

Натурное исследование и обоснование параметров нагнетания раствора при цементации грунтов основания здания Гимназии №45 в г. Ростове-на-Дону

С.Г. Страданченко, М.Д. Молев, А.Ю. Прокопов

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В статье описано проведение натурных исследований, выполненных при капитальном ремонте объекта культурного наследия – здания МБОУ «Гимназия №45» для установления рациональных параметров нагнетания цементно-песчаного раствора, выбора типа и конструкции иньекторов и схемы бурения иньекционных скважин. Доказано, что принятые в проекте закрепления грунтов технические решения не являются оптимальными и не обеспечивают требуемого качества работ. Разработаны и реализованы на практике рекомендации по технологическим и конструктивным решениям закрепления грунтов с учетом инженерно-геологических условий, результатов обследования и закрепления на опытном участке.

Ключевые слова: просадочный грунт, основание, цементация, иньектор, бурение скважин, геокомпозит

При строительстве и эксплуатации зданий и сооружений на просадочных грунтах часто возникают проблемы, связанные с деформациями оснований, фундаментов и надземных конструкций, вследствие реализации просадочных свойств грунтов [1]. Многие здания, построенные в г. Ростове-на-Дону 50-100 лет назад и более, проектировались без учета возможного изменения деформационных и прочностных свойств просадочных грунтов, поэтому многие из них получили в процессе эксплуатации существенные дефекты в виде трещин, кренов, перекосов, разрушения отдельных элементов и конструкций [2, 3]. Такие дефекты связаны не только с физическим износом зданий, но и зачастую с деформациями просадочных оснований. Поскольку многие здания постройки конца XIX - начала XX в. обладают культурной или исторической ценностью, их относят к объектам культурного наследия (ОКН) федерального или регионального значения.

Целью настоящей статьи являются натурные исследования, выполненные на ОКН регионального значения – МБОУ «Гимназия №45»,

расположенной по адресу: г. Ростове-на-Дону, пр. Ворошиловский, 29, при проведении работ по капитальному ремонту указанного объекта с целью обоснования и разработки рекомендаций по закреплению грунтов. Необходимость исследований была обусловлена невозможностью реализации технических и технологических решений, предусмотренных проектом закрепления грунтов. Работы выполнялись в августе-сентябре 2022 г. сотрудниками кафедр «Инженерная геология, основания и фундаменты» и «Строительство и техносферная безопасность» Донского государственного технического университета по заказу ООО «Южная Строительная Компания».

Годы постройки объекта: здание гимназии – 1880-1900 гг., тепловой пункт – 2001 г. Здание сложной конфигурации в плане, приближенное к П-образной форме, высотой до 12,5 м, кирпичное. Габаритные размеры здания 48,7 × 43,1 м. Здание разной этажности: 2-х этажное с подвалом, одноэтажное с антресолью, без подвала, одноэтажное без подвала (спортзал). Тепловой пункт — одноэтажное.

Конструктивная схема здания – бескаркасная с несущими поперечными и продольными кирпичными стенами. Фундаменты – ленточные кирпичные, бутовые, каменные. Ширина подошвы: 0,69-1,07 м. Глубина заложения: от -1,800 до -3,850 м. Несущие стены – кирпичные. Подземная часть представлена конструкциями бутовыми, каменными и кирпичными толщиной 380-1100 мм.

Участок изысканий, в связи с наличием специфических (просадочных) грунтов, относится III категории сложности инженерно-геологических условий (СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ. Прил. Б, стр. 31).

На участке изысканий выделено 3 инженерно-геологических элемента (ИГЭ), представленных в таблице №1.

