

На правах рукописи



Давлатов Далер Назуллоевич

**УСИЛЕНИЕ ЛЕНТОЧНЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ
ПЕРЕУСТРОЙСТВОМ В КОМБИНИРОВАННЫЙ
С ОПРЕССОВКОЙ И ЦЕМЕНТАЦИЕЙ ОСНОВАНИЯ**

05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Тюмень - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Пронозин Яков Александрович

Официальные оппоненты:

Невзоров Александр Леонидович

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Северный (Арктический)
федеральный университет имени М.В.
Ломоносова», заведующий кафедрой
«Инженерная геология, основания и
фундаменты»

Конюшков Владимир Викторович

кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-
строительный университет», доцент
кафедры «Геотехника»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный архитектурно-
строительный университет (Сибстрин)»

Защита диссертации состоится «01» декабря 2020 года в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.273.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте www.tyuiu.ru.

Автореферат разослан «21» октября 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Фундаменты зданий и сооружений во многом определяют безопасность эксплуатации строительных объектов на агломерационных территориях. В настоящее время актуальны вопросы модернизации, реконструкции зданий, капитального ремонта, реновации существующего жилого фонда. Реконструкция зачастую включает в себя увеличение этажности, изменение функционала объектов и связанное с этим изменение нагрузок на грунтовые основания. Причинами для проведения ремонтных работ является не только моральный износ, но и физическое старение, связанное с деструкцией материала фундаментов, изменением свойств оснований, ошибками на этапах изысканий, проектирования, строительства, эксплуатации.

Важным геотехническим аспектом остается устройство при реконструкции подвальных помещений, что особенно актуально в стесненных городских условиях. В этом случае может меняться расчетная схема системы «основание-фундамент», что требует проведения дополнительных мероприятий.

В настоящее время в строительстве и реконструкции используются различные геотехнические способы и технологии. За счет их общего развития смещение происходит в сторону использования новых прогрессивных технологий, включая инъекционные и струйные способы закрепления грунтов и улучшения их структуры. Высокая эффективность данных методов часто граничит с определенными, при чем существенными недостатками, к которым можно отнести: сложность контроля зон усиления в основании; существенный разброс по массиву характеристик прочности и деформируемости; ненадежный прогноз моделирования основания под эксплуатационные нагрузки.

Поскольку усиление оснований и фундаментов, как правило, самая ответственная и при этом затратная часть реконструкции, решение по выбору способа и технологии должно подлежать всесторонней оценке.

Таким образом, актуальной *задачей* является разработка новых, в том числе комбинированных систем усиления оснований и фундаментов на основе традиционных и активно развивающихся прогрессивных технологий, а также совершенствование методов их расчета.

Эффективным, с позиций максимального использования ресурсов жесткости и несущей способности грунтового основания, способом повышения эксплуатационной надежности и снижения осадок повсеместно распространенных ленточных свайных фундаментов (далее – ЛСФ) следует считать их переустройство в сплошной комбинированный фундамент с опрессовкой грунтов основания, осуществляемой путем подачи растворной смеси под плитную или оболочечную часть для обжатия верхних слоев в активной зоне основания.

Особенностями комбинированной системы усиления являются:

- включение в работу массива грунта, находящегося в контуре плана здания и в уровне сжимаемой толщи;
- сохранность существующих ростверков;
- контролируемость процесса переустройства посредством точной фиксации деформаций пролетной части при опрессовке;
- прогнозируемая разгрузка свай за счет пролетной (плитной или оболочечной) части;
- создание опрессовкой «наведенного» дополнительного напряженно – деформированного состояния (далее – НДС) в основании, позволяющего создать дополнительное боковое обжатие свай, что приводит к увеличению их несущей способности;
- устранение полостей в контактном слое «существующий ростверк – грунтовое основание» за счет выполнения опрессовки цементным раствором;
- снижение деформируемости слабых слоев в активной зоне основания цементацией по методу манжетной технологии для эффективного включения в работу пролетной (плитной или оболочечной) части;
- создание противофильтрационной конструкции в пролетной части путем использования в качестве инъекции гидротехнических растворов, что дает возможность создания эксплуатируемой подземной части при высоком уровне подземных вод.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами усиления ленточных свайных фундаментов переустройством занимались Г.У. Бабушкин, Я.Д. Гильман, Н.В. Дмитриев, А.И. Егоров, В.А. Зурнаджи, П.А. Коновалов,

А.И. Мальганов, А.П. Малышкин, Э.И. Мулюков, Ю.В. Наумкина, А.И. Полищук, Я.А. Пронозин, В.М. Улицкий, Б.С. Федоров, Б.В. Швец, Г.И. Швецов, А.Н. Шихов, Н. Brand, N.P. Kurian, W. Hollstegge, F. Lizzi, N. Muhra и др.

Объект исследования: геотехническая система «основание – фундамент» при переустройстве ленточных свайных фундаментов в комбинированные с опрессовкой основания пролетной части и улучшением строительных свойств грунта цементацией.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние геотехнической системы «основание – фундамент» в условиях переустройства ленточных свайных фундаментов в комбинированные с опрессовкой пролетной части основания и улучшения его строительных свойств цементацией.

Цель исследования: экспериментально–теоретическим путем выявить закономерности взаимодействия геотехнической системы «основание – фундамент» при переустройстве ленточных свайных фундаментов в комбинированный путем опрессовки пролетной части и изменения свойств грунтов основания цементацией с использованием ресурса несущей способности свай и жесткости активной зоны грунтового основания.

Задачи исследования:

1. Разработать комбинированную систему усиления ленточных свайных фундаментов путем переустройства их в сплошной с опрессовкой основания в пролетной части и усилением слабых слоев грунта цементацией, что позволяет максимально использовать ресурсы несущей способности и жесткости активной зоны грунтового основания.

2. В лабораторных условиях на маломасштабных моделях выявить закономерности взаимодействия глинистого грунтового основания со сваями и ленточными свайными фундаментами при их переустройстве в комбинированные с опрессовкой и без нее.

3. В рамках разработки методики расчета системы усиления установить изменение модуля деформации грунта в зависимости от коэффициента пористости, при опрессовке и цементации и выявить изменение несущей способности свай за счет их дополнительного бокового обжатия при использовании рассматриваемого способа усиления.

4. Разработать алгоритм расчета осадки переустроенных по предлагаемому методу комбинированных фундаментов с учетом особенностей данной геотехнической системы.

5. Выполнить численное моделирование взаимодействия рассматриваемой геотехнической системы усиления ленточных свайных фундаментов при переустройстве их в комбинированные свайные фундаменты с максимальным использованием ресурсов несущей способности активной зоны грунтового основания.

6. Выполнить экспериментальные исследования геотехнической системы усиления ленточных свайных фундаментов при переустройстве их в комбинированный в условиях усиления многоэтажного жилого дома с сопоставлением полученных результатов и теоретических данных.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Подтверждена эффективность способа усиления ленточных свайных фундаментов путем переустройства их в комбинированный с опрессовкой грунтового основания на моделях в лабораторных условиях.

