табл. 1), слагающий основание фундаментов и оказывающий наибольшее негативное влияние на деформации здания.

В целом инженерно-геологические условия площадки неблагоприятны для строительства здания на естественном основании, и в рамках действующей нормативной документации (СП 22.13330.2016) использование фундаментов мелкого заложения с опиранием на слабые грунты было бы признано недопустимым. Учитывая вышеизложенное, а также

дополнительные технологические воздействия при производстве работ по устройству ограждающей конструкции «стена в грунте» в непосредственной близости (4,2 м) к рассматриваемому зданию, отметим необходимость компенсационного укрепления подстилающих подошву фундаментов грунтов основания посредством нагнетания в рассматриваемый слой саморасширяющихся инъекционных материалов.

Таблица 1

Физические свойства и гранулометрический состав грунта основания

Table 1

Physical properties and grading of the base soil

Супеси пылеватые текучие темно-серые тиксотропные с прослоями суглинки, песка с примесью органических веществ (<i>m, l IV</i>)									
<i>Процент содержания частиц по фракциям (мм)</i>									
>10,0	10,0–2,0	2,0–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	<0,005
–	1,7	0,2	0,4	2,6	8,8	22,6	44,9	10,7	8,1
<i>Физические свойства</i>									
Влажность, д. ед.			Число пластичности, д. ед.	Плотность, т/м ³			Коэффициент пористости, дол. ед.	Показатель консистенции, дол. ед.	Коэффициент фильтрации, м/сут
при-род.	на границе			грунта	скелет	частиц			
<i>W</i>	<i>W_L</i>	<i>W_p</i>	<i>I_p</i>	ρ	ρ_d	ρ_s	<i>e</i>	<i>I_L</i>	<i>K_ф</i>
0,325	0,318	0,258	0,060	1,86	1,40	2,66	0,895	0,97	0,07

В. Технология компенсационного нагнетания инъекционного раствора в основание фундаментов

В качестве примера такого закрепления рассмотрим наиболее неблагоприятное сечение А–А (раздел Б, рис. 1), где у здания ожидается максимальные значения относительной разности осадки [15–17] (рис. 3).

Для исключения неравномерности осадки здания предусматривался комплекс работ по усилению основания фундаментов здания раствором на основе минерального вяжущего. Работы по закреплению производились в один этап в следующем технологическом порядке:

1. Бурение скважины по грунту Ø52 мм установкой колонкового бурения под углом 25° до отметки –0,7 м ниже подошвы фундамента с внешней стороны здания.
2. Установка в скважину пакера-инъектора на заданную глубину.
3. Нагнетание обойменного цементного раствора с последующей выдержкой скважины в течение 2 сут для исключения движения инъекционного раствора по затрубному пространству во время основного этапа инъектирования.
4. Нагнетание инъекционного раствора под основание фундамента здания с давлением, не превышающим 0,4 МПа, т.е. в режиме пропитки.

В качестве закрепляющего инъекционного раствора использовался саморасширяющийся материал на цементной основе марки М500 с модифицирующими саморасширяющимися добавками. Согласно спецификации коэффициент расширения раствора находится в диапазоне от 1,5 до 4, объемная плотность раствора без реакции – 1500 кг/м³. Нагнетание раствора производилось до наступления давления отказа – 0,4 МПа – или закачки в скважину предельного количества раствора – 100 л на скважину (рис. 4), водоцементное отношение принимается равное 0,5.

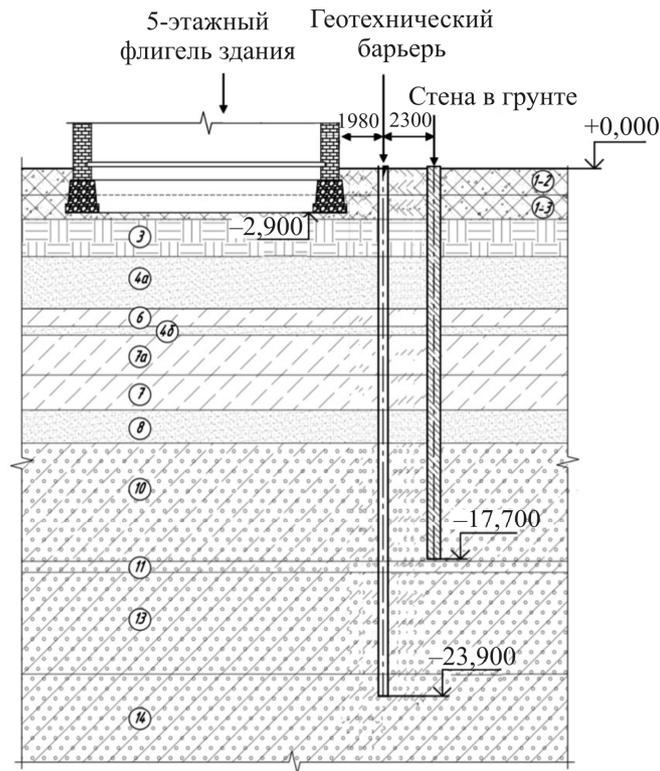


Рис. 3. Разрез А–А с обозначением высотных отметок и схематичным расположением здания относительно геотехнического барьера и конструкции «стена в грунте»
 Fig. 3. Sectional view A–A with the designation of elevations and a sketchy location of the building relative to the geotechnical barrier and the design of the "cast-in-place trench wall"

