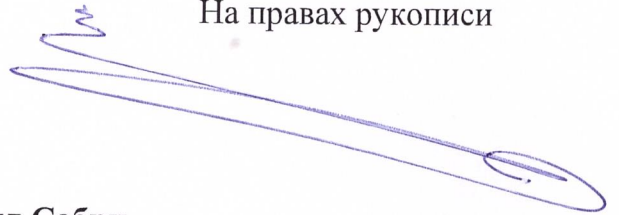


На правах рукописи



САБРИ Моханад Муаяд Сабри

**УСИЛЕНИЕ ОСНОВАНИЙ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ОСАДОК ЗДАНИЙ
РАСШИРЯЕМОЙ ПОЛИУРЕТАНОВОЙ СМОЛОЙ**

Специальность 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург-2020

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Ватин Николай Иванович

Официальные оппоненты: **Мангушев Рашид Абдуллович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-
строительный университет» (СПбГАСУ),
заведующий кафедрой «Геотехника»

Пономарев Андрей Будимирович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет» (ПНИПУ), заведующий
кафедрой «Строительное производство
и геотехника»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»
(КГАСУ)

Защита состоится « ____ » _____ 2020 г. в _____ часов на заседании
объединенного диссертационного совета Д 999.187.02 при АО «ВНИИГ им.
Б. Е. Веденеева» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21.

E-mail: ivanivatv@vniig.ru, тел. +7 (812) 493-93-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «ВНИИГ им. Б.Е.
Веденеева» и на сайте общества: www.vniig.rushydro.ru.

Автореферат разослан « ____ » 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, ст. науч. сотр.

Иванова Татьяна Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Укрепление грунтовых оснований и регулирование получивших нерасчетные осадки фундаментов мелкого заложения является актуальной технической задачей. Для решения этой задачи производителями расширяемой полиуретановой смолы, состоящей из двух компонентов, предложено ее инъецирование в режиме «гидроразрывов». Научно-техническое обоснование такого метода усиления оснований отсутствует.

Степень разработанности темы исследования:

В разное время развитию способов усиления фундаментов, искусственному улучшению характеристик и повышению несущей способности грунтовых оснований при нагружении посвящены научно-исследовательские работы: А. Б. Пономарева, А. В. Есипова, А. Г. Шашкина, А.И. Мальганова, Б.В. Бахолдина, В.А. Богомолова, В.А. Ермолаева, В.А. Зурнаджи, В.М. Улицкого, В.Н. Парамонова, З.Г. Тер-Мартirosяна, И.И. Сахрова, И.Т. Мирсаяпова, М. Н. Ибрагимова, М.Ю. Абелева, Н. Н. Баранова, Р.А. Мангушева, Х. Брандля, Э.И. Мулюкова, Э.М. Генделя, А. Evangelista, B. Černák, E. Valeri, F. Lizzi, G.W. Jaworski, H. Muhra, H. Wiechers, H.G. Poulos, K. Fört, M.M. Bustamante, P. Marinos, T. Cielenkiewicz, W. Cambefort, Wittke W.

В последние годы для быстрого подъема оснований и фундаментов существующих зданий и сооружений предложена технология инъецирования грунтов расширяемой смолой. Анализ данного процесса можно найти в работах авторов: O. Buzzi, M. Popik, P. Hellmeier, T. Apuani, Benjamin J. Warren, Norbaya Sidek, Jeremy Hess, Iman Golpazir.

Однако, применение этой технологии для усиления оснований сдерживалось отсутствием теоретического и экспериментального ее обоснования и отсутствием метода расчета несущей способности и оценки осадок оснований после инъецирования их смолой.

Объект исследования: грунтовое основание, сложенное преимущественно песчаными грунтами, укрепляемое расширяющейся двухкомпонентной полиуретановой смолой, инъецируемой в режиме «контролируемого гидроразрыва».

Предмет исследования: физико-механические характеристики усиленных расширяемой полиуретановой смолой грунтовых оснований, формы распространения смолы в грунтовом массиве и их напряженно-деформированное состояние.

Цель исследования: разработка нового экспериментально подтвержденного метода расчета несущей способности и оценки осадок усиленных расширяемой полиуретановой смолой оснований.

Данные разработки имеют существенное значение для развития страны.

Задачи исследования:

1. Экспериментальная оценка эффективности инъецирования несвязных грунтов расширяемой смолой в режиме «гидроразрывов» для компенсации осадок зданий и быстрого выравнивания оснований.

2. Выполнение полевых исследований по определению степени изменения несущей способности, модуля деформации и динамического сопротивления песчаного грунта основания, инъектируемой расширяемой смолой.

3. Определение геометрических параметров и формы распространения расширяемой смолы в массиве инъектируемого песчаного грунта основания, а также определение ее объёмного расхода, необходимого для укрепления грунта основания и подъема фундамента до заданного уровня.

4. Выявление соотношения между плотностью и механическими свойствами расширяемой смолы в соответствии со степенью ее объёмного расширения в массиве укрепленных грунтов оснований.

5. Разработка метода расчета несущей способности и оценки осадок усиленных расширяемой смолой оснований.

6. Внедрение результатов диссертационной работы.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Разработан метод расчёта несущей способности и оценки осадок усиленных расширяемой смолой оснований.

2. Экспериментально подтверждена эффективность и научно обоснована технология инъектирования грунтов расширяемой смолой в режиме «гидроразрывов», ранее применявшаяся без возможности расчетного обоснования, для компенсации осадок зданий и быстрого выравнивания оснований.

3. Экспериментально определена степень изменения несущей способности, модуля деформации и динамического сопротивления песчаного грунта основания, инъектируемой расширяемой смолой, что позволило создать расчетное обоснование технологии инъектирования грунтов расширяемой смолой для усиления грунтовых оснований.

4. Определены геометрические параметры, формы распространения и плотность смолы, сформированной в массиве песчаного грунта основания после инъектирования и набора прочности.

5. Выявлено соотношение между плотностью и механическими свойствами расширяемой смолы в соответствии со степенью ее объёмного расширения в массиве укрепленных грунтов оснований.

Практическая значимость работы заключается:

1. В возможности практического использования метода расчета несущей способности и оценки осадок на усиленных расширяемой полиуретановой смолой грунтовых основаниях.

2. В обосновании способа инъектирования грунтовых оснований расширяемой смолой в режиме «контролируемых гидроразрывов» для их усиления, компенсации осадок зданий и быстрого выравнивания оснований.

3. В выявлении степени изменения несущей способности, модуля деформации и динамического сопротивления песчаного грунтового основания после инъектирования его смолой.

4. В определении геометрических параметров и формы распространения инъектируемой смолы в массиве песчаного грунтового основания.

5. В определении объёма расхода смолы, необходимого для подъема фундамента до заданного уровня и укрепления песчаного грунта основания.

6. В выявлении соотношения между плотностью и механическими свойствами расширяемой смолы в соответствии со степенью ее объемного расширения в массиве укрепленных грунтов оснований.

Личный вклад автора

1. Полевые исследования по подъему опытного фундамента и компенсации его осадок путем инъецирования грунтов расширяемой смолой в режиме «гидро-разрывов».

2. Полевые исследования песчаного грунтового основания для выявления степени изменения несущей способности, модуля деформации и динамического сопротивления укрепленного песчаного грунта основания.

3. Полевые исследования геометрических параметров и формы распространения инъецируемой смолы в массиве песчаного грунта основания.

4. Лабораторные исследования механических характеристик расширяемой смолы разной плотности в зависимости от объёма ее расширения и механических характеристик грунта основания.

5. Интерпретация и обобщение полученных результатов.

6. Разработка метода расчёта несущей способности и оценки осадок усиленных расширяемой смолой оснований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод расчёта несущей способности и оценки осадок усиленных расширяемой смолой оснований.

2. Результаты полевых исследований выравнивания оснований и компенсации осадок зданий и сооружений с помощью расширяемой полиуретановой смолы, инъецируемой в массиве грунтов в режиме «гидро-разрывов».

3. Результаты полевых исследований степени изменения несущей способности, модуля деформации и динамического сопротивления песчаного грунта основания, инъецируемого расширяемой смолой.