2. Разработана методика расчета осадки комбинированных свайных фундаментов, полученных путем переустройства из ленточных свайных фундаментов с учетом опрессовки пролетной части основания и улучшения строительных свойств грунтов основания цементацией.

3. Выявлены закономерности взаимодействия рассматриваемой системы усиления в виде комбинированных свайных фундаментов с учетом опрессовки пролетной части основания и улучшения строительных свойств грунтов основания цементацией с грунтовым основанием, на основе численного моделирования с учетом разработанных конструктивных и технологических приемов усиления.

4. Получены фактические экспериментальные данные по взаимодействию геотехнической системы «основание – фундамент» в условиях переустройства ленточных свайных фундаментов в комбинированный с учетом опрессовки пролетной части основания и улучшения его строительных свойств цементацией на реальном строительном объекте, и выполнено сопоставление экспериментальных результатов с расчетными.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в разработке системы усиления ленточных свайных фундаментов путем переустройства их в сплошной с опрессовкой основания в пролетной части и усилением слабых слоев грунта цементацией, что позволяет максимально использовать ресурсы несущей способности и жесткости активной зоны грунтового основания;
- в предложении инженерной методики расчета комбинированной системы усиления состоящей из ленточных свайных фундаментов и элементов усиления, с предварительной опрессовкой и цементацией грунта;
- в выявлении закономерностей взаимодействия рассматриваемой системы в виде комбинированных фундаментов с грунтовым основанием при использовании различных конструктивных и технологических приемов усиления;
- в экономической эффективности комбинированной системы усиления в условиях дефицита несущей способности свай и повышения нагрузок на основание ленточных свайных фундаментов.

Результаты исследований использованы:

- в проектных решениях «Проведение противоаварийных работ и стабилизация геометрического положения многоквартирного панельного 9-этажного жилого дома в г. Тюмени»;
- в ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» при выполнении выпускных квалификационных работ по направлению подготовки «Строительство».

Методология и методы исследования:

- анализ инженерного геотехнического и научно-исследовательского опыта в области усиления свайных фундаментов;
- реализация методов планирования экспериментов и методов численного моделирования НДС оснований при переустройстве ЛСФ в комбинированный с опрессовкой и цементацией грунтового массива;
- выполнение лабораторных и натурных экспериментальных исследований с применением современных комплексов автоматизированного сбора данных;

– применение метода наблюдений и сопоставление фактических данных взаимодействия системы усиления ленточных свайных фундаментов с основанием в натуральных условиях на объекте 9-этажного панельного жилого дома в г. Тюмени, полученных при выполнении геотехнического мониторинга, с расчетными величинами.

Положения, выносимые на защиту:

– система усиления ленточных свайных фундаментов, создаваемая путем переустройства их в комбинированный с опрессовкой и цементацией основания;

– результаты экспериментальных исследований взаимодействия системы усиления с грунтовым основанием на маломасштабных моделях в лабораторных условиях;

– методика расчета осадки системы усиления свайных фундаментов с учетом опрессовки пролетной части основания и улучшения строительных свойств грунтов основания цементацией;

– результаты численного моделирования и закономерности взаимодействия рассматриваемой системы усиления с основанием;

– результаты исследований взаимодействия геотехнической системы «основание - фундамент» при переустройстве ленточных свайных фундаментов в комбинированный с учетом опрессовки пролетной части основания и улучшения строительных свойств грунта цементацией в натуральных условиях на реальном строительном объекте.

Достоверность защищаемых положений и апробация результатов.

Достоверность защищаемых положений обеспечивается использованием теоретических положений и принципов механики грунтов, а также современной геотехники и подтверждается достаточным объемом модельных лабораторных и натуральных исследований, проведенных с использованием современных поверенных контрольно-измерительных приборов и оборудования и применением верифицированных программных продуктов для выполнения численного анализа.

Апробация работы. Результаты работы были доложены и обсуждены на конференциях различного уровня: «Фундаменты глубокого заложения и геотехнические проблемы территорий» (г. Пермь, 2017); «Новые технологии -

нефтегазовому региону» (г. Тюмень, 2018); «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (г. Тюмень, 2018); «Новые технологии-нефтегазовому региону» (г. Тюмень, 2019); «V геотехнические игры» (г. Москва, 2019).

Личный вклад автора состоит:

- в подготовке моделей, грунтовых лотков, тарировке и апробации первичных преобразователей, подготовке цифровой контрольно-измерительной аппаратуры к экспериментальным исследованиям;
- в выполнении экспериментов по исследованию работы моделей фундаментов, включая рассматриваемую в работе систему усиления с опрессованным основанием в пролетной части с грунтовым основанием, в лабораторных условиях;
- в предложении инженерной методики расчета осадки системы усиления, полученной путем переустройства ленточных свайных фундаментов в сплошной комбинированный;
- в выполнении численного моделирования работы свайных фундаментов, усиленных путем переустройства их в комбинированный с опрессовкой цементацией основания;
- в проведении натурных исследований на реальном объекте, получении результатов, их анализе и обобщении.

Публикации. Результаты исследований представлены в шести научных статьях, две из которых опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, одна в журнале, индексируемом в базе Web of Science.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 127 страниц машинописного текста, 90 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 115 источников.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Согласно полученным научным результатам, диссертация соответствует п. 7, 10, 11 паспорта специальности **05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения.**

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведена общая характеристика работы, сформулированы задачи исследования.

Первая глава посвящена вопросу усиления ленточных свайных фундаментов в условиях слабых водонасыщенных пылевато–глинистых грунтов; проанализированы основные случаи возникновения необходимости упрочнения грунтов основании фундаментов и их усиления; дана классификация и определена область применения основных методов усиления свайных фундаментов, упрочнения грунтов оснований; рассмотрены возможности использования оболочек в качестве усиления ленточных свайных фундаментов. Преимущества комбинированных фундаментов определяют их широкое применение по всему миру. В РФ научные исследования по данному направлению представлены в работах: В.Ф. Александровича, А.А. Бартоломея, Б.В. Бахолдина, В.А. Барвашова, С.Г. Безволева, Г.Г. Болдырева, В.А. Васенина, И.В. Глушкова, А.Л. Готмана, Н. З. Готман, Г.Н. Гусева, П.А. Малинина, М.В. Дунаевой, М.М. Дубины, С.В. Курилло, Д.С. Конюхова, В.В. Лушникова, И.Т. Мирсаяпова, Р.А. Мангушева, В.П. Петрухина, Е.А. Сорочана, М.А. Степанова, З.Г. Тер-Мартirosяна, В.Г. Федоровского, А.Б. Фадеева, А.И. Харичкина, К.Г. Шашкина, О.А. Шулятьева, В.М. Улицкого.

В условиях реконструкции одним из эффективных способов усиления свайных фундаментов при перегрузке свай существующим сооружением или надстраиваемой частью может быть их переустройство в комбинированные с опрессовкой основания и цементацией грунта. Вопросами усиления ленточных фундаментов их переустройством с нагнетанием раствора в пролетную часть основания занимались Мангушев Р.А., Мустакимов В.Р., Наумкина Ю.В., Пронозин Я.А., Полищук А.И., Скибин Г.М., Субботин В.А., Улицкий В.М., Шашкин А.Г. и др.