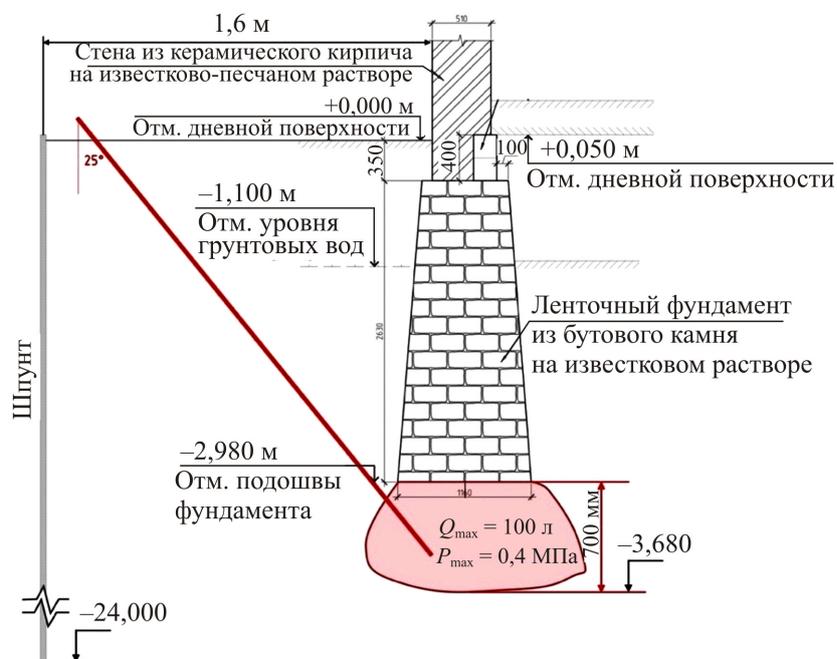


Рис. 4. Схема компенсационного нагнетания саморасширяющегося материала на цементной основе с модифицирующими добавками в основание фундаментов здания
 Fig. 4. The schematic view of compensatory injection of self-expanding cement-based material with modifying additives to the base of the building foundations

Инъекционный раствор изготавливался на месте производства работ путем смешивания минерального порошка с водой посредством смесительного оборудования турбулентного типа. Принцип турбулентного перемешивания заключается в создании высоких градиентов скоростей, способствующих равномерному распределению саморасширяющихся добавок в приготавливаемом растворе. Готовая смесь материала имела жидкую консистенцию, позволяющую ей проникать без давления в поры грунта, не нарушая его структуры.

При закреплении массива грунта в основании фундаментов с применением инъекционного раствора на основе минерального вяжущего были назначены основные контролируемые показатели, которые являются критерием достижения положительного результата:

1. Увеличение значения модуля деформации E более чем на 30 %.

2. Степень пропитки грунтового массива. Определяется на основании визуального освидетельствования по результатам разработки шурфа на опытно-экспериментальном участке.

Г. Апробация технологии по закреплению грунтов основания фундаментов

После окончательного набора прочности «грунтоцементного» массива, через 35 сут после проведения работ по закреплению грунтов основания фундаментов, в рамках проведения опытно-исследовательских работ был вскрыт шурф (рис. 5, а) со следующими параметрами:

- глубина 3500 мм;
- ширина 1000 мм;
- длина 2000 мм.

Следует отметить, что при производстве работ по компенсационному закреплению текучих пылевато-глинистых грунтов необходимо строго соблюдать технологию нагнетания раствора, а работы по инъектированию производить исключительно в режиме пропитки (давление отказа 0,4 МПа), иначе возникает эффект гидроразрыва, при котором усилия, возникающие в глинистых грунтах, становятся достаточными для неравномерного поднятия здания [20].

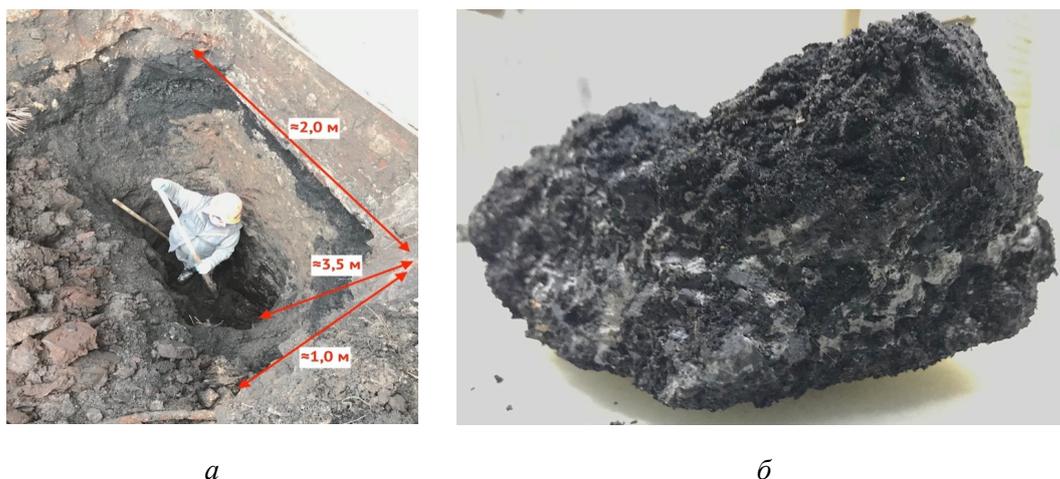


Рис. 5. Экспериментальные работы на опытном участке: а – разработанный шурф;