4. Результаты полевых исследований геометрических параметров и формы распространения смолы, сформированной в массиве песчаных грунтов оснований и ее расхода, необходимого для укрепления грунта основания и подъема опытного фундамента до заданного уровня.

5. Результаты лабораторных исследований по определению механических характеристик расширяемой смолы разной плотности в зависимости от объёма ее расширения в массиве укрепленных грунтов оснований.

Методы исследования включают:

1. Полевые исследования подъема опытного фундамента до заданного уровня и укрепления песчаного грунта основания, с определением геометрических параметров и формы распространения расширяемой смолы в массиве исследуемого грунта, а также по определению объёма ее расхода.

2. Полевые исследования изменения несущей способности, модуля деформации и динамического сопротивления грунта основания, инъецируемой расширяемой смолой в пределах активной зоны влияния смолы.

3. Экспериментальные лабораторные исследования:

- механических характеристик смолы в зависимости от ее плотности и объема ее расширения;
- механических характеристик грунта до инъецирования его смолой.

4. Сопоставление результатов численного моделирования с результатами натуральных исследований с целью проверки достоверности предлагаемого метода расчета несущей способности и осадок усиленных расширяемой смолой оснований.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается:

1. Использованием методов исследования, основанных на современных представлениях о механике деформирования грунтов.

2. Использованием поверенных средств измерения, лабораторного и полевого оборудования.

3. Анализом погрешности лабораторных и полевых экспериментальных исследований.

4. Сопоставлением результатов численного моделирования с результатами полевых и лабораторных исследований.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались и положительно оценены на следующих конференциях:

– Международный МС-Форум «Инъекционные технологии в строительстве», Санкт-Петербург 22-23 марта 2018 г.

– Международная научно-практическая конференция «Композитные системы на объектах подземного и гражданского строительства», Санкт-Петербург 27-28 сентября 2018 г.

– Международная научная конференция «Энергетика, экология и строительство ЕЕСЕ», Санкт-Петербург 19-20 ноября 2018 г.

– «XI Петербургский Международный Инновационный Форум», Санкт-Петербург 28-30 ноября 2018 г.

– III Международный строительный форум «Строительство и архитектура», г. Макеевка, Украина, ДонНАСА 18-20 апреля 2019 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из которых 4 работ – индексированы Scopus, 4 работы – опубликованы в источниках по перечню ВАК.

Структура и объем работы состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка использованной литературы из 208 наименований и трех приложений, содержит 164 страницы печатного текста, 83 иллюстрации, 21 таблицу.

Область исследования соответствует пунктам 7 и 11 паспорта научной специальности 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения.

Автор искренне признателен заместителю генерального директора ООО «ПИ Геореконструкция» к.т.н. К. Г. Шашкину за постоянные консультации, интерес и содействие в выполнении работ, особенно за помощь в численном моделировании. Автор также выражает благодарность генеральному директору ООО «ОЗИС Венчур» к.т.н. А. В. Улыбину за помощь в проведении серии полевых испытаний и предоставления необходимого оборудования для проведения исследований; ООО "ЭМ-СИ БАУХЕМИ" за предоставление необходимых инъекционных материалов для проведения лабораторных и полевых экспериментов и за предоставление оборудования и места для проведения инъектирования, особенно к.т.н. Е.Н. Захарьину за его сотрудничество.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, цели и задач исследования, научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения.

В первой главе приведено краткое описание основных причин деформаций оснований, развития осадок и потери несущей способности оснований и фундаментов существующих зданий и сооружений. Также приведен сравнительный анализ основных инъекционных методов, применяемых для усиления оснований и компенсации осадок фундаментов зданий и сооружений.

Технология инъектирования грунта с использованием вспенивающейся полиуретановой смолы, состоящей из двух компонентов, обеспечивает быстрый и строго контролируемый процесс подъема фундаментов. Инъектируемая смола быстро набирает прочность. Её использование возможно для всех грунтов, поскольку полиуретановый композит не содержит частиц, размер которых может быть ограничен размерами пористости обрабатываемого грунта. Простота инъектирования, высокая мобильность оборудования и легкий вес вспенивающейся смолы в дополнение к независимости физико-механических свойств смолы от уровня грунтовых вод позволяют применять данную технологию в различных геотехнических условиях.

В рамках изучения этой технологии в мире было проведено весьма немного теоретических и практических исследований. Большинство из этих исследований были сосредоточены на процессе подъема фундаментов и мониторинге результатов инъектирования.

Применение этой технологии для усиления грунтовых оснований имело определённые ограничения в силу отсутствия достаточных научно-технических обоснований совместного поведения композита (грунт-смола), которые определяли бы влияние расширяемой смолы на грунтовые основания после нагнетания смолы. Отсутствуют методы для расчета несущей способности и оценки осадок оснований после инъектирования их смолой. Отсутствуют данные по механиче-

ским свойствам и геометрическим параметрам смолы после ее расширения в массиве грунта основания.

Во второй главе описан проведенный полномасштабный полевой эксперимент.

В июне 2017 года на опытной площадке были выбраны два участка квадратной формы, каждый со стороной 3 м (рисунок 1). На каждом участке располагалась ж/б плита толщиной 0,2 м. Процесс инъецирования грунта под давлением с использованием вспенивающейся полиуретановой смолы в режиме контролируемого гидроразрыва осуществлялся на одном участке, в то время как второй участок принимался в качестве контрольного для сравнения результатов. Непосредственно перед инъецированием на бетонную плиту инъецируемого участка помещался груз общей массой 11 тонн (давление на грунт составляло 0,012 МПа).

Исследования механических характеристик песчаного грунта на обоих участках включали два различных типа геотехнических испытаний. Испытание грунта ударным динамическим зондированием проводилось на контрольном участке и на инъецированном до и после нагнетания смолы. Штамповое испытание проводилось на контрольном участке и на инъецированном после нагнетания смолы.

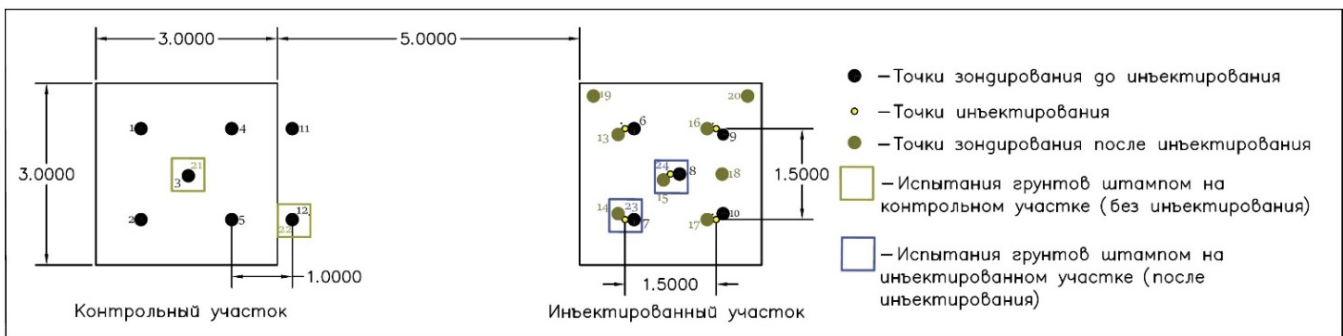


Рисунок 1 – Общий план полевого эксперимента

Процесс инъецирования

Нагнетание полиуретанового композита в песок осуществлялось в пяти точках (рисунок 2) с использованием гидравлической системы, где два компонента смолы смешивались и поступали в зоны грунта, которые необходимо обработать при постоянной температуре 15 °С и под средним давлением 100 бар.

В каждой точке инъеция выполнялась в три уровня на трех разных отметках по глубине (2 м, 1 м, и 0,5 м) соответственно (рисунок 2).