Таблица № 1

Характеристика инженерно-геологических условий

№ ИГЭ	Геологический индекс	Описание	Мощность, м	Глубина, м
ИГЭ-1	dQ _{I-III}	Суглинок легкий пылеватый, среднепросадочный, твердый, незасоленный, минеральный	2,90-5,50	от 1,00-3,60 до 6,50
ИГЭ-2	dQ _{I-III}	Суглинок тяжелый пылеватый, твердый, слабопросадочный, незасоленный, минеральный	2,00-3,40	от 6,50 до 8,50 – 9,90
ИГЭ-3	dQ _{I-III}	Суглинок тяжелый пылеватый, твердый, непросадочный, незасоленный, минеральный	2,50 – 6,50	от 8,50-9,90 до пройденной глубины 12,0-15,0 м

По данным результатов визуального обследования по всему периметру здания установлены магистральные трещины в несущих наружных и внутренних стенах здания с раскрытием до 2 см и локальные трещины в местах опирания перемычек, свидетельствующие о неравномерной осадке фундаментов здания. Фундаменты здания ленточные (кирпичный бой с вкраплениями ракушечника на известково-песчаном растворе), ширина фундамента под несущие стены составляет 980 - 1150 мм; под колонами – монолитный железобетонный шириной 1550 мм. Отмостка по периметру здания находится в удовлетворительном состоянии.

По результатам поверочных расчетов давление под подошвой фундаментов несущих стен превышает расчетное сопротивление грунта, грунты основания обладают просадочными свойствами, поэтому в рамках капитального ремонта здания было рекомендовано закрепление грунтов методом цементации.

Первоначально проектом было предусмотрено закрепление грунтов ИГЭ-1 и ИГЭ-2 на всю толщину их распространения, до абсолютной отметки 42.30 м. Общая толщина закрепляемых грунтов составляет 8,00-9,55 м под фундаментами существующего здания.

Работы по закреплению грунтов предусмотрены армированием методом «геокомпозит» [4], при котором производится веерное нагнетание песчано-цементного раствора в массив грунта под давлением 2-9 атм. Проектом было предусмотрено использование инъекторов, неизвлекаемых из труб 25×3,2 по ГОСТ 3262-75, которые должны выполнять роль дополнительных элементов вертикального армирования. Инъекторы изготавливаются в построечных условиях при помощи электродуговой сварки. Длина перфорированной части иглофильтра должна составлять 1,0 м. По результатам бурения первых скважин, погружения в них инъекторов и нагнетания песчано-цементного раствора, длина перфорированной части может изменяться в пределах 0,5 м в большую или меньшую стороны.

За отказ принимается подъем давления в напорных рукавах выше 10 атм. при расходе 1 м³/час, понижение давления ниже 1 атм., выход нагнетаемого раствора на поверхность.

При производстве работ используется песчано-цементный раствор, в который, при необходимости добавляется глинистый пластификатор. Состав 1 м³ песчано-цементного раствора: цемент – 0,5 т; песок – 1 т; вода – 0,4 м³. С учетом степени агрессивного воздействия грунтовых вод на конструкции из бетона для приготовления песчано-цементного раствора предусмотрено использование портландцемент специального назначения сульфатостойкий с минеральными добавками марки М-500 по ГОСТ 22266-2013.

Анализ проектных решений для заданных инженерно-геологических условий, конструктивных особенностей фундаментов, технического состояния здания, а также научно-практический опыт в области закрепления

грунтов основания [5-7], в т.ч. на ОКН [8, 9], позволил выявить ряд достоинств и недостатков изучаемого проекта.

К достоинствам проекта относятся:

1. Использование хорошо апробированного метода «геокомпозит», разработанного академиком РАН В.И. Осиповым и хорошо зарекомендовавшим себя в подобных инженерно-геологических условиях.

2. Применение доступных и экологически чистых материалов (цемент, песок, вода) для приготовления инъецируемого раствора.

3. Более низкая стоимость компонентов раствора по сравнению с альтернативными методами закрепления просадочных грунтов, рекомендуемых для закрепления оснований ОКН, в т.ч. с применением «щадящих технологий».