б – образец упрочненного грунта с опытного участка

Fig. 5. Work on the experimental site: а – exploratory shaft; б – injection sample from the experimental site

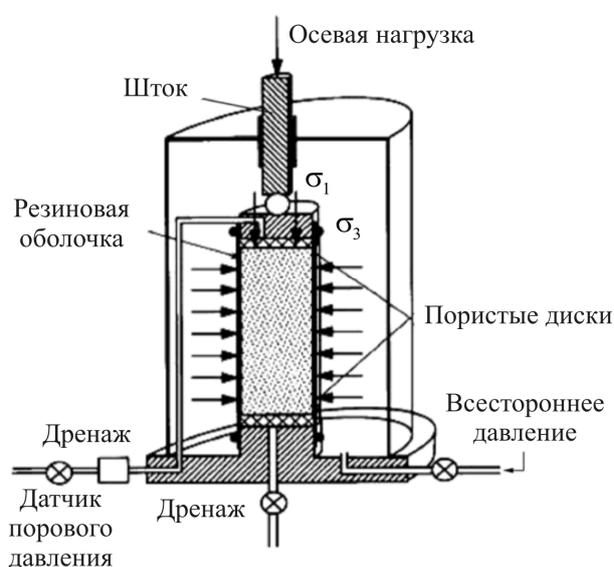
В ходе разработки шурфа на глубину 500 мм ниже подошвы фундамента (зона усиления) был обнаружен минеральный инъекционный материал, что на основании визуального освидетельствования (рис. 5, б) косвенно подтверждает эффективность пропитки грунта с образованием цементного камня в зоне укрепления основания, сложенного преимущественно слабыми грунтами и техногенными отложениями.

Образцы закрепленного грунта и в естественном сложении были отобраны из-под основания здания на участке проводимых опытно-экспериментальных работ и направлены на лабораторные исследования для определения достигнутых контролируемых параметров.

Д. Лабораторные испытания

На основании нормативной документации (ГОСТ 12248–2010) для определения характеристик деформируемости укрепленного грунта был выбран метод трехосного сжатия, в связи с более постоянным и более однородным распределением напряжений в образце грунта по сравнению с другими лабораторными методами.

Параметры деформируемости определялись по результатам испытаний цилиндрических образцов грунта в камере трехосного сжатия (рис. 6). Деформирование образцов происходило в условиях трехосного осесимметричного как статического, так и кинематического (непрерывного, с заданной скоростью, мм/мин) нагружения при $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$, где σ_1 – наибольшее главное напряжение, σ_2 – промежуточное главное напряжение, σ_3 – наименьшее главное напряжение.



а



б

Рис. 6. Проведение лабораторного эксперимента в установке трехосного сжатия: а – конструктивная схема камеры прибора трехосного сжатия; б – стабилометр в лаборатории кафедры геотехники СПбГАСУ

Fig. 6. Conducting a laboratory experiment in a triaxial compression device: а – the schematic view of the camera triaxial compression device; б – stabilometer in the laboratory of the Department of Geotechnics, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Для лабораторных испытаний использовались образцы грунта диаметром 38 мм и высотой 76 мм ненарушенного сложения с природной влажностью. Образцы были отобраны с опытной площадки, при помощи металлического цилиндра с заостренной нижней гранью (рис. 7).

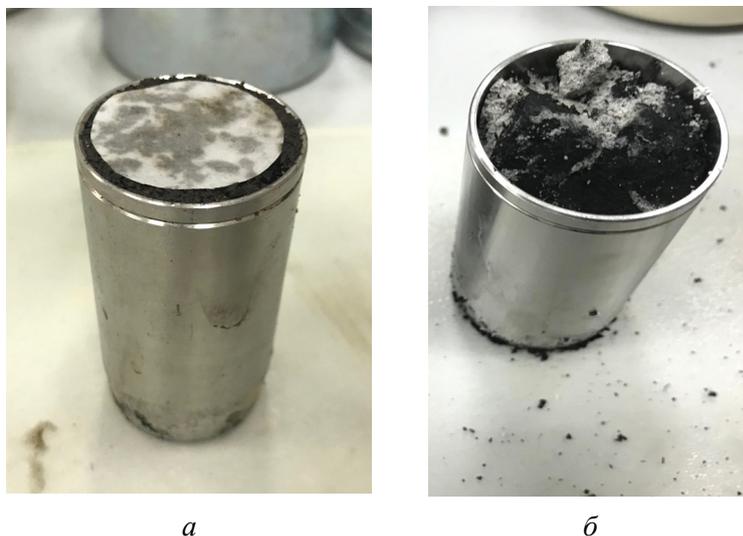


Рис. 7. Отобранные образцы грунта для последующей загрузки в камеру установки трехосного сжатия: *a* – образец грунта ненарушенной структуры; *б* – образец укрепленного грунта ненарушенной структуры

Fig. 7. Selected soil samples for subsequent loading into the chamber of laboratory setup: *a* – the sample of unreinforced soil of undisturbed structure; *b* – the sample of reinforced soil of undisturbed structure

Испытания в стабилометре производились по схеме консолидированно-дренированного испытания. Данная схема подходит для определения характеристик прочности и деформируемости любых дисперсных грунтов в стабилизированном состоянии. Испытания вертикальной нагрузкой проводились при заданном всестороннем давлении на образец грунта. Боковое давление, создаваемое жидкостью в рабочей камере стабилометра ($\sigma_2 = \sigma_3$), поддерживалось постоянным, а вертикальное давление (σ_1) увеличивалось ступенями $\Delta\sigma = 50$ кПа. При определенной величине разности (девиаторе) напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$) наступало разрушение образца (рис. 8).