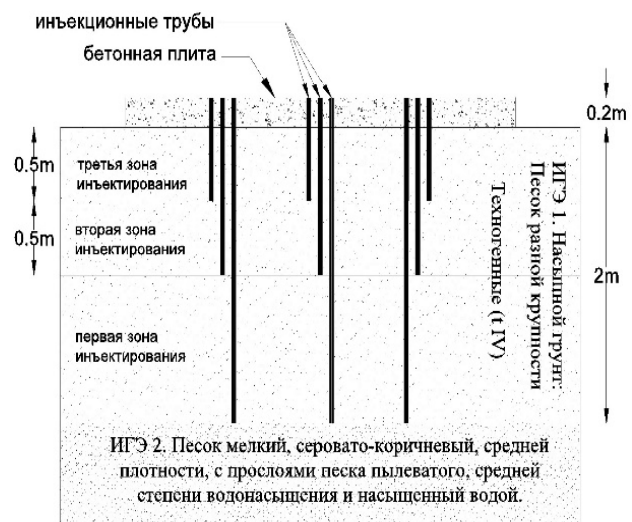


Рисунок 2 – Схема инъецирования

Целью процесса нагнетания было укрепление слоя песка под опытным фундаментом на глубину до 2 м и выравнивание бетонной плиты фундамента с подъемом на 1 см. До начала нагнетания плита имела разные отметки по высоте.

Мониторинг результатов подъема плиты осуществлялся, с помощью цифрового лазерного уровня с точностью (0,1 мм), до достижения заранее заданного уровня подъема.

Процесс нагнетания продолжался до выравнивания плиты. В результате выравнивания отдельные края плиты опытного фундамента были подняты на уровень до 12 мм. Результаты подъема по разным краям плиты показаны на рисунке 3.



Рисунок 3 – Результаты подъема по разным краям плиты опытного фундамента

Испытание грунта динамическим зондированием до и после инъектирования

В общей сложности в рамках проведения ударного динамического зондирования до и после инъектирования для сравнения были выбраны 20 точек (рисунок 1). Динамическое зондирование проводилось по методике ГОСТ 19912-2012. Сравнение результатов испытаний грунта динамическим зондированием всех исследованных точек до и после нагнетания смолы на глубину до 2 м (см. рисунок 4) показывают, что показатели условного динамического сопротивления песка значительно возросли после нагнетания его смолой.

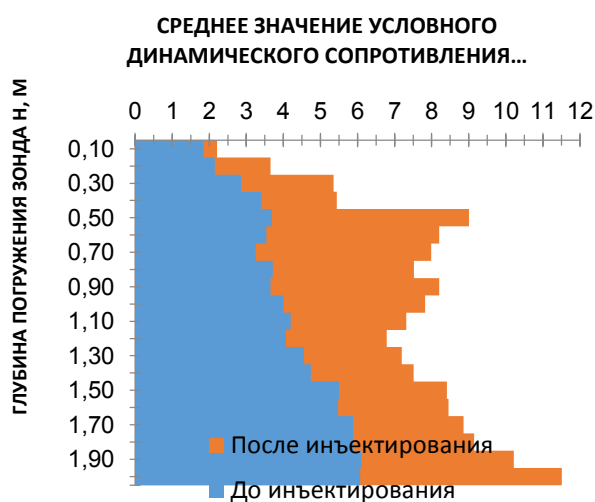


Рисунок 4 – Среднее значение динамического сопротивления всех исследованных точек до и после нагнетания смолы

Условное динамическое сопротивление насыпного песка до инъектирования варьировалось от 1,8 до 6 МПа до глубины 2 м, что свидетельствует о том, что в основном песок имел плотность сложения от рыхлого до среднетяжелого. Однако, после инъектирования его смолой песок имеет плотное сложение со средним увеличением динамического сопротивления на 81%.

Проникновение смолы в грунт основания

Нагнетаемая смола распространялась (рисунок 5) в массиве песчаного грунта, образуя сплошные стенки вспененных затвердевших пластин по всей инъектируемой глубине, со всех сторон охватывающие песок, и соединяющиеся друг с другом по краям в интервале расстояний около 30-50 см. Средняя толщина пластин составляла 1-2 см. Таким образом, уплотненный песок и пластины смолы образуют единую однородную среду.



Рисунок 5 – Распространение затвердевшей смолы в массиве закреплённого грунта

Расход смолы

Количество инъектированной смолы (за вычетом потерь) в массив грунта составило около 180 литров, что составляет 1% от всего объема инъектированного грунта.

В процессе нагнетания количество инъектированной смолы регистрировалось в каждой точке нагнетания на двух этапах:

1- Первым этапом является расход, необходимый для процесса закрепления грунта, пока не произойдет и не будет зафиксирован первоначальный подъем плиты.

2- Второй этап представляет собой объём смолы, необходимый для подъема плиты, который следует непосредственно за процессом закрепления грунта основания до достижения заданного уровня подъема.

Расход смолы на каждом этапе показан в таблице 1.

Таблица 1 – Расход смолы в каждой точке нагнетания при инъектировании в полевых условиях

Точка инъектирования	Объём, необходимый для закрепления грунта, (л)	Объём, необходимый для поднятия плиты, (л)	Потеря, (л)
Точка 1	22	9	3
Точка 2	19	7	2
Точка 3	37	17	7
Точка 4	17	13	3
Точка 5	28	11	5
Всего	123	57	20

Штамповое испытание

Штамповое испытание было выполнено на разных отметках как контрольного, так и инъектированного участка после инъектирования, чтобы определить степень изменения несущей способности и модуля деформации инъектированного грунта основания. В ходе данных испытаний применен жесткий штамп с круглой подошвой типа III по п.5.2.3. ГОСТ 20276-2012. Площадь штампа 600 см², диа-

метр 276 мм. На каждом участке испытание проводилось на двух отметках по глубине. Зоны и фактические глубины штамповых испытаний грунта на каждом участке показаны в таблице 2. Выбор глубин и точек исследования осуществлялся на основе результатов динамического зондирования, по которым видны наиболее совпадающие по характеристикам слои на обоих участках по заданной глубине (30-50 см) перед процессом инъектирования. Фактические локации штамповых испытаний на каждом участке показаны на рисунке 1. Все испытания проводились согласно методике ГОСТ 20276-2012. Испытания грунтов штампом на каждом участке на разных глубинах показаны на рисунках 6, 7.



Рисунок 6 – Испытания грунтов штампом №1, 2 на контрольном участке на глубине 0,4 и 1,2 м соответственно



Рисунок 7 – Испытания грунтов штампом №3, 4 на инъектированном участке на глубине 0,4, 1,1 м соответственно

Результаты сравнения зависимости давление-осадка на каждой исследуемой глубине, как на контрольном, так и на инъектированном участке после процесса нагнетания смолы показаны на рисунках 8, 9. Сводные результаты штамповые испытаний приведены в таблице 2.

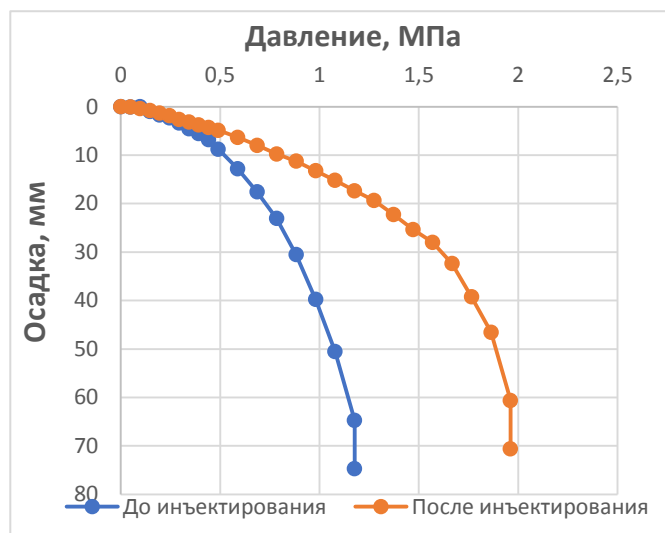


Рисунок 8 – Зависимость осадки от давления на глубине 0,4 м до и после инъектирования