К недостаткам проекта можно отнести:

1. Наличие только вертикальных скважин и инъекторов, располагаемых в стороне от центральной вертикальной оси фундаментов, где возникают максимальные напряжения и деформации грунта от вертикальных нагрузок, что не всегда приводит к закачке раствора непосредственно под подошву фундамента, тем самым снижается эффективность закрепления.

2. Использование металлических трубчатых инъекторов, забиваемых в грунт на всю высоту перфорированной части в глинистых грунтах твердой консистенции приводит к существенному увеличению сопротивления выходу раствора из отверстий трубы, что требует значительного увеличения давления нагнетания. Но даже при максимально допустимом проектом давлением (1 МПа) закачать раствор в необходимом объеме в твердые глинистые слабопросадочные грунты по предлагаемой технологии весьма затруднительно.

3. В рассматриваемых инженерно-геологических условиях требуется, как правило, большее давление нагнетания (в режиме гидроразрыва), что

весьма опасно для ОКН, к максимально допустимым деформациям которых предъявляются повышенные требования.

4. Использование «веерообразных» иньекторов, имеющих перфорацию только в определенном секторе трубы, как показывает многолетняя практика закрепления твердых грунтовых оснований, неэффективно, т.к. распространение раствора далеко не всегда происходит в заданном направлении, а в силу неравномерной плотности и пористости, характерных для просадочных грунтов, цементно-песчаные «жилы» формируются хаотично вокруг основного «столба» (иньекционной скважины) и распространяются в наиболее «слабые зоны» массива, а не под фундаменты, где грунт чаще всего находится в «обжатом», т.е. более уплотненном состоянии вследствие длительного воздействия нагрузки от здания [10].

5. Неизвлекаемые металлические иньекторы, которые, согласно проекту «выполняют роль дополнительных элементов вертикального армирования», устанавливаются вертикально, вне зоны максимальных напряжений, возникающих непосредственно под подошвой фундамента и затухающих с глубиной и удалением в стороны от оси фундамента [11], поэтому использование труб для улучшения строительных свойств грунтов основания путем его армирования в данном случае будет малоэффективно.

6. Необходимость бурения 3 отдельных вертикальных скважин, расположенных рядом друг с другом, для каждой из 3 заходов по глубине, является неоправданной, т.к. приводит к увеличению объемов бурения и расхода материала на ликвидацию скважин на участках холостого хода.

Натурные исследования параметров нагнетания цементно-песчаного раствора для отработки технологических параметров процесса закрепления производилось первоначально с уровня подвала здания на опытном участке специалистами ООО «ЮСК» при участии сотрудников ДГТУ.

Отдельные технологические процессы, применяемое оборудование и иньекторы (по первоначальному проекту) представлены на рис. 1.



Рис. 1 – Натурные испытания на опытном участке по проектным параметрам:

- а – монтаж бурового станка в проектное положение; б – бурение инъекционной скважины; в – изготовленные трубчатые перфорированные иньекторы; г – монтаж иньектора в проектное положение;
- д – тампонирование устья и нагнетание цементно-песчаного раствора;
- е – контроль давления нагнетания (показания манометра – 1,2 МПа).

Для отработки параметров бурения и режимов нагнетания цементно-песчаного раствора на опытном участке были произведены следующие работы:

1. Бурение скважин. При бурении скважин опытных участков буровой установкой типа УКБ 12/25, стенки скважин не осыпаются, вывалов грунта не обнаружено, устойчивое состояние скважин соответствует нормам. После бурения осуществлялась очистка скважин от насыпного грунта путем неоднократного погружения и извлечения вращающихся шнеков.

2. Погружение стальных иньекторов (трубы 25×3,2) производилось в период одного часа после завершения бурения скважин №336, 338, 340.