Эффективность предлагаемого способа усиления обусловлена уплотнением грунтового основания активной зоны и улучшением его строительных свойств, обжатием грунта давлением раствора и его последующим твердением, что приводит к увеличению несущей способности свай и их разгрузке за счет передачи части нагрузки на пролетную часть без реализации дополнительных осадок.

Исследуемая система усиления фундамента представлена (рисунок 1) существующим ростверком 1 и сваями 2, а также изготавливаемыми по спланированному слою щебеня 3 и песка 4 железобетонными оболочками 5. Профилированная мембрана уложена по слою песка 6. Оболочки соединены с ростверками анкерами 7. Закачивание раствора под давлением происходит через пакеры 8 в подоболочечное пространство и через инъекторы 9 в грунтовый массив с образованием гидроразрывов 10.

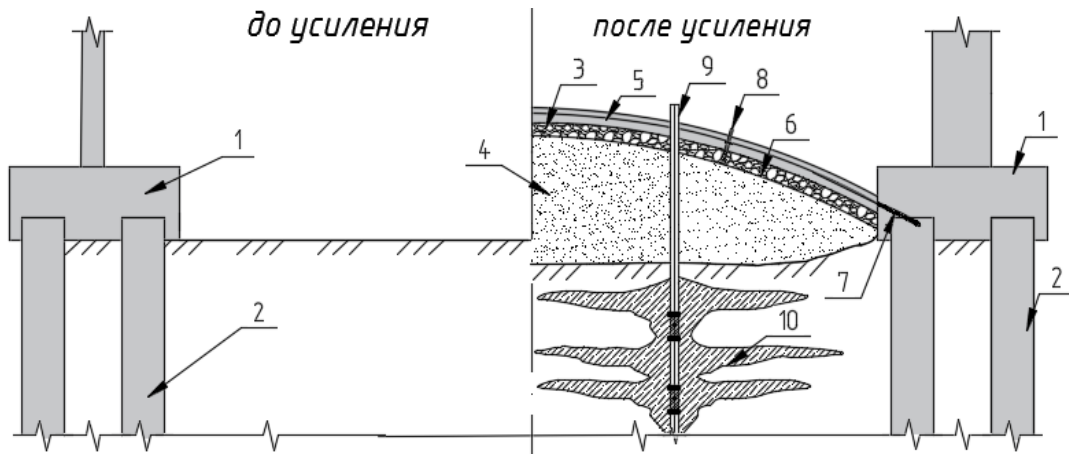


Рисунок 1. Схема усиления ленточных свайных фундаментов

Во второй главе представлены результаты лабораторных экспериментов на маломасштабных моделях. Определены зоны и особенности деформирования основания моделей одиночных свай, плитных фундаментов, свайно-плитного фундамента и свайно-плитного фундамента с опрессовкой основания в пролетной части.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде (рисунок 2), на однородном мягкопластичном суглинке с заданными характеристиками: $\rho_s = 2,72 \text{ г/см}^3$; $\rho = 1,9 \text{ г/см}^3$; $\rho_d = 1,61 \text{ г/см}^3$; $e = 0,7$; $S_r = 0,88$; $I_p = 8,7\%$; $I_L = 0,60$; $\varphi = 15^\circ$; $c = 24,9 \text{ кПа}$; $E = 6 \text{ МПа}$. В качестве моделей фундаментов испытывались: одиночная свая, плитный фундамент, свайно-плитный фундамент и свайно-плитный фундамент с опрессовкой. Каждая серия опытов проводилась не менее трех раз. По результатам экспериментальных исследований построены зависимости «нагрузка-осадка» (рисунок 2).

Установлено, что в процессе нагружения до $N = 5 \text{ кН}$ ($p_{cp} = 55 \text{ кПа}$) деформации основания моделей СПФ и СПФ с опрессовкой одинаковы. Согласно плану

эксперимента величина давления опрессовки, выполняемой путем нагнетания воздуха в герметичную камеру, после 5-й ступени нагружения составляла $p_{опр}=45$ кПа.

При воздействии давления $p_{опр}$ наблюдалось доуплотнение грунта в основании СПФ, при этом увеличение деформаций модели фундамента не зафиксировано. При дальнейшем нагружении деформации основания модели СПФ с опрессовкой значительно уменьшились по сравнению с моделью СПФ без опрессовки (рисунок 2). Конечная осадка при полной нагрузке, равной $N=10$ кН

($p_{ср}=111$ кПа), для модели плитный фундамент составила 29,5мм, для модели СПФ – 23,3мм, для модели СПФ с опрессовкой – 14,7мм. Таким образом, конечная осадка модели СПФ с опрессовкой оказалась в 1,37 раза меньше деформаций модели СПФ.

По результатам обработки данных получены изолинии деформаций в основании моделей. Для модели СПФ при действии нагрузки $N=10$ кН ($p_{ср}=111$ кПа) (рисунок 3) зафиксированы максимальные значения его вертикальных деформаций $w(z) = 23,3$ мм, развивающиеся под ростверком, глубина распространения осадок составила до $1,7B$ (B – ширина фундамента).

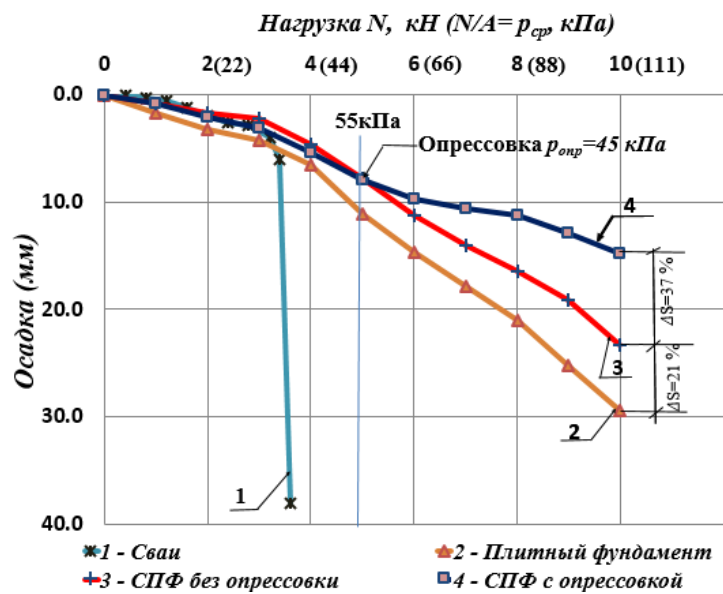


Рисунок 2. Зависимости осадки моделей фундамента от величины вертикального давления для исследуемых фундаментов