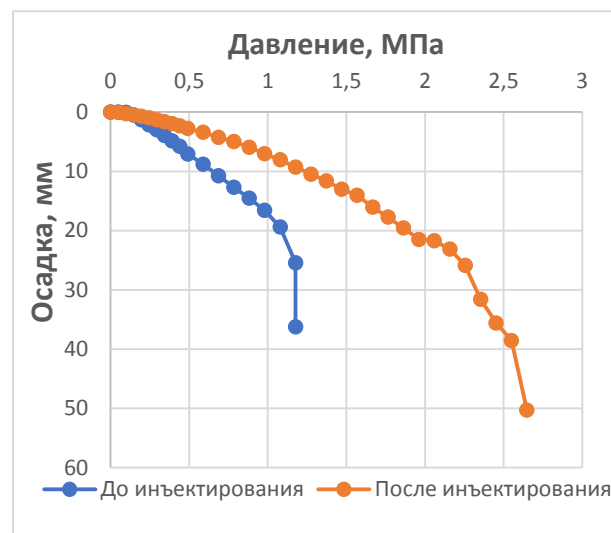


Рисунок 9 – Зависимость осадки от давления на глубине 1,1 м и 1,2 м до и после инъектирования соответственно

Модуль деформации грунта E определен по каждому из испытаний в соответствии с указаниями раздела 5.5 ГОСТ 20276-2012. Модуль деформации вычисляется по формуле (1).

$$E = (1 - \nu^2) Kp * K1 * D (\Delta P / \Delta S) \quad (1)$$

где $\nu = 0,3$ – коэффициент Пуассона, принятый для песков; $Kp = 1$, так как испытания выполнены в шурфах; $K1 = 0,79$ для круглого жесткого штампа; $D = 27,6$ см – диаметр штампа; ΔP – приращение давления штампа, МПа; ΔS – приращение осадки, см.

Таблица 2 – Сводные результаты штамповых испытаний

Зона испытания	№ испытания	Глубина от УДП, м	Модуль деформации, МПа	Предельная критическая нагрузка, МПа
Без инъектирования (контрольный участок)	1	0,4	10,6	1,18
	2	1,2	11,1	1,18
После инъектирования (инъектированный участок)	3	0,4	16,4	1,96
	4	1,1	33,6	2,65

Сравнение результатов штамповых испытаний до и после нагнетания вспениваемой смолы на разных глубинах показало следующее:

а. Предельная критическая нагрузка на штамп при испытании инъектированного песка увеличивается на 67% и 125% на исследуемых отметках 0,4 и 1,1 м соответственно.

б. Рассчитанный модуль деформации E закреплённого песка увеличивается на 55% и 203% на исследуемых глубинах 0,4 и 1,1 м соответственно.

с. Сравнение результатов штамповых испытаний на всех исследованных отметках до и после нагнетания смолы соответствует результатам динамического зондирования. Полученные результаты показывают увеличение предельной критической нагрузки на штамп после инъектирования, что свидетельствует о соответствующем увеличении несущей способности инъектированного основания и увеличении его модуля деформации.

В третьей главе описаны проведенные лабораторные испытания.

Для разработки нового метода расчета, конструирования и устройства грунтовых оснований, усиленных расширяемой смолой, определялись:

1. Механические свойства и НДС исследуемого песка до его инъектирования вспениваемой смолой, при помощи испытания на трехосное сжатие.

2. Фактическая плотность смолы, образующейся в массиве грунта после инъектирования.

3. Механические свойства и НДС смолы различной плотности в соответствии со степенью ее объемного расширения в массиве грунтов оснований.

4. Соотношения прочности и плотности вспенивающейся полиуретановой смолы для различных объемных расширений.

Испытания образцов грунта на трёхосное сжатие

Шесть цилиндрических образцов грунта были испытаны на трёхосное сжатие в стабилометре по методике ГОСТ 12248-2010. Получены нормативные значения деформационных и прочностных характеристик (таблицы 3, 4). Результаты испытания в виде графического паспорта показаны на рисунке 10.

Таблица 3 – Расчётные параметры прочности исследованного грунта до инъецирования

Угол внутреннего трения, φ , град	Расчётное удельное сцепление, c , кПа
40,5	6,921

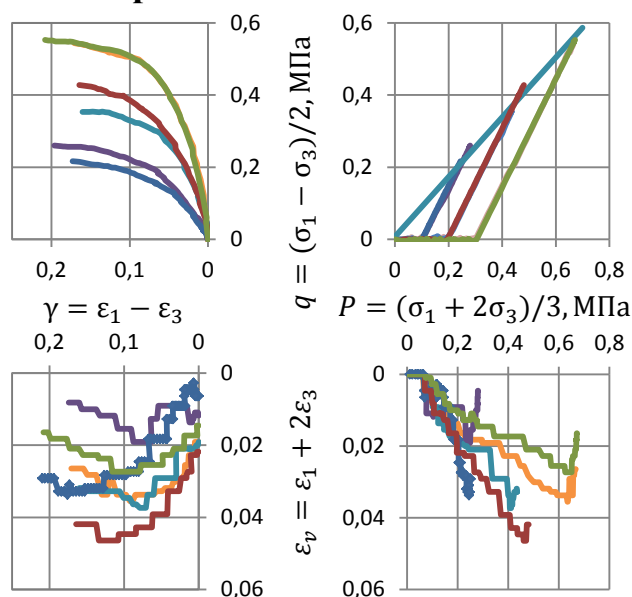


Рисунок 10 – Графический паспорт консолидированно-дренированного испытания песка до инъецирования

Таблица 4 – Расчётные деформационные параметры исследованного грунта

Напряжение при разрушении в камере,	Модуль деформации E , МПа	Модуль объёмной деформации K , МПа	Модуль сдвига G , МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Угол дилатансии, град
0,1	7,958	12,76	2,85	0,4	5,7
0,196	17,834	12,77	7,04	0,27	4,5
0,303	29,81	18,3	12,13	0,23	6,7
0,108	8,701	10,84	3,18	0,37	6,9
0,198	16,648	13,13	6,46	0,29	3,7
0,305	27,375	24,95	10,39	0,32	5,9
Средние значения	18,054	15,458	7,009	0,31	5,6

Определение плотности смолы, образующейся в массиве грунта основания

В ходе полевых исследований 25-ти образцов смолы (с размерами 3*3 и 6*6 см) были извлечены из различных мест инъецированного грунтового участка для определения средней плотности результирующего материала, образующегося после процесса инъецирования (рисунок 11). Плотность каждого образца смолы определяли по методике п.2 ГОСТ 15139-69.



Рисунок 11 – Полученные образцы смолы

Было установлено, что средняя плотность смолы, образующейся в массиве инъецированного грунта, составляет $0,184 \text{ г/см}^3$. Плотность смолы в жидком состоянии составляет $1,1 \text{ г/см}^3$. Таким образом, смола расширилась в шесть раз после нагнетания по сравнению с её исходным объемом.

В соответствии с расходом смолы, определяемым в процессе инъектирования, было установлено, что фактический объем результирующей смолы, необходимый для укрепления грунта, составил 4% от общего объема инъектированного массива, в то время как для поднятия плиты опытного фундамента до заданного уровня (10 мм) фактический объем смолы составил 2% от общего объема инъектированного песка с учетом степени расширения смолы.

Определение механических параметров образцов смолы различной плотности на основе объёмного расширения смолы

Образцы смолы (33 шт.) различной плотности были приготовлены в лабораторных условиях (рисунок 12). Плотность каждого образца определялась по методике п.2 ГОСТ 15139-69. Средняя плотность была рассчитана для каждого предложенного коэффициента расширения смолы (см. таблицу 5).



Рисунок 12 – Полученные образцы смолы различной плотности

Далее, полученные образцы смолы различной плотности были испытаны на одноосное сжатие с целью определения механических свойств смолы для каждой полученной плотности. Испытание проводилось по методу установленной деформации ГОСТ 4651-2014. Примеры полученных результатов НДС смолы для каждого полученного образца для различных коэффициентов расширения представлены на рисунках 13–15.