3. Цементация (нагнетание цементно-песчаного раствора) производилось штукатурной станцией АШС-2500. При нагнетании раствора в скважины, согласно показаниям манометра, давление возросло на 2-й минуте от 0,1 до 1,20 МПа, при этом был выход цементно-песчаного раствора на поверхность. При этом в каждую скважину был закачан объем раствора по составу – цемента – 0,05 т, песка – 0,063 м³, воды – 0,039 м³.

В соответствии с проектом закрепления, на опытном участке в осях А-Б / 13-14 использовались иньекторы 4-го типа И-4 длиной 5300 мм и закреплялся участок массива мощностью 3 м (по глубине на отм. -2,20 до -5,20 м). Согласно проекту, в каждую из скважин, пробуренных на опытном участке, должен заканчиваться цементно-песчаный раствор в объеме 0,65 м³, на приготовление которого расходуется 0,33 т цемента, 0,41 м³ песка и 0,26 м³ воды. Следовательно, на опытном участке в каждую скважину при рабочем давлении удалось закачать только 15% проектного объема раствора.

Таким образом, проведение работ на опытном участке показало, что при нагнетании проектных объемов цементно-песчаного раствора в заданных инженерно-геологических условиях по предлагаемой технологии невозможно из-за возникновения «отказа» (повышение давления свыше

1 МПа), а также выхода раствора на поверхность. Превышение рабочего давления недопустимо из-за опасности возникновения сверхнормативных деформаций строительных конструкций здания, являющегося ОКН.

Выводы и рекомендации. Для эффективного и безопасного выполнения работ по закреплению грунтового основания на ОКН в рассматриваемых инженерно-геологических условиях было рекомендовано откорректировать конструктивные и технологические решения, для чего внести следующие изменения в проектную документацию:

1. Отказаться от применения жестких перфорированных трубчатых иньекторов, забиваемых в грунт на всю глубину перфорированной части, как не обеспечивающих закачку раствора в грунт в проектном объеме.

2. Применить для закачки раствора гибкие резино-трубчатые шланги высокого давления, погруженные на глубину рабочего хода с заполнением затрубного пространства гипсовым раствором (тампонирование). После нагнетания цементно-песчаного раствора предусмотреть извлечение шлангов и ликвидацию отверстий на глубину холостого хода.

3. Закрепление грунтов предусмотреть на всю глубину просадочной толщи в соответствии с требованиями СП 21.13330.2012 Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах, разделив весь закрепляемый грунтовый массив на 3 заходки по глубине.

4. Для повышения эффективности закрепления грунтов под подошвой фундаментов, т.е. в зоне с максимальными напряжениями и деформациями, предусмотреть, кроме вертикальных, также наклонные скважины, обеспечивающие нагнетание раствора непосредственно под фундаменты. Углы наклона скважин рассчитать для каждого фундамента, исходя из его геометрии и проектной глубины закрепления на каждой заходке. При этом на первой заходке первоначально произвести вертикальные иньекции, выполняющие роль защитного экрана и позволяющие предотвратить миграцию

раствора при нагнетании наклонных инъекций, которые бурятся во вторую очередь. Аналогично выполнить 2-й и 3-й этапы закрепления по глубине.

За основу технического решения в части расположения скважин и последовательности нагнетания раствора был принят способ закрепления грунтов [12], схематично представленный на рис. 2.