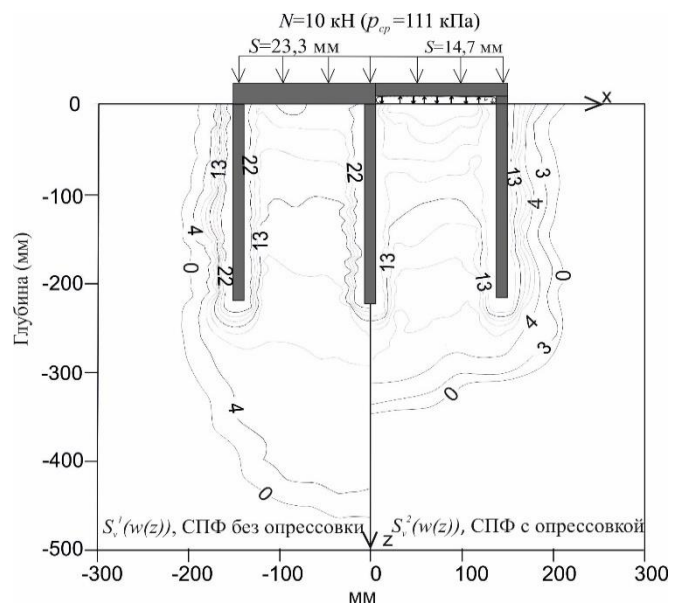


Рисунок 3. Изолинии перемещений $w(z)$, при $N=10$ кН ($p_{ср}=111$ кПа): слева - без опрессовки, справа – с опрессовкой

Для модели СПФ с опрессовкой основания при действии этой же нагрузки (рисунок 3) максимальные вертикальные деформации составили $w(z) = 14,7\text{мм}$. Глубина распространения осадок составила до $1,3B$. На основании графического анализа установлено, что площадь деформаций величиной более 4мм для модели СПФ ($S_v^1(w(z))$) в 1,3 раза превышает площадь деформаций в основании для модели СПФ с опрессовкой.

Таким образом, экспериментально доказано преимущество системы усиления с предварительной опрессовкой грунтового основания, позволяющего улучшить строительные свойства основания, включить основание под пролетной частью в работу и тем самым снизить его деформируемость при дальнейшем нагружении.

В третьей главе представлены результаты аналитических расчетов и численного моделирования взаимодействия системы усиления ЛСФ при их переустройстве в комбинированные.

Моделируемыми этапами усиления являются: 1 – переустройство существующих фундаментов; 2 – усиление грунтового основания. В качестве моделируемого грунта принят суглинок мягкопластичный: $E = 5 \text{ МПа}$; $\gamma = 19,5 \text{ кН/м}^2$; $e = 0,95$; $I_L = 0,7$. Расчет выполнялся в плоской постановке для трех ленточных однорядных свайных фундаментов шагом 6м и длиной свай 7 м.

Установлено, что при давлении опрессовки $p_{опр}=100 \text{ кПа}$ для мягкопластичного суглинка максимальное увеличение модуля деформации ΔE достигает 42%. Изменение E от коэффициента пористости за счет нагнетания раствора представлено на рисунке 4.

Для мягкопластичного суглинка при коэффициенте пористости $e = 0,8 \div 0,95$ наблюдается повышение средневзвешенного по глубине сжимаемой толщи модуля деформации на величину до 35%, для полутвердого суглинка – на величину до 15% (рисунок 4).

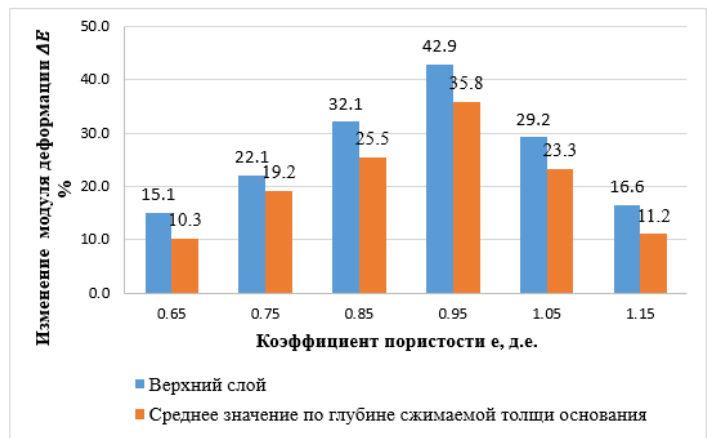


Рисунок 4. График зависимости изменения E от e при давлении опрессовки $p_{опр}=100 \text{ кПа}$

В процессе опрессовки в пролетной части фундамента создается дополнительное боковое давление на сваи $p_{доп}$, что в соответствии с законом Кулона увеличивает несущую способность свай. В рамках указанных выше исходных данных установлено, что суммарная несущая способность свай с учетом величины $p_{доп}$ увеличилась на 17,5%. С увеличением глубины значение дополнительного горизонтального обжатия снижается на 65% (рисунок 5).

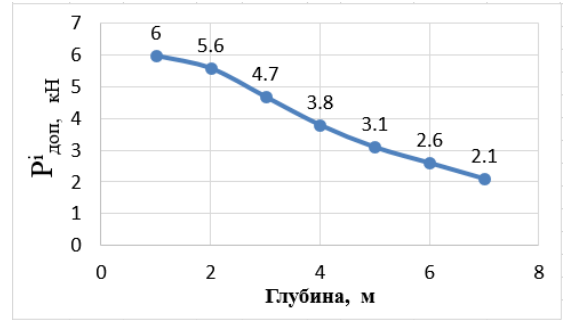


Рисунок 5. Распределение дополнительной несущей способности сваи в зависимости от глубины

Для определения изменения значения модуля деформации после выполнения цементации основания была принята методика Ланиса А.Л:

$$E_{1,2} = (E_c + E_a) / 2 \quad (1)$$

где E_a – модуль деформации грунта за счет армирования инъекцией; E_c – модуль деформации грунта при уплотнении инъекцией.

Для определения дополнительной несущей способности сваи за счет обжатия при цементации грунтового основания выполнено моделирование в соответствии с расчетной схемой (рисунок 6), учитывающее шаг гидроразрывов и их толщину с определением дополнительного бокового давления и повышения несущей способности сваи в i -ом слоя по формуле:

$$P_{доп}^i = (\sum \sigma_{бок}^i \cdot \operatorname{tg} \varphi * u * h_i) \quad (2)$$

Несущая способность сваи определяется с учетом её дополнительного обжатия грунтом:

$$F'_d = F_d + \sum_{i=1}^n P_{доп} \quad (3)$$

Установлено, что в упругой постановке задачи, при указанных выше исходных данных, увеличение несущей способности свай составило в среднем 35%. При этом в соответствии с исследованиями, выполненными З.Г. Тер–Мартиросяном, А.Н.