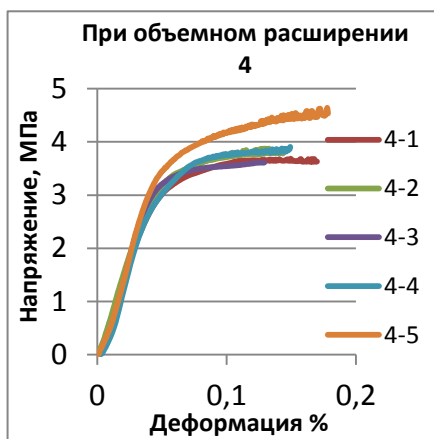


Рисунок 13 – Напряженно-деформированное состояние при коэффициенте объёмного расширения 4

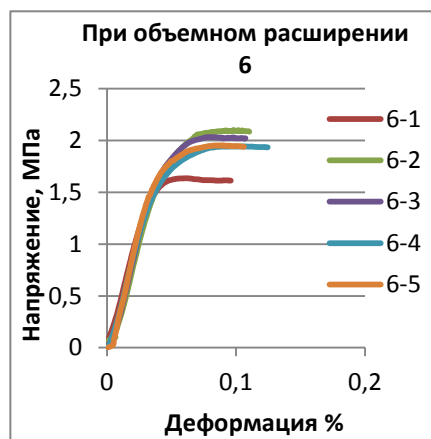


Рисунок 14 – Напряженно-деформированное состояние при коэффициенте объёмного расширения 6

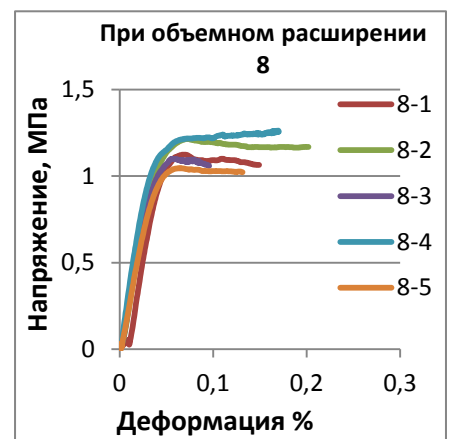


Рисунок 15 – Напряженно-деформированное состояние при коэффициенте объёмного расширения 8

При интерпретации результатов для каждого образца были определены нормативные значения предельной прочности, предела текучести и модуля упругости для каждого коэффициента объёмного расширения (таблица 5). Модуль упругости был рассчитан при деформации равной 50% деформации на упругом участке деформационной кривой (предел текучести) каждого образца с использованием следующей формулы:

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (2)$$

где E – модуль упругости; σ – напряжение равное 50% предела текучести; ε – деформация равная 50% деформации текучести.

Таблица 5 – Полученные характеристики смолы в зависимости от их коэффициента объемного расширения

Коэффициент расширения смолы	Сред. знач. плотности смолы, г/см ³	Сред. знач. предела текучести, МПа	Сред. знач. предельной прочности, МПа	Сред. знач. модуля упругости, МПа
3	0,349	5,145	6,756	104
4	0,255	2,886	3,943	73
6	0,184	1,597	1,933	44
8	0,128	1,020	1,150	30
10	0,088	0,558	0,636	18
12,5	0,066	0,407	0,447	14
15	0,056	0,236	0,275	9

Далее, установлены соотношения между плотностью и прочностью на сжатие в дополнение к зависимости модуля упругости от плотности на сжатие (рисунки 16, 17). Полученные соотношения показывают, что смола может образовывать результирующие композиты с различными показателями плотности, обеспечивающие широкий спектр механических свойств в массиве грунта $E= 5\text{--}121$ МПа, предельной прочности $\sigma = 0,2\text{--}7$ МПа, соответственно, при различных соотношениях диапазонов расширения в 3–15 раз.

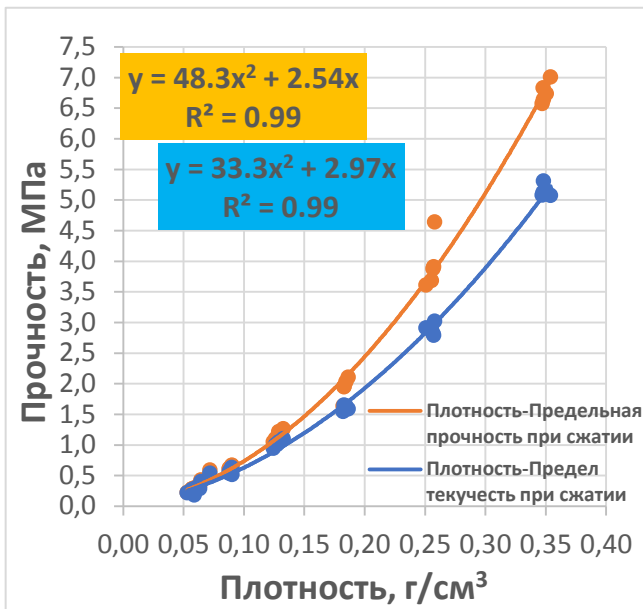


Рисунок 16 – Соотношение между плотностью смолы и ее прочностью на сжатие

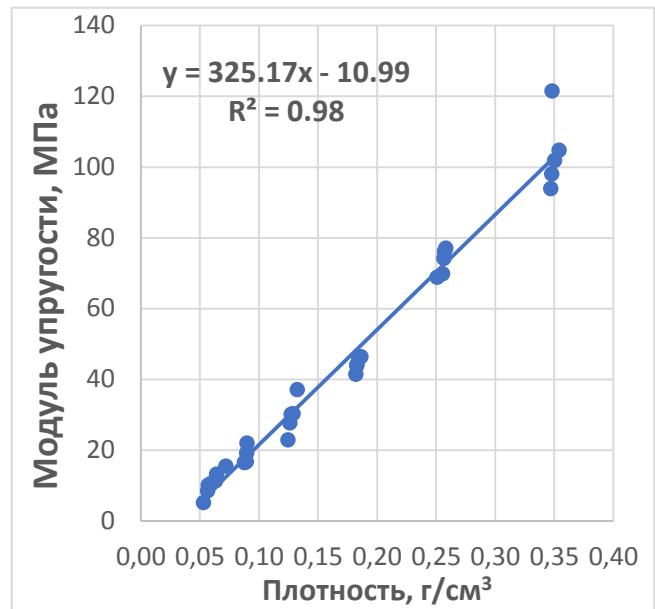


Рисунок 17 – Соотношение между плотностью смолы и ее модулем упругости

В четвертой главе приведено численное моделирование, целями которого являются разработка метода расчета несущей способности и оценки осадок усиленных расширяемой смолой оснований и проверка ее достоверности. Для этого проведено моделирование композита (грунт-смола) с использованием ранее полу-

ченных лабораторных характеристик грунта и смолы, а также результатов полевых испытаний.

Подбор параметров исходного грунта для моделирования

С помощью обобщенной упруго-вязко-пластической модели программы FEM-models нами были аппроксимированы результаты лабораторных испытаний грунта на трехосное сжатие (рисунок 18) для выбора корректных параметров песчаного грунта основания (таблица 6), необходимых для моделирования композита.

Также выбранные параметры были проверены и подтверждены при моделировании трехосного испытания путем оперативного математического моделирования стандартных лабораторных испытаний грунтов с использованием моделей Hardening Soil (опция «soil test») программы Plaxis 2D (рисунок 19).