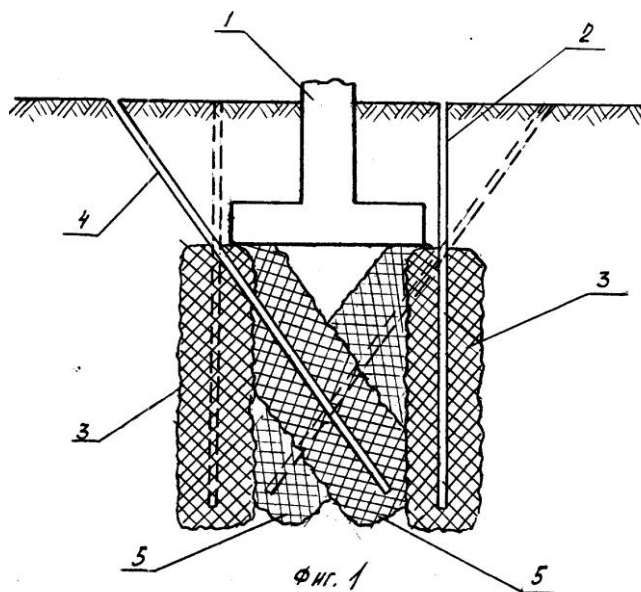


Рис. 2 – Рекомендуемое техническое решение [12]:

- 1 – фундамент; 2 – вертикальные скважины; 3 – зоны закрепленного грунта, формируемые вертикальными скважинами; 4 – наклонные скважины; 5 – зоны закрепленного грунта, формируемые вертикальными скважинами

5. Расчет объемов нагнетаемого раствора определить, исходя из обеспечения требуемого модуля деформации армированного грунта, согласно ТСН-50-306-2005 Ростовской области. Основания и фундаменты повышенной несущей способности, обеспечивающего дополнительную осадку в пределах допустимой по СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.

6. Бурение скважин и нагнетание раствора рекомендуется выполнять по этапам (заходкам по глубине). После полного выполнения инъекций 1-го этапа на участке не менее 10 м возможно выполнение последующего этапа.

7. Бурение скважин и нагнетание раствора в скважины необходимо выполнять первоначально на расстоянии между ними не менее 4 м, с последующим выполнением пропущенных. Перерыв между закачками раствора в соседние скважины (закаченной и пробуренной) должен составлять не менее суток.

8. Для отработки режимов нагнетания (давление, расход) нужно предусмотреть опытный участок. При нагнетании - фиксировать интервалы давлений и объёмы нагнетаемого цементно-песчаного раствора. Результаты опытного нагнетания оформлять соответствующими актами. Основным показателем правильности выбранной технологии является закачивание проектных объёмов цементно-песчаного раствора по всему участку в целом.

Дальнейшие работы по закреплению были выполнены с учетом рекомендаций специалистов ДГТУ, включая изменение положения скважин и применение гибких резино-трубчатых иньекторов (рис. 3).



Рис. 3 – Использование гибких иньекторов для цементации грунтов
(предложенная и реализованная на объекте технология)

В результате корректировки проектных решений и реализации разработанных в ДГТУ рекомендаций были успешно закачаны проектные объемы раствора, снижена пористость грунтов до уровня, характерного для непросадочных грунтов [13, 14], и достигнуты требуемые прочностные и деформационные характеристики основания.

Литература

1. Ананьев В.П., Потапов А.Д., Филькин Н.А. Специальная инженерная геология. М.: ИНФРА-М, 2016. 263 с.
2. Александрова Я.О., Шеина С.Г. Анализ зданий общеобразовательных учреждений города Ростова-на-Дону // Инженерный вестник Дона, 2021, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7278
3. Olyansky Y., Shekochihina E., Kalinovsky S. Forecast of magnitude post-subsidence compaction at the building on slow-subsidence of loess soils // E3S Web of Conferences : Vol. 97. – Tashkent: EDP Sciences, 2019. P. 04001. DOI 10.1051/e3sconf/20199704001.
4. Осипов В.И., Филимонов С.Д. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом «Геокомпозит» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. № 5. С. 15-21.
5. Оржеховский Ю.Р., Лушников В.В., Оржеховская Р.Я. Инъекционное закрепление просадочных грунтов (метод контурной обоймы) // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2011. № 3. С. 70-73.
6. Писаренко А.В. Рецептура химического закрепления просадочных грунтов для повышения безопасной эксплуатации зданий и сооружений // Вести Автомобильно-дорожного института. 2023. № 1(44). С. 47-57.
7. Prokopov A., Prokopova M., Rubtsova Ya. The experience of strengthening subsidence of the soil under the existing building in the city of Rostov-on-Don // MATEC Web of Conferences, Saint-Petersburg, 15–17 ноября 2016 года. Vol. 106. SPb: EDP Sciences, 2017. P. 02001. DOI 10.1051/matecconf/201710602001.