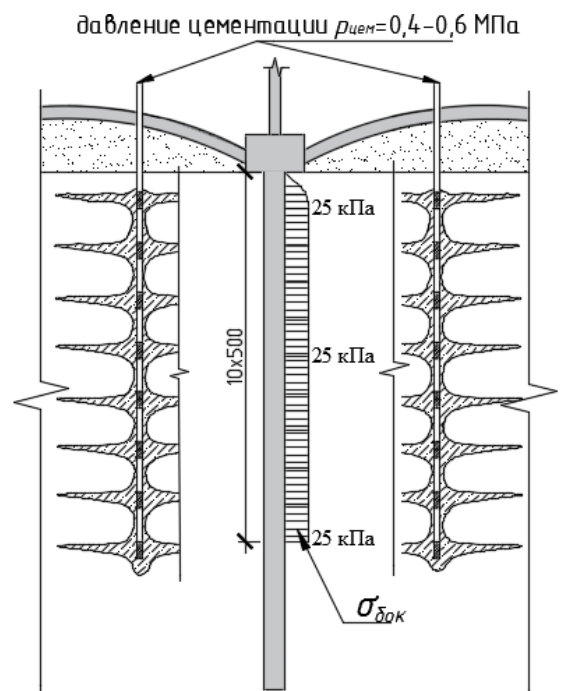


Рисунок 6. Эпюра распределения напряжений $\sigma_{бок}$

Труфановым, установлено, что величина остаточных напряжений для данных грунтов составляет 20-30% от первоначальных.

Таким образом, обобщая выполненное расчетное моделирование с учетом сохранения остаточных напряжений, установлено, что применение предлагаемого метода переустройства ленточных свайных фундаментов в комбинированные при значительном увеличении средневзвешенного модуля деформации за счет опрессовки и цементации грунтового основания может увеличить несущую способность свай до 15–20%.

Численное исследование взаимодействия геотехнической системы усиления ЛСФ при их переустройстве в комбинированные с учетом изменения физико-механических характеристик грунтов и несущей способности свай было выполнено в расчетном комплексе Plaxis 2D. Использована упругая идеально-пластическая модель Мора-Кулона. Задача плоская, схема ЛСФ – пятипролетная. В рамках моделирования рассмотрены четыре расчётных случая: 1 – ЛСФ без усиления; 2 – ЛСФ переустроен в комбинированный с опрессовкой основания; 3 – ЛСФ переустроен в комбинированный с цементацией основания; 4 – ЛСФ переустроен в комбинированный с опрессовкой и цементацией основания (рисунок 7).

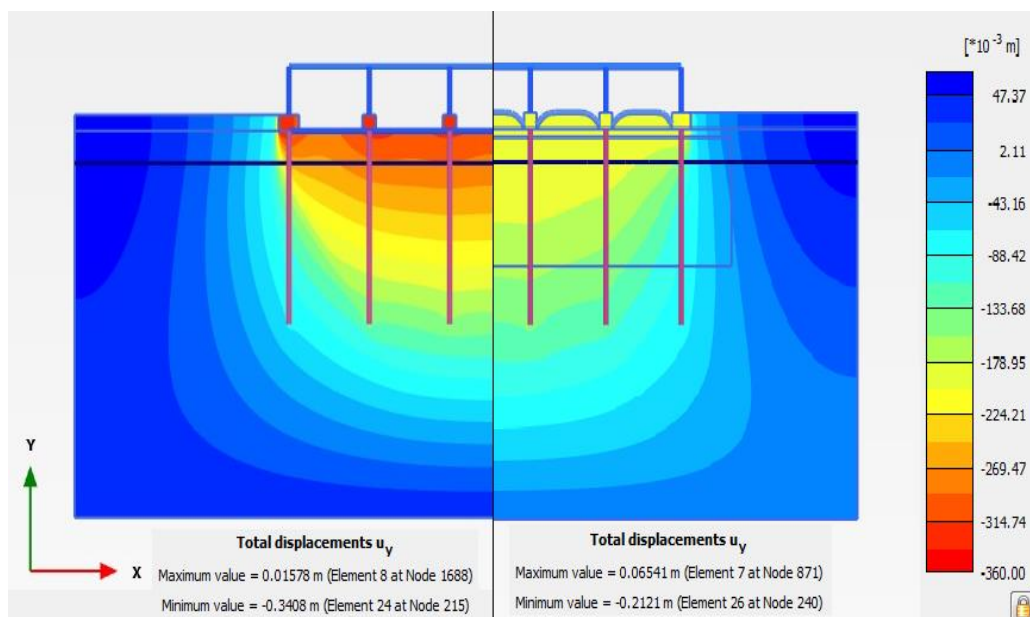


Рисунок 7. Изолинии перемещений основания:
слева - расчетный случай 1; справа - расчетный случай 4

Таким образом, численным моделированием установлено, что в процессе эксплуатации конечная осадка фундамента при отсутствии мероприятий по усилению может достигать 341мм, при переустройстве фундамента в комбинированный и

опрессовке грунтового основания – 264,3 мм, при цементации грунтового массива по манжетной технологии с образованием гидроразрывов – 230,4 мм, при переустройстве ЛСФ в комбинированный и совместном применении опрессовки и цементации основания – 212,1 мм (рисунок 8).

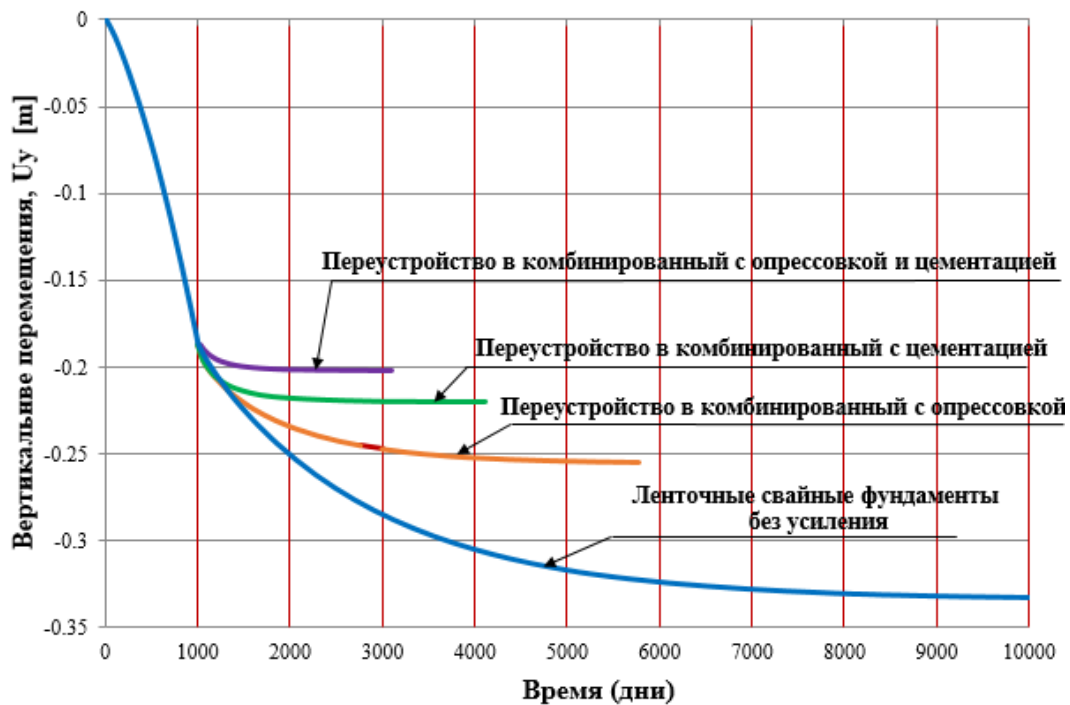


Рисунок 8. График зависимости осадки во времени в процессе эксплуатации: расчетный случай 1, расчетный случай 2, расчетный случай 3, расчетный случай 4

Приведенный пример расчетного моделирования показывает, что в условиях, приближенных к реальной ситуации, например, при реализации части полных осадок и их нарастании во времени, переустройство ленточного свайного фундамента в комбинированный (КЛСФ) с использованием резервов грунтового основания свайных фундаментов за счет опрессовки и цементации грунтов, позволяет значительно, до 7 и более раз снизить величину нереализованной осадки и тем самым в определенных условиях может обеспечить полные осадки в пределах допустимых значений и сохранить эксплуатационную надежность надземной конструкции.