При постоянном значении напряжений ($\Delta\sigma_3 = 0$) модуль деформации E вычисляется исходя из следующей зависимости [18] (рис. 9):

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{(\sigma_1^2 - \sigma_1^1) \cdot h_{\text{обр}}}{(h_1^2 - h_1^1)},$$

где $(\sigma_1^2 - \sigma_1^1)$ – приращение осевого напряжения в пределах линейного участка зависимости «деформация – напряжение» (нач. участок кривой деформирования), кПа;

$(h_1^2 - h_1^1)$ – приращение осевой деформации в пределах линейного участка зависимости «деформация – напряжение» (нач. участок кривой деформирования), мм;

$h_{\text{обр}}$ – высота испытываемого образца, $h_{\text{обр}} = 76$ мм.

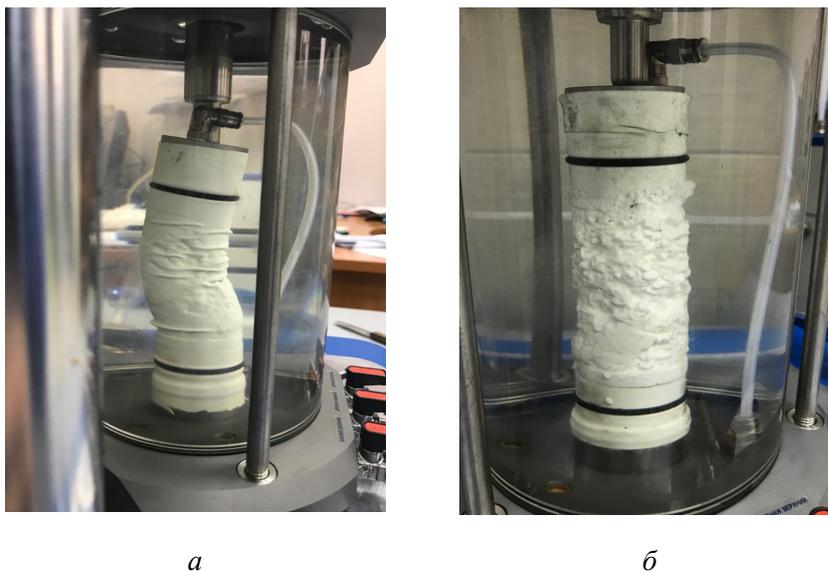


Рис. 8. Успешно завершённые испытания образцов лабораторной установкой трехосного сжатия при эффективном давлении в камере 300 кПа: *a* – образец грунта ненарушенной структуры; *б* – образец укрепленного грунта

Fig. 8. Successfully completed testing of samples with a triaxial compression laboratory setup at an effective chamber pressure of 300 kPa: *a* – the sample of unreinforced soil of undisturbed structure; *b* – the sample of reinforced soil of undisturbed structure