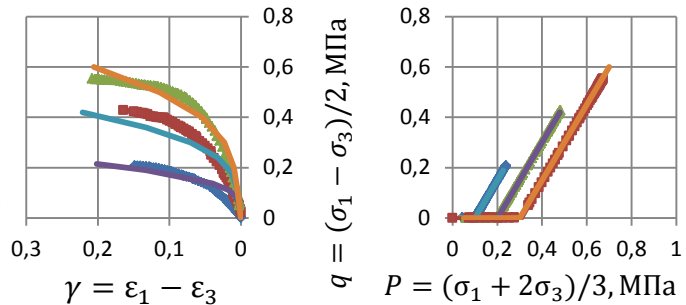


Рисунок 18 – Аппроксимация результатов лабораторных трехосных испытаний для выбора параметров модели исследуемого песка

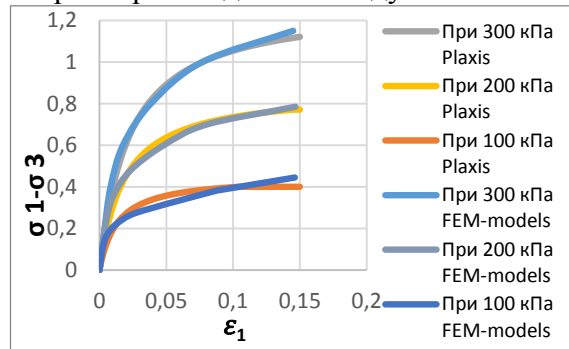


Рисунок 19 – Результаты имитаций трехосных испытаний песка, проведённых с помощью модели Hardening Soil программы Plaxis 2D в сравнении с моделированием в программной среде FEM-models

Таблица 6 – Полученные параметры моделирования для исследуемого песка

Параметр модели (FEM-models)	Ед. изм.	Значение
Модуль деформации	кПа	18975
Начальное давление при компрессии	кПа	100
Конечное давление при компрессии	кПа	200
Начальное объемное напряжение	кПа	200
Начальный модуль деформации	кПа	60000
Коэффициент Пуассона	----	0,30
Удельный вес	кН/м ³	18
Удельное сцепление	кПа	6,921
Угол внутреннего трения	град	40,5
Угол внутреннего трения при разгрузке	град	40,5
Деформация сдвига при разрушении	%	0,15
Показатель степени	----	8

Моделирование трехосного лабораторного испытания и определение напряжения в грунтовом основании без включения смолы

Модель трехосного лабораторного испытания была построена в программном комплексе FEM-models с использованием обобщенной упруго-вязкопластической модели.

Расчетная схема состоит из элементов одного слоя грунта, подвергающегося воздействию трехосной гидростатической нагрузки 100 кПа (рисунок 20).

Геометрические параметры модели составляют 1*1*2 м, а глубина модели составляет 2 м, что соответствует глубине опытного инъецирования.

По физико-механическим параметрам грунтов, полученных в ходе лабораторных испытаний грунтов трехосным сжатием (таблица 6), рассчитаны напряжения в грунте без включения элементов смолы (рисунок 21).

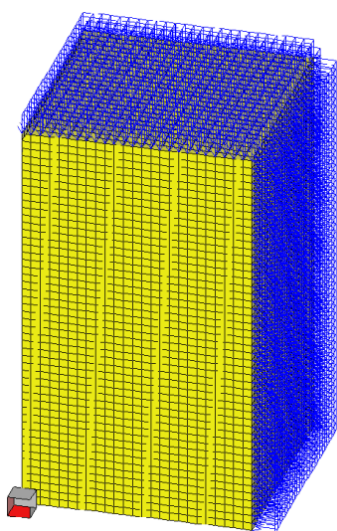


Рисунок 20 – Расчетная схема виртуального лабораторного испытания грунта трехосным сжатием без включения смолы

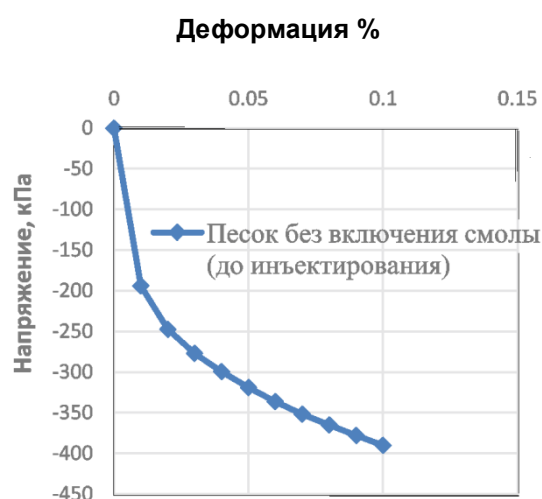


Рисунок 21 – Результаты расчета напряжения в грунте без включения смолы

Подбор параметров инъецируемой смолы

Виртуальное трехосное испытание для вспенивающейся смолы построено с идентичными граничными условиями модели грунта с целью получения параметров модели смолы в соответствии с ее характеристиками, полученными в ходе лабораторных испытаний при ее фактической плотности, сформированной в массиве инъецированного грунта (рисунок 22).

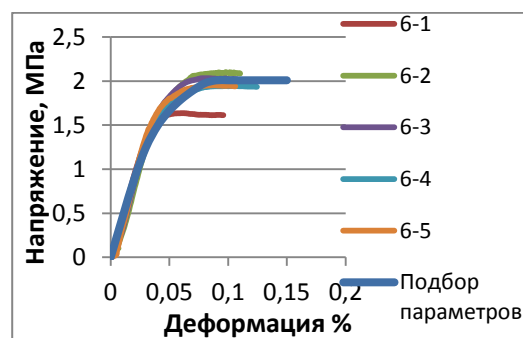


Рисунок 22 – Результаты моделирования НДС смолы при ее фактической плотности, сформированной в массиве инъецированного грунта

Определение параметров грунта основания с включением инъектируемой смолы

Моделировалось лабораторное трехосное сжатие. Расчетная схема состоит из композитной системы грунта с включением смолы, сформированной в соответствии с ее геометрическими параметрами и фактическим распространением смолы в массиве грунта инъектированного основания (рисунок 5). Различные формы распространения смолы были включены в расчетную схему в рамках виртуального лабораторного испытания (рисунки 23, 24).

С помощью численных расчетов при различных вариантах распространения смолы в диапазоне всесторонних давлений 100-300 кПа были получены осреднённые характеристики результирующего композита (рисунки 25, 26).

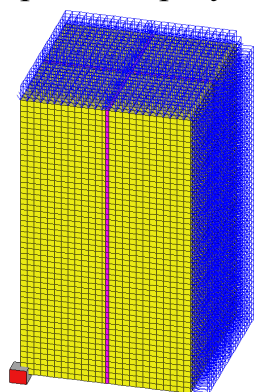


Рисунок 23 – Расчетная схема виртуального лабораторного испытания композитной системы (грунт с включением смолы)

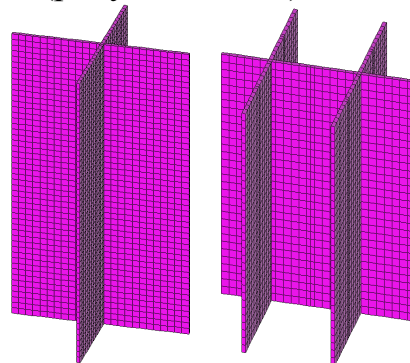


Рисунок 24 – Пример формы распространения смолы, включённых в расчетную схему виртуального лабораторного испытания композитной системы

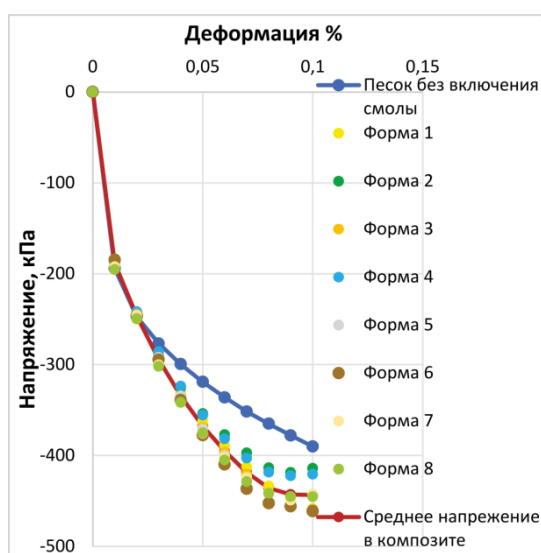


Рисунок 25 – Результаты напряжения до и после включения смолы при нагрузке 100 кПа. Кривая красного цвета представляет среднее напряжение в композите после включения смолы при различных конфигурациях распространения смолы