В рамках разработки инженерной методики прогноза осадки предложенной геотехнической системы усиления модифицирована методика, предложенная М. А. Степановым. Рассмотрены два характерных для практики случая: недостаточная несущая способность свай в режиме эксплуатации (рисунок 9); увеличение нагрузки на ленточные свайные фундаменты, например при надстройке этажей.

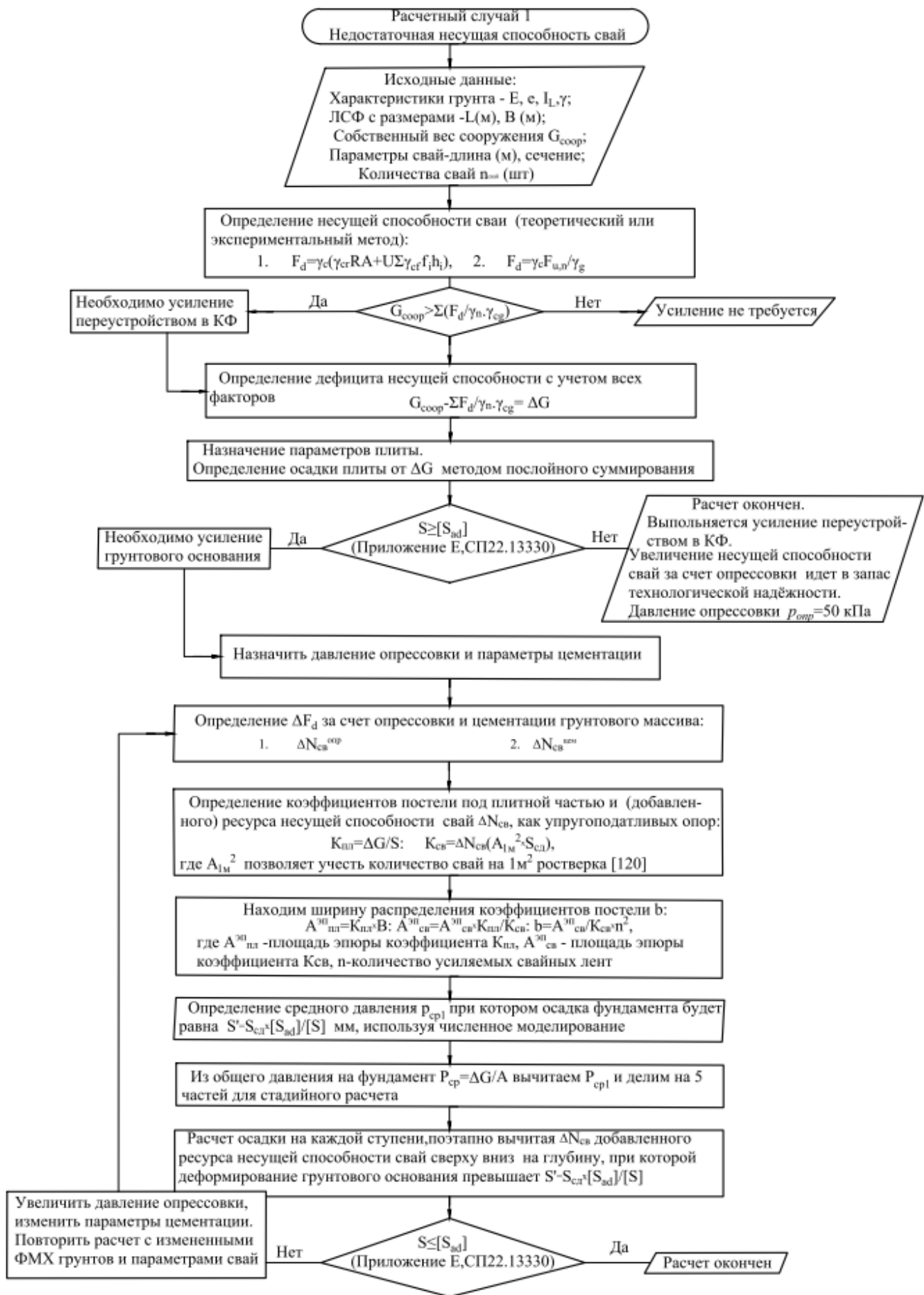


Рисунок 9. Блок - схема прогноза осадки усиливаемого ЛСФ для расчетного случая 1

В четвертой главе изложены последовательность и анализ взаимодействия свайных фундаментов, получивших сверхнормативные неравномерные осадки, усиленных путем переустройства их в комбинированные с опрессовкой основания и цементацией грунта на реальном объекте. Объектом усиления являлись ленточные свайные фундаменты панельного двух подъездного 9-этажного жилого дома в г. Тюмени с размерами в плане 13,2 – 45,0 м, разница осадок по диагонали здания на момент начала работ составляла 550 мм (рисунок 10). Фундаменты - ленточные свайные (длина забивных свай – 12 м) одно и двухрядные. Грунтовое основание состоит из четырёх слоев: песок мелкий, средней плотности (техногенный) $E=15$ МПа; суглинок текучий $E=5$ МПа; глина текучепластичная $E=12$ МПа; песок мелкий, рыхлый, насыщенный водой $E=19$ МПа. Элементы усиления в виде оболочек с предварительной опрессовкой грунтового основания и его цементацией по манжетной технологии.