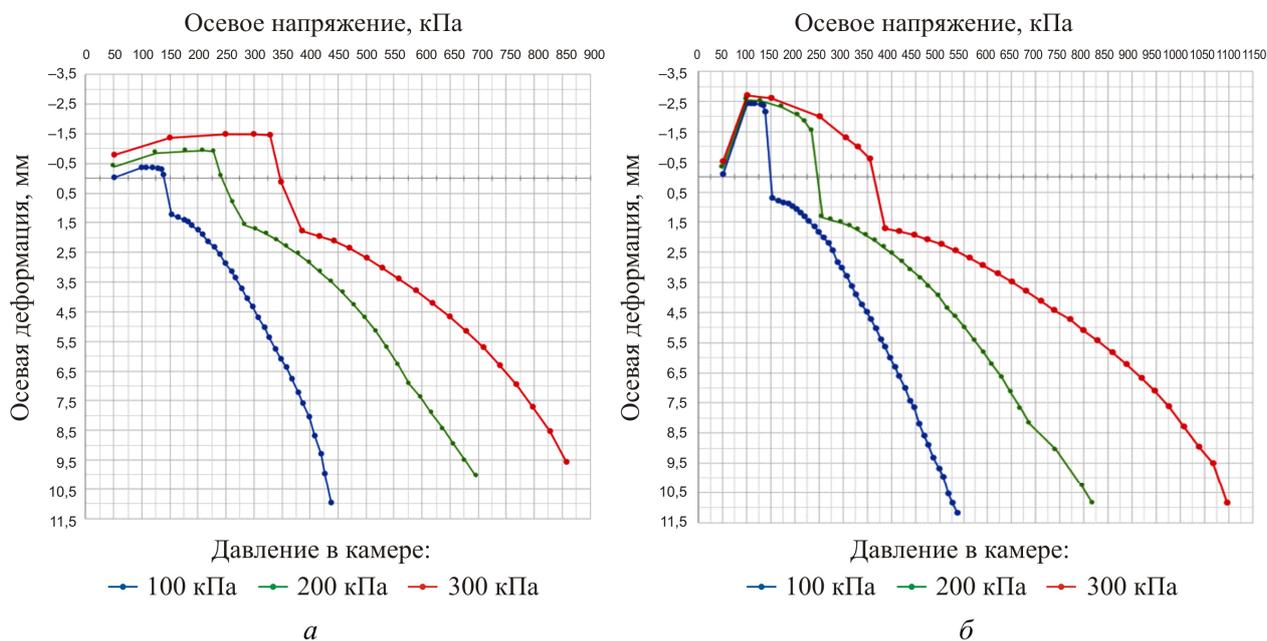


Рис. 9. К определению модулей деформации в условиях трехосного сжатия: *a* – образец грунта ненарушенной структуры; *б* – образец укрепленного грунта

Fig. 9. To the determination of deformation moduli under triaxial compression: *a* – the sample of unreinforced soil of undisturbed structure; *b* – the sample of reinforced soil of undisturbed structure

По результатам испытаний в условиях трехосного сжатия построены круги Мора при различных эффективных напряжениях. Определение характеристик прочности производилось графоаналитическим методом с использованием касательной [19] (рис. 10).

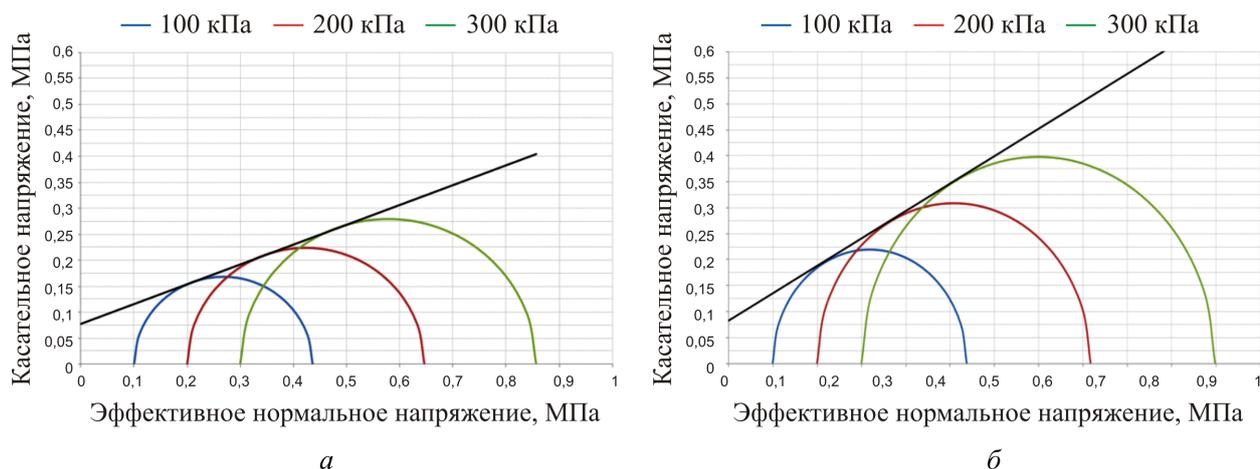


Рис. 10. К определению прочностных характеристик в условиях трехосного сжатия:

a – образец грунта ненарушенной структуры; *б* – образец укрепленного грунта

Fig. 10. To the determination of strength characteristics under triaxial compression: *a* – the sample of unreinforced soil of undisturbed structure; *b* – the sample of reinforced soil of undisturbed structure

По результатам испытаний определены значения модуля деформации, угла внутреннего трения, силы удельного сцепления грунта (табл. 2).

Таблица 2

Результаты лабораторных испытаний

Table 2

Laboratory tests results

№ п/п	Давление в камере, кПа	Вертикальное давление σ_1 , кПа	Вертикальные деформации образца h , мм	Высота образца $h_{обр}$, мм	Модуль деформации E , МПа	Прочностные характеристики
Грунт естественного сложения						
1	100	164,8	1,33	78	9,282	Удельное сцепление $c = 76,9$ кПа
		175,4	1,41			
2	200	284,4	1,60	78	11,520	
		303,6	1,73			
3	300	386	1,77	78	12,275	Угол внутреннего трения $\varphi = 20^\circ$
		415,9	1,96			
Закрепленный грунт						
4	100	152,9	0,72	78	13,260	Удельное сцепление $c = 81,5$ кПа
		164,8	0,79			
5	200	256,8	1,35	78	16,883	
		275,8	1,44			
6	300	387,7	1,73	78	24,440	Угол внутреннего трения $\varphi = 28^\circ$
		415,9	1,82			

По результатам проведенных лабораторных исследований были испытаны образцы укрепленного в возрасте 35 сут массива грунта и находящийся в естественном сложении грунт. В ходе исследований был определен основной контролируемый параметр, показывающий увеличение деформационного показателя укрепленного грунтового массива минимум на 40 % по отношению к грунту в естественном сложении.

Е. Оценка эффективности рассмотренной технологии методом математического моделирования

Численное моделирование деформаций основания сооружения производилось в программном комплексе PLAXIS 2D, реализующем метод конечных элементов в плоской постановке задачи с использованием модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil Model). Данная модель использует модуль разгрузки при снижении напряжений в элементе. Кроме того, в этой модели используется гиперболическая зависимость деформаций от девиаторных напряжений, что точнее отражает реальное поведение грунта.