8. Прокопов А.Ю., Михайлов А.А., Евлахова Е.Ю., Иванова А.В., Матвеев М.С. Технические и технологические особенности закрепления грунтовых оснований объектов культурного наследия Ростовской области // Инженерный вестник Дона, 2018. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5365

9. Прокопов А.Ю., Михайлов А.А. Анализ конструкций фундаментов зданий – объектов культурного наследия Ростовской области // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4937

10. Koloshina G., Prokopova M., Tkacheva K. Mathematical modeling of the stress-strain state of a soil during the construction of the underground part of unique buildings // Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021). Vol. 2647 A. Krasnoyarsk: AIP PUBLISHING, 2022. P. 60025. DOI 10.1063/5.0104214.

11. Простов С.М., Соколов М.В. Анализ напряженно-деформированного состояния укрепляемого однородного грунтового основания на основе интегральных критериев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 6(112). – С. 52-62.

12. Голованов А.М., Пашков В.И., Сергеев В.И. Способ закрепления грунтов. Патент РФ № 2103441. Заявл. 28.06.95; опубл. 20.11.98 // Бюллетень изобретений и открытий, 1998. №3. 7 с.

13. Пантюшина Е.В. Лессовые грунты и инженерные методы устранения их просадочных свойств // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 127-130.

14. Абрамова Т. Т. Силикатизация структурно-неустойчивых грунтов (Часть 1) // Инженерная геология. 2017. № 6. С. 34-45.

References

1. Anan'ev V.P., Potapov A.D., Fil'kin N.A. Special'naja inzhenernaja geologija. [Special engineering geology]. Moscow: INFRA-M, 2016. 263 p.

2. Aleksandrova Ja.O., Sheina S.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7278
 3. Olyansky Y., Shekochihina E., Kalinovsky S. E3S Web of Conferences. Vol. 97. Tashkent: EDP Sciences, 2019. P. 04001. DOI 10.1051/e3sconf/20199704001
 4. Osipov V.I., Filimonov S.D. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov, 2002, № 5. P. 15-21.
 5. Orzhekhovskiy Yu.R., Lushnikov V.V., Orzhekhovskaya R.Ya. Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN, 2011, № 3. P. 70-73.
 6. Pisarenko A.V. Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta, 2023, № 1(44). P. 47-57.
 7. Prokopov A., Prokopova M., Rubtsova Ya. MATEC Web of Conferences, Vol. 106. Sankt-Peterburg: EDP Sciences, 2017. P. 02001. DOI 10.1051/matecconf/201710602001
 8. Prokopov A.Yu., Mikhaylov A.A., Evlakhova E.Yu., Ivanova A.V., Matveev M.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5365
 9. Prokopov A.Yu., Mikhailov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4937.
 10. Koloshina G., Prokopova M., Tkacheva K. Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021). Vol. 2647 A. Krasnoyarsk: AIP PUBLISHING, 2022. P. 60025. DOI 10.1063/5.0104214.
 11. Prostov S.M., Sokolov M.V. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2015, № 6(112). pp. 52-62.
 12. Golovanov A.M., Pashkov V.I., Sergeev V.I. Sposob zakrepleniya gruntov [Method of fixing soils]. Patent RF № 2103441. Byulleten' izobreteniy i otkrytiy, 1998. №3. 7p.
 13. Pantyushina E.V. Polzunovskiy vestnik, 2011, № 1. pp. 127-130.
 14. Abramova T. T. Inzhenernaja geologija, 2017, № 6. pp. 34-45.
-