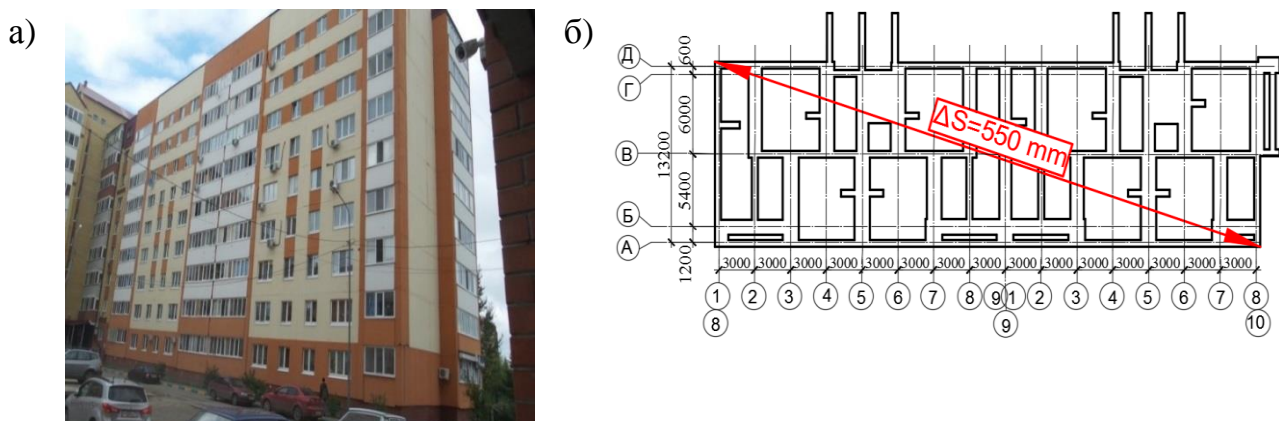


Рисунок 10. Объект исследования 9-этажный жилой дом в г. Тюмень: а - общий вид, б – план фундамента

Усиление выполнялось в следующей последовательности: I – переустройство ЛСФ в комбинированные; II – опрессовка основания давлением 110 кПа; III – цементация основания на глубину 7 м.

Изменение НДС геотехнической системы регистрировалось: глубинными и контактными мессдозами (рисунок 11, 12), марками (рисунок 11, 13), осадки фундаментов регистрировались высокоточным геодезическим наблюдением.

Установлено, что вертикальные деформации основания в пролетной части фундамента при опрессовке ($p_{опр} = 110$ кПа) достигают 10,2 мм, что свидетельствует о включении пролетной части усиления в работу (рисунок 11). Активная зона деформирования основания распространяется на глубину до 1,1 В, где В – ширина пролета.

При цементации зафиксировано появление дополнительных вертикальных нормальных напряжений в грунтовом основании величиной до 160 кПа (рисунок 12).

При нагнетании растворной смеси в грунтовый массив с образованием гидроразрывов зафиксированы максимальные значения напряжений в контактной зоне от 40 до 140 кПа с падением в течение 30 дней в среднем до 40 кПа (рисунок 13). Таким образом, после завершения работ были получены значения изменения контактных давлений, связанных с релаксацией напряжений в основании.

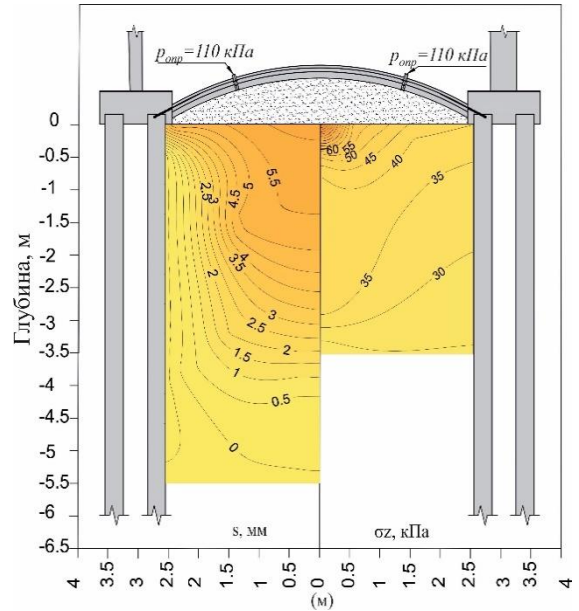


Рисунок 11. Результаты изменения НДС основания исследуемого объекта на участке экспериментальной оболочки №7 (II этап, $p_{опр} = 110$ кПа): вертикальные перемещения s [мм] (слева) и вертикальные нормальные напряжения σ_z [кПа] (справа)

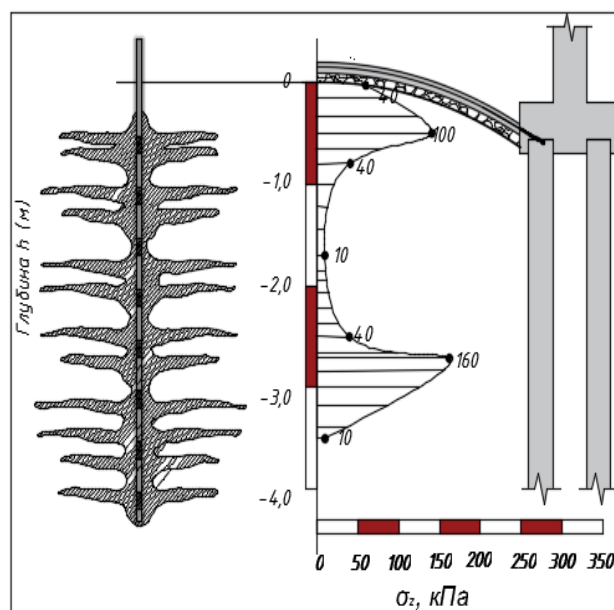


Рисунок 12. Эпюра σ_z [кПа] в грунтовом массиве по центральной оси на III этапе

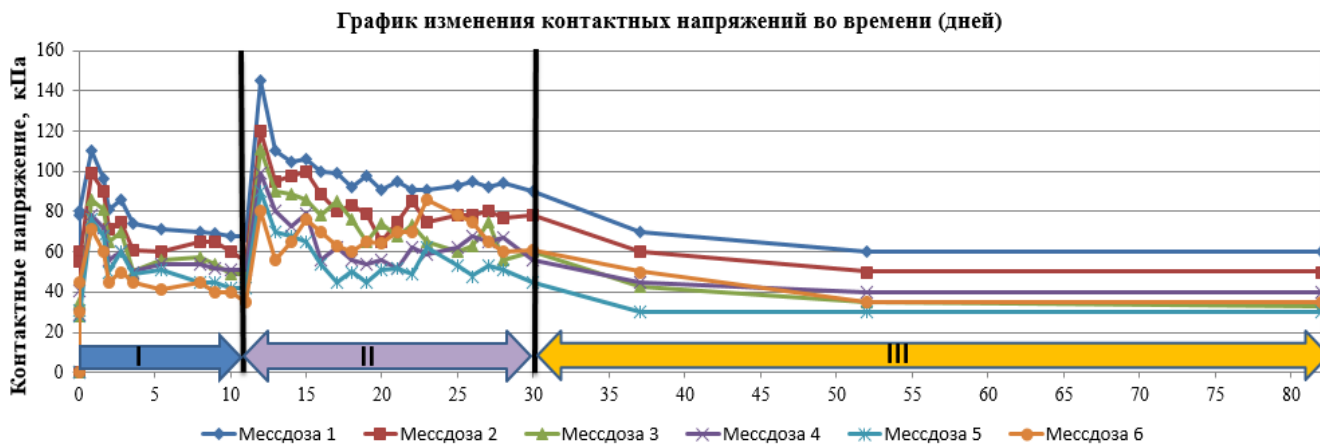


Рисунок 13. График изменения контактных напряжений: I - опрессовка основания; II - цементация основания; III - релаксация напряжений после завершения работ

В итоге установлено, что выполненные работы по усилению, согласно показаниям контактных месдоз, позволили разгрузить свайные ленты до 31% с учетом релаксации напряжений во времени (рисунок 14).