Для оценки эффективности применения метода инъекционного укрепления основания фундаментов под всем зданием в качестве компенсационного мероприятия от возникновения неравномерных технологических осадок при устройстве конструкции «стена в грунте» было выполнено физико-математическое моделирование для двух случаев:

I. Напластование грунтов находится в естественном сложении (рис. 11), при этом расчетные фазы для моделирования геотехнической ситуации приняты следующие:

1. Начальная фаза (Initial phase) – для формирования природных напряжений в массиве грунта.

2. Активация нагрузки от здания и геотехнического барьера. Допущением является моделирование нагрузки от здания в виде равномерно распределенной, в связи с незначительным расстоянием в свету между ленточными фундаментами.

3. Разработка траншеи для СВГ с последующим заполнением бентонитовым раствором.

4. Устройство железобетонной СВГ.

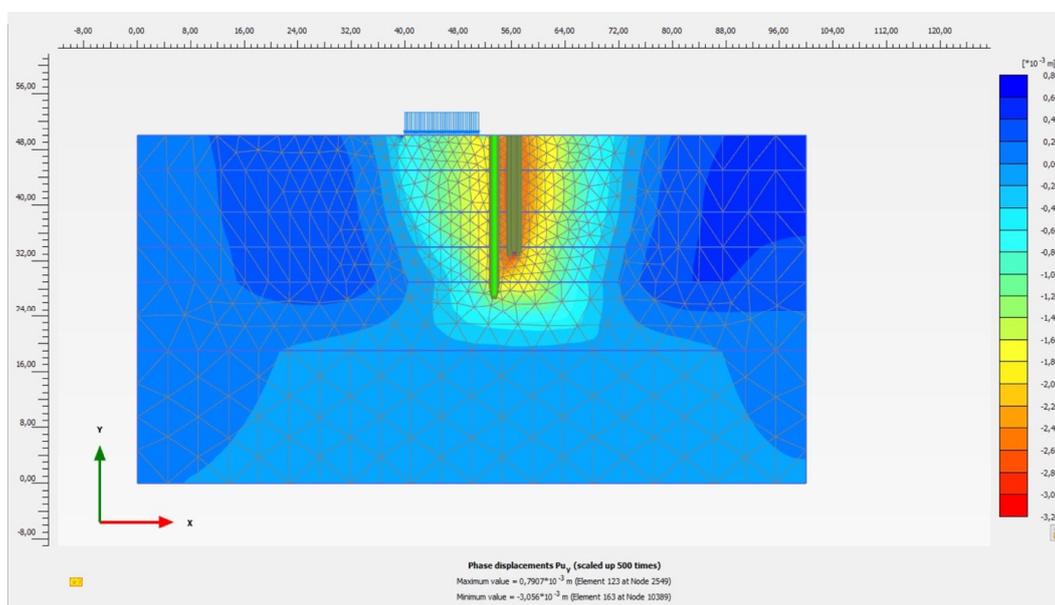


Рис. 11. Физико-математическое моделирование ситуации без учета усиления основания фундаментов здания

Fig. 11. Physico-mathematical modeling of the situation without the use of injection grouts of the sub-base building

II. В основании фундаментов здания проведены работы по его укреплению (рис. 12), при этом расчетные фазы для моделирования геотехнической ситуации приняты следующие:

1. Начальная фаза (Initial phase) – для формирования природных напряжений в массиве грунта.

2. Активация нагрузки от здания и геотехнического барьера. Допущением является моделирование нагрузки от здания в виде равномерно распределенной, в связи с незначительным расстоянием в свету между ленточными фундаментами.

3. Приращение значений физико-механических характеристик грунтового массива, полученных в результате лабораторных испытаний, под фундаментами здания посредством замены грунта.

4. Разработка траншеи для СВГ с последующим заполнением бентонитовым раствором.

5. Устройство железобетонной СВГ.

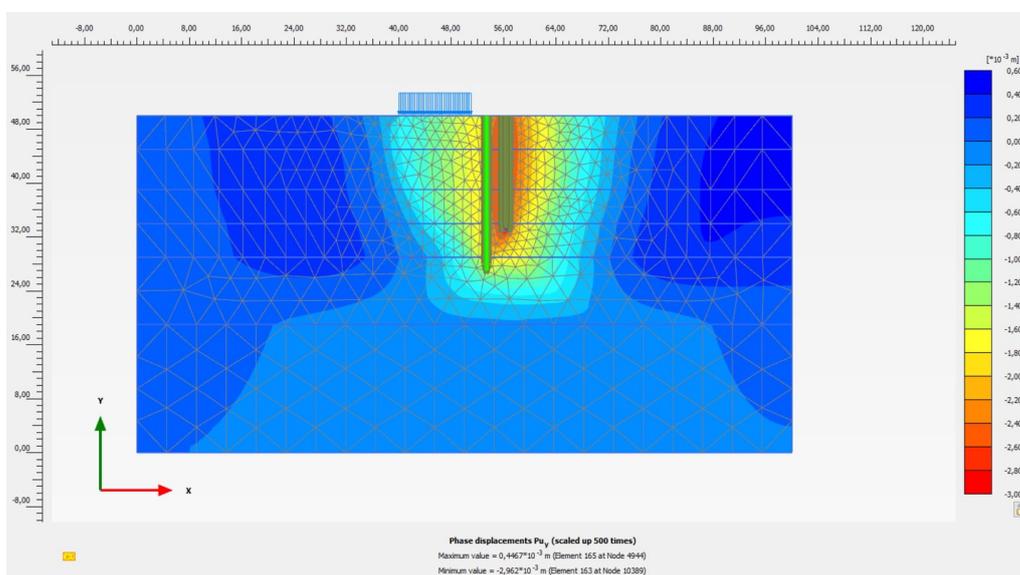


Рис. 12. Физико-математическое моделирование ситуации с учетом усиления основания фундаментов здания