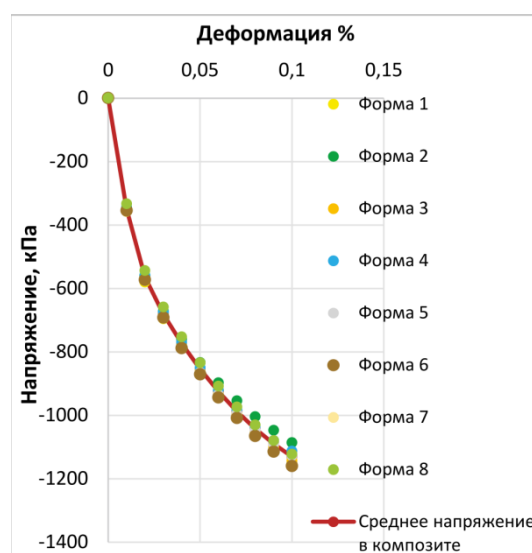


Рисунок 26 – Результаты напряжения в композите при нагрузке 300 кПа. Кривая красного цвета представляет среднее напряжение в композите после включения смолы при различных конфигурациях распространения смолы

Измененные параметры грунта после включения смолы были определены с использованием критериев разрушения кулона Мора в соответствии со следующими формулами:

$$C + M \left(100 + \frac{\sigma_{100}}{3} \right) = \frac{\sigma_{100}}{2} \quad (3)$$

$$C + M \left(300 + \frac{\sigma_{300}}{3} \right) = \frac{\sigma_{300}}{2} \quad (4)$$

где $M = \frac{3 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$; σ_{100} – максимальное напряжение при 100 кПа; σ_{300} – максимальное напряжение при 300 кПа.

Расчётные значения модифицированного удельного сцепления после включения смолы приведены в таблице 7.

Видно, что закрепление грунта вспениваемой смолой приводит к появлению в массиве закрепленного песчаного грунта удельного сцепления, объясняемого включением смолы, что в свою очередь приводит к соответствующему увеличению несущей способности естественных оснований после инъецирования их смолой.

Таблица 7 – Расчётные значения модифицированного сцепления после включения смолы

Расчетное сцепление	Формы распространения смолы	Значение, кПа
Минимальное	2	11,551
Среднее	Средняя	18,059
Максимальное	6	22,458

Определение приведенных параметров однородной среды эквивалентной грунту с включением инъецируемой смолы

На данном этапе моделировалось лабораторное испытание грунта основания без включения смолы при использовании полученных осреднённых характеристик композита (таблица 7).

Таким образом, была получена модель грунта без включения смолы, характеристики которой эквивалентны грунту с включением смолы (рисунок 27).

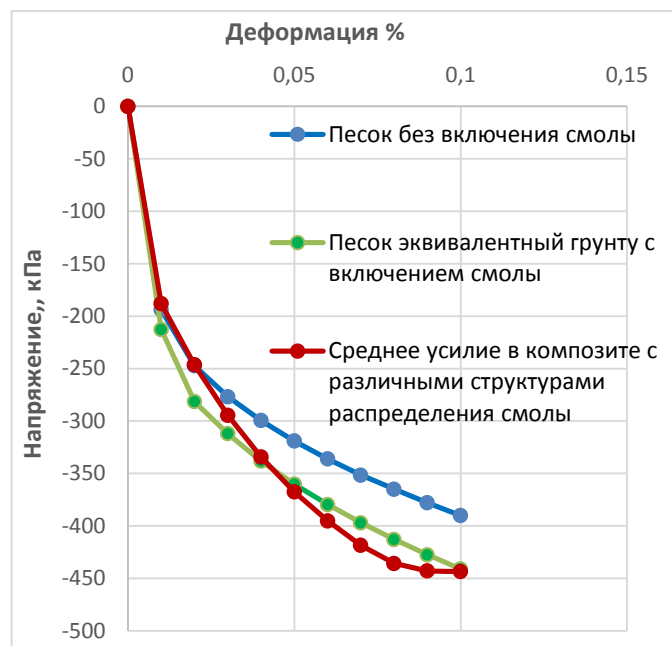


Рисунок 27 – Результаты напряжения в грунте без включения смолы, характеристики которой эквивалентны грунту с включением смолы

Проверка достоверности разработанного метода расчета путём сопоставления его с результатами полевых испытаний

В программе Plaxis 2D была построена осесимметричная модель штамповых испытаний с использованием Hardening Soil Model в соответствии с однородными условиями полевых испытаний. Расчетная схема модели представляет собой однослойное грунтовое основание, подвергнутое испытанию круглым штампом площадью 600 см^2 в полевых условиях, т.е. воздействию вертикальной нагрузки при однородной среде в полевых условиях до и после инъецирования (рисунки 28–31).

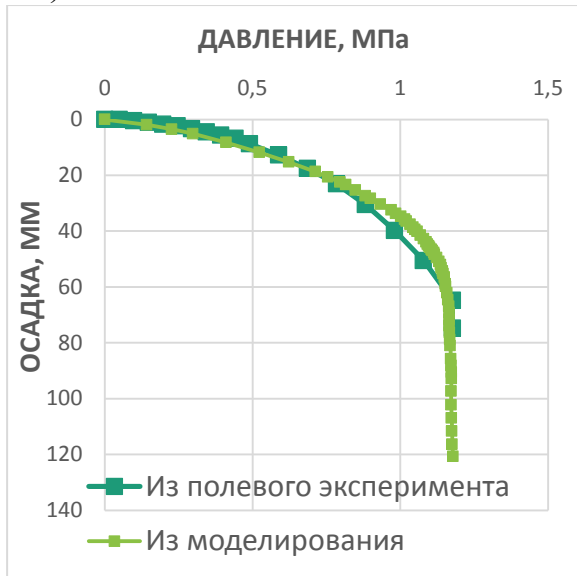


Рисунок 28 – Моделирование полевого испытания грунтов штампом до инъецирования на глубине 0,4 м

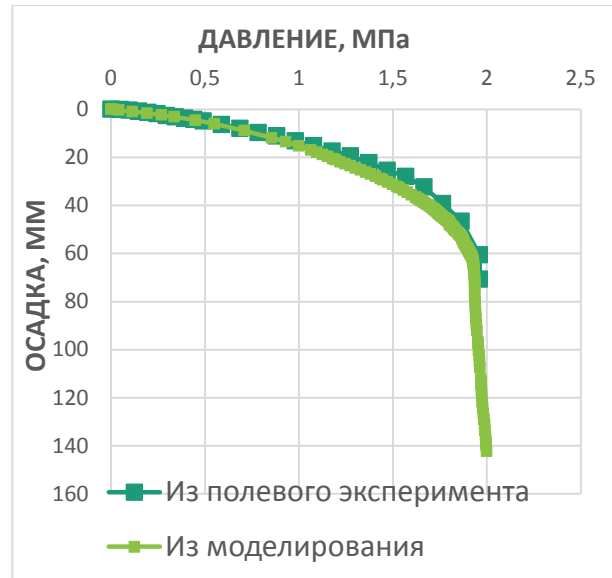


Рисунок 29 – Моделирование полевого испытания грунтов штампом после инъецирования на глубине 0,4 м

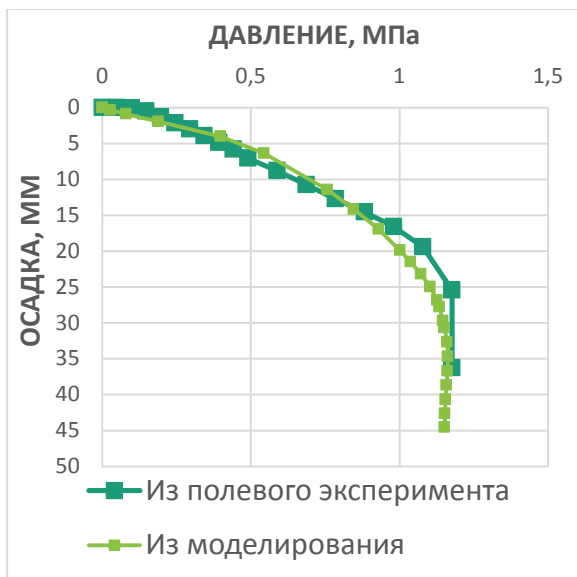


Рисунок 30 – Моделирование полевого испытания грунтов штампом до инъецирования на глубине 1,2 м