Fig. 12. Physico-mathematical modeling of the situation with the use of injection grouts of the sub-base building

По результатам численного моделирования получены значения неравномерности деформаций здания, вызванных технологическими особенностями при производстве работ по устройству СВГ (табл. 3).

Таблица 3

Результаты численного моделирования

Table 3

Results of physico-mathematical modeling

Осадка		Относительная неравномерность осадки
Допускаемая	5 мм	0,0004
Без учета усиления	8 мм	0,0007
С учетом усиления	4 мм	0,0001

Заключение

Выполненные опытно-экспериментальные работы, лабораторные испытания, а также физико-математическое моделирование позволили сформулировать следующие основные выводы:

1. Экспериментально подтверждена эффективность выбранного режима инъекционного нагнетания – пропитка грунта с образованием цементного камня в зоне укрепления основания фундаментов здания, сложенного преимущественно слабыми текучими пылевато-глинистыми грунтами и техногенными отложениями.

2. При сопоставлении результатов лабораторных испытаний установлена зависимость основного контролируемого параметра – модуля деформации, показывающая увеличение деформационных показателей укрепленного грунтового массива минимум на 40 % по отношению к грунту в естественном сложении.

3. По результатам физико-математического моделирования установлена эффективность применения компенсационного инъекционного закрепления грунтов в качестве превентивной меры по исключению неравномерных технологических осадок здания, попадающего в зону влияния производства работ по устройству ограждающей конструкции котлована «стена в грунте».

Библиографический список

1. Сапин Д.А. Осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте» // *Жилищное строительство*. – 2015. – № 4. – С. 8–13.
2. Викулин А.М., Щукина А.Б. Анализ проникающей способности инъекционных материалов на минеральной основе // *Транспортное строительство*. – 2017. – № 05. – С. 16–29.
3. Некоторые особенности технологии закрепления грунтов «манжетной» инъекцией с использованием микроцемента / Э.С. Аргал, В.М. Королев, О.Е. Смирнов, В.А. Ашихмен // *ОФМГ*. – 2008. – № 1. – С. 25–28.
4. 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.
5. Special aspects of hydration process of microfine cement / I. Ivanova, A. Pustovgar, A. Eremin, A. Adamtsevich // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – 725726. – P. 578–583.
6. Soft ground technology // *Proceedings of the soft ground technology Conference in Noordwijkerhout*. – Netherland, 2000.
7. 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.
8. Шакиров И.Ф., Гарифуллин Д.Р. Исследование несущей способности и деформаций песчаных грунтов, укрепленных напорной цементацией // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2015. – № 4. – С. 200–205.
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. Ahmed A. Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled basanite // *Applied Clay Science*. – 2015. – P. 27–35.
11. Мангушев Р.А., Усманов Р.А., Осокин А.И. Устройство и реконструкция оснований и фундаментов на слабых и структурно-неустойчивых грунтах / под ред. Р.А. Мангушева – СПб., 2018. – 496 с.

12. Шашкин А.Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. – М.: Академическая наука – Геомаркетинг, 2014. – 352 с.
13. Методы подготовки и устройства искусственных оснований / Р.А. Мангушев, Р.А. Усманов, С.В. Ланько, В.В. Конюшков. – СПб., 2013. – 266 с.
14. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Сотников С.Н. Геотехника Санкт-Петербурга. Опыт строительства на слабых грунтах. – СПб., 2019. – 386 с.
15. 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.
16. Осокин А.И., Денисова О.О., Шахтарина Т.Н. Технологическое обеспечение подземного строительства в условиях городской застройки // Жилищное строительство. – 2014. – № 3. – С. 16–24.
17. Kalach F.N., Nozdrya V.I., Osokin A.I. Characteristics of ultrafine permeation grouting for foundation soil of northern river terminal in Moscow // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction*. – 2019. – P. 109–113.
18. Болдырев Г.Г., Колесников А.С., Новичков Г.А. Интерпретация результатов лабораторных испытаний с целью определения деформационных характеристик грунтов // Инженерные изыскания. – 2014. – № 5–6. – С. 98–108.
19. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Новичков Г.А. Интерпретация результатов лабораторных испытаний с целью определения прочностных характеристик грунтов // Инженерные изыскания. – 2014. – № 5–6. – С. 78–85
20. Value of additional vertical deformations of foundations depending on injection grouting conditions / A.I. Osokin, F.N. Kalach, I.P. Diakonov, N.V. Remizova // *Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies*. – 2019.