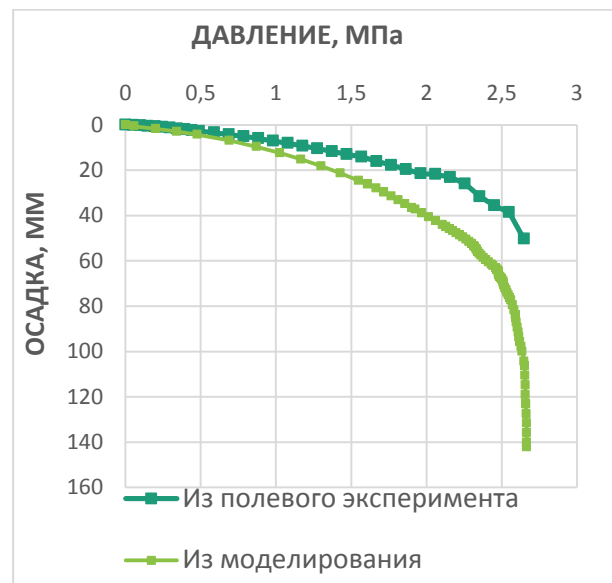


Рисунок 31 – Моделирование полевого испытания грунтов штампом после инъецирования на глубине 1,1 м

Рассчитанная предельная критическая нагрузка при моделировании испытания грунтов штампом на контрольном участке (с использованием исходных параметров грунта без включения смолы) составляла 1,18 и 1,15 МПа (рисунки 28, 30). Данные результаты совпадают с результатами полевых исследований грунтов штампом без инъектирования, в которых предельная критическая нагрузка составляла 1,18 МПа на исследованных отметках 0,4 и 1,2 м соответственно.

Рассчитанная предельная критическая нагрузка при моделировании испытания грунтов штампом на инъектированном участке (с использованием выходных параметров композита, полученных из численного расчета) составляла 2 и 2,66 МПа (рисунки 29, 31). Результаты расчета совпадают с экспериментальными для инъектированного основания, в которых предельная критическая нагрузка составляла 1,96 и 2,65 МПа на исследованных отметках 0,4 и 1,1 м соответственно.

Таким образом, результаты моделирования натуральных штамповых испытаний с достаточной точностью отражают поведения инъектированных смолой оснований, что свидетельствует о достоверности предложенного метода расчета несущей способности и оценки осадок усиленных смолой оснований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. **Практически подтверждена** эффективность рассмотренной технологии для быстрого выравнивания оснований и компенсации осадок фундаментов зданий и сооружений.

2. По результатам полевых испытаний исследованного песчаного грунта основания до и после нагнетания в его массиве двухкомпонентной вспениваемой полиуретановой смолы в режиме гидроразрыва **выявлено**, что:

– Показатели условного динамического сопротивления исследуемого песка увеличились после нагнетания его вспениваемой смолой. Среднее значение увеличения динамического сопротивления составляет 81%.

– Предельная критическая нагрузка песчаного основания после инъектирования увеличилась на 67% и 125% на исследуемых отметках 0,4 и 1,1 м соответственно. Также рассчитанный модуль деформации укрепленного смолой песка увеличился на 55% и 203% на исследуемых глубинах 0,4 и 1,1 м соответственно.

3. **Определены** геометрические параметры и конфигурация распространения вспениваемой смолы в массиве песчаного грунтового основания. **Установлено**, что смола распространялась по всей глубине грунтового слоя на расстояние 30–50 см, образуя идентичные сплошные стенки из вспененных затвердевших полимерных пластин со средней толщиной 1–2 см, охватывающих инъектируемый песчаный грунт со всех сторон, приводя к его закреплению.

4. В процессе наблюдения за параметрами расхода смолы, зарегистрированными во время инъектирования, **установлено** что:

– Объем расхода смолы, необходимый для подъема опытного фундамента, подвергающегося нагрузке от $1,2 \text{ т/м}^2$ до заданного уровня, и укрепления слоя песка под ней составил 180 литров, что соответствует 1% от общего объема закачанного грунта ($3 \times 3 \times 2 \text{ м}$) на каждые 10 мм подъема без учета расширения смолы.

– Количество смолы необходимое для укрепления массива грунта под фундаментной плитой составило примерно 123 литра, после чего дополнительные 57 литров смолы нагнетались уже для обеспечения подъема самой плиты. Таким образом, **выявлено**, что количество смолы, необходимое для укрепления массива исследованного грунта, более чем в два раза превышает количество, необходимое для реализации подъема самой плиты до 1 см.

5. По результатам лабораторных экспериментов **выявлено**:

– Соотношение между плотностью и предельной прочностью ($\sigma = 48,3 \rho^2 + 2,54 \rho$) и соотношение между плотностью и модулем упругости ($E = 325,17\rho - 10,99$) расширяемой смолой в пределах диапазона значений плотности (от 0,053 до 0,354 г/см³) и коэффициентов объемного расширения смолы (от 3 до 15) соответственно.

– Плотность вспениваемой смолы, образующейся в массиве инъецированного песчаного грунта, которая составила 0,184 г/см³. Было также **доказано**, что в массиве исследованного песчаного грунта смола подверглась расширению в шесть раз по сравнению со своим первоначальным объемом.

– Фактический объем результирующей смолы, необходимый для укрепления грунта, составил 4% от общего объема грунтового массива, подвергнутого инъецированию, в то время как для поднятия опытного фундамента до заданного уровня (10 мм) фактический объем смолы составил 2% от общего объема с учетом степени ее расширения.

6. По результатам численного моделирования

– **Разработан** метод расчета несущей способности и оценки осадок усиленных расширяемой смолой оснований, что, в свою очередь, обеспечивает улучшение практики проектирования для дальнейшего совершенствования применения данной технологии, а также с целью повышения её эффективности и эксплуатационной надежности.

– В итоге численных расчетов **показано**, что инъецирование несвязного грунта расширяемой смолой приводит к появлению в его массиве удельного сцепления, что приводит к соответствующему увеличению несущей способности естественных оснований.

– Путем сопоставления результатов численного моделирования с результатами натурных штамповых испытаний **подтверждена** достоверность предложенного метода для расчета несущей способности и оценки осадок усиленных смолой оснований.

7. Результаты исследований **внедрены** в ООО «ПИ Геореконструкция», Санкт-Петербург при проектировании компенсационных мероприятий по подъему фундаментов и закреплению грунтов оснований на различных объектах.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Возможным направлением дальнейших исследований может быть укрепление расширяющейся полиуретановой смолой других типов грунтов оснований.

Список работ, опубликованные автором по теме диссертации:

В изданиях, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки РФ и индексируемых в БД Scopus:

1. Sabri, M.M., Shashkin, K.G., Zakharin, E. Ulybin, A.V. “Soil stabilization and foundation restoration using an expandable polyurethane resin”, Magazine of Civil Engineering. – 2018. **82** (6). Pp. 68–80. doi: 10.18720/MCE.82.7.

2. Sabri, M.M., Shashkin, K.G. “Improvement of the soil deformation modulus using an expandable polyurethane resin”, Magazine of Civil Engineering. – 2018. **83** (7). Pp. 223–235. doi: 10.18720/MCE.83.20.

3. Sabri, M.M., Shashkin, K.G. The mechanical properties of the expandable polyurethane resin based on its volumetric expansion nature, Magazine of Civil Engineering. – 2020. **98** (6). doi: 10.18720/MCE.98.11.

В изданиях, включенных в Перечень ВАК:

4. Sabri, M.M., Shashkin, K.G. “Subsoil stabilized by polyurethane resin injection: FEM calculation”, Construction of Unique Buildings and Structures. – 2020. **98** (6). doi: 10.18720/CUBS.91.8.

В изданиях, индексируемых в БД Scopus:

5. Sabri, M., Bugrov, A., Panov, S., Davidenko, V. Ground improvement using an expandable polyurethane resin (2018), MATEC Web of Conferences, **245**, art. no. 01004. doi: 10.1051/matecconf/201824501004.