References

1. Sapin D.A. Osadki fundamentov zdaniy sosedney zastroyki pri ustroystve transheyroy "steny v grunte" [Precipitation of the foundations of buildings of neighboring buildings when constructing a trench "wall in the ground"]. *Zhilishchnoe stroitelstvo*, 2015, no. 4, pp. 8-13.
2. Vikulin A.M., Schukina A.B. Analiz pronikayushchey sposobnosti inyektsionnykh materialov na mineralnoy osnove [Analysis of the penetration ability of mineral-based injection materials]. *Transport Construction*, 2017, no. 5, pp 16–29.
3. Argal E.S., Korolev V.M., Smirnov O.E., Ashikhmen V.A. Nekotoryye osobennosti tekhnologii zakrepleniya gruntov «manzhetnoy» inyektsiyey s ispolzovaniyem mikrotsementa [Some features of the technology of soil fixation by “cuff” injection using microcement]. *Osnovaniia, fundamenti i mekhanika gruntov*, 2008, no. 1, pp 25-28.
4. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Nekotoryye problemy zakrepleniya gruntov rastvorami iz mikrotsementov [Some problems of soil fixation with solutions of microcements]. *Academia. Architecture and construction*, 2016, no 4, pp 114–120.
5. Ivanova I., Pustovgar A., Eremin A., Adamtsevich A. Special aspects of hydration process of microfine cement. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 725726, pp. 578-583.
6. Soft Ground Technology. *Proceedings of the soft ground technology Conference in Noordwijkerhout*, Netherland, 2000.
7. Kharchenko I.Ya., Alekseev S.V. Kombinirovannaya tsementatsiya gruntov pri osvoyenii podzemnogo prostranstva v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki [Combined soil cementation

during the development of underground space in dense urban areas]. *Metro and tunnels*, 2013, no. 5, pp 18–20.

8. Shakirov I.F., Garifullin D.R. Issledovaniye nesushchey sposobnosti i deformatsiy peschanykh gruntov. ukreplennykh napornoy tsementatsiyey [Study of bearing capacity and deformation of sandy soils reinforced by pressure cementation]. *Bulletin of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*, 2015, no. 4, pp 200–205.

9. Bazhenova O.Yu., Bazhenova S.I., Bazhenov M.I. Issledovaniya nekotorykh svoystv tsementov s tonkodispersnoy dobavko [Studies of some properties of cements with a finely dispersed additive]. *Young scientist*, 2013, no. 10, pp. 96–97.

10. Ahmed A: Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite. *Applied Clay Science*, 2015, pp. 27–35.

11. Mangushev R.A., Usmanov R.A., Osokin A.I. Ustroystvo i rekonstruktsiya osnovaniy i fundamentov na slabykh i strukturno-neustoychivyykh gruntakh [Arrangement and reconstruction of foundations and foundations on weak and structurally unstable soils]. Ed. R.A. Mangushev. Saint Petersburg, 2018, 496 p.

12. Shashkin A.G. Proyektirovaniye zdaniy i podzemnykh sooruzheniy v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Sankt-Peterburga [The design of buildings and underground structures in the complex engineering and geological conditions of St. Petersburg]. Moscow, Academic Science - Geomarketing, 2014, 352 p.

13. Mangushev R.A., Usmanov R.A., Lanko S.V., Konyushkov V.V. Metody podgotovki i ustroystva iskusstvennykh osnovaniy [Methods of preparation and installation of artificial bases]. Saint Petersburg, 2013, 266 p.

14. Mangushev R.A., Osokin A.I., Sotnikov S.N. Geotekhnika Sankt-Peterburga. Opyt stroitelstva na slabykh gruntakh [Geotechnics of St. Petersburg. Construction experience on soft soils], Saint Petersburg, 2019, 386 p.

15. Kharchenko I.Ya., Alekseev S.V. Kombinirovannaya tsementatsiya gruntov pri osvoenii podzemnogo prostranstva v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki [Combined soil cementation during the development of underground space in dense urban areas]. *Metro and tunnels*, 2013, no. 5, pp. 18–20.

16. Osokin A.I., Denisova O.O., Shakhtarina T.N. tekhnologicheskoye obespecheniye podzemnogo stroitelstva v usloviyakh gorodskoy zastroyki [Technological support for underground construction in urban areas]. *Housing construction*, 2014, no. 3, pp. 16–24.

17. Kalach F.N., Nozdrya V.I., Osokin A.I Characteristics of Ultrafine Permeation Grouting for Foundation Soil of Northern. River Terminal in Moscow. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction*, 2019, pp.109-113.

18. Boldyrev G.G., Kolesnikov A.C., Novichkov G.A. Interpretatsiya rezultatov laboratornykh ispytaniy s tselyu opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik gruntov [Interpretation of laboratory test results in order to determine the deformation characteristics of soils]. *Engineering Surveys Journal*, 2014, no. 5-6, pp. 98-108.

19. Boldyrev G.G., Melnikov A.V., Novichkov G.A. Interpretatsiya rezultatov laboratornykh ispytaniy s tselyu opredeleniya prochnostnykh kharakteristik gruntov [Interpretation of laboratory test results in order to determine the strength characteristics of soils]. *Engineering Surveys Magazine*, 2014, no. 5-6, pp. 78-85.

20. Osokin A.I., Kalach F.N., Diakonov I.P., Remizova N.V. Value of additional vertical deformations of foundations depending on injection grouting conditions. *Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies*, 2019.