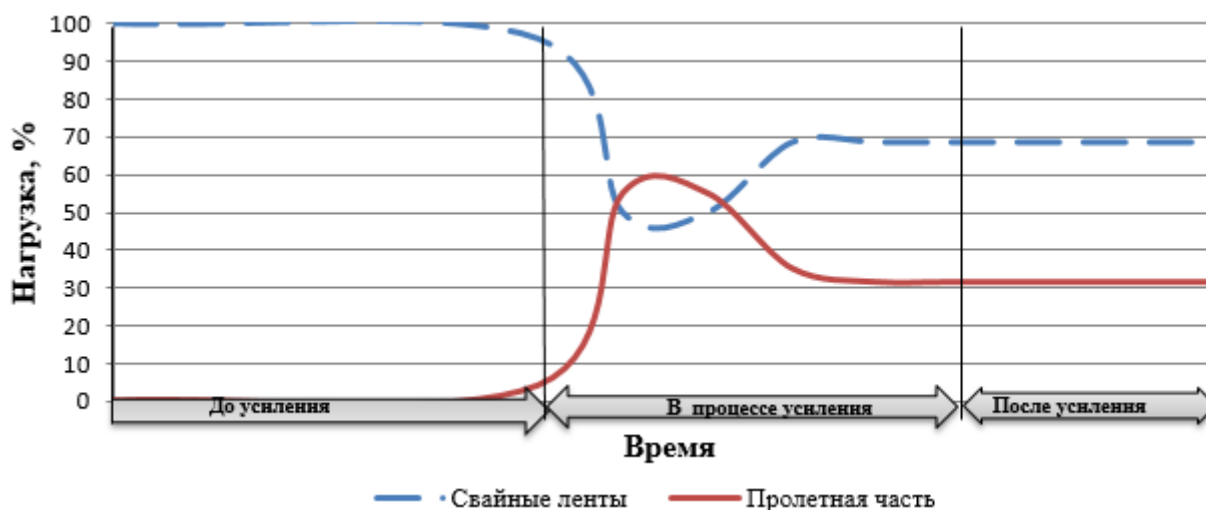


Рисунок 14. Схема перераспределения общей нагрузки между сваями и ростверком

Для сопоставления экспериментальных данных с результатами численного моделирования, были выполнены расчеты в ПК Plaxis 2D с использованием упруго - пластической модели с критерием прочности Мора-Кулона были рассмотрены расчётные случаи, аналогичные представленным в третьей главе работы (рисунок 15).

Численным моделированием установлено, что в процессе эксплуатации конечная осадка фундамента при отсутствии мероприятий по усилению составляет 460,2 мм (фактическая – до 550 мм).

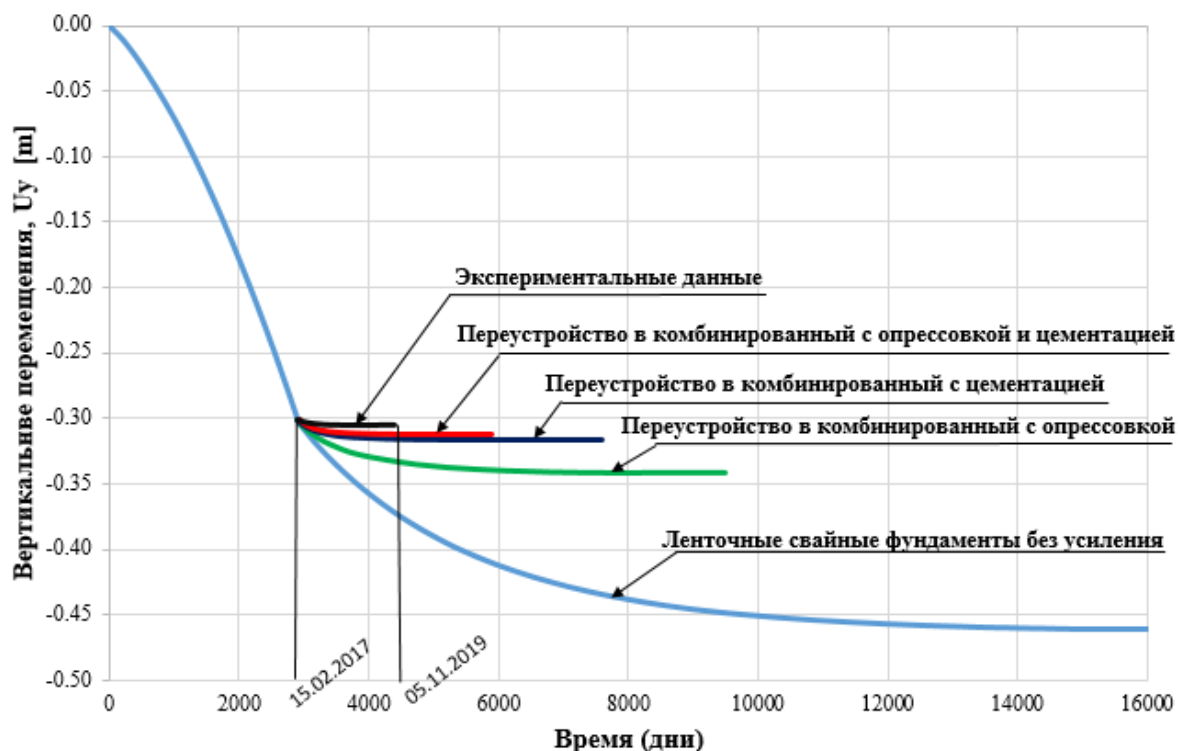


Рисунок 15. Графики теоретических и экспериментальных осадок

В момент накопления осадки, равной 300 мм, при переустройстве фундамента в комбинированный и опрессовке грунтового основания – 341,7 мм, при цементации грунтового массива по манжетной технологии с образованием гидроразрывов – 318,1 мм, при совместном применении переустройства фундамента с опрессовкой и цементацией основания – 311,8 мм.

После усиления фундамента по результатам геотехнического мониторинга, дополнительная осадка здания за неполных два года эксплуатации составила – 10,2 мм, что сопоставимо с результатами численного моделирования по 4 расчетному случаю – 11,8мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В представленном исследовании разработан способ усиления ленточных свайных фундаментов, основанный на идее максимального использования ресурсов несущей способности активной зоны грунтового основания. Так, при усилении используется суммарный эффект от: улучшения свойств грунтов опрессовкой, повышения несущей способности свай за счет опрессовки, уменьшения сжимаемости грунта и повышения несущей способности свай за счет цементации, что позволяет

значительную часть общего веса здания передать на ранее ненагруженное основание при одновременном увеличении несущей способности свай.

2. Выполненные на маломасштабных моделях экспериментальные исследования показали, что опрессовка грунтового основания в пролетной части свайно-плитного фундамента в размере 40% от общей конечной нагрузки позволила уменьшить осадку фундамента на 37%. После опрессовки приращение осадки уменьшилось в два раза по отношению к осадке аналогичного фундамента без опрессовки грунтового основания. Применение опрессовки позволило снизить глубину сжимаемой толщи на 23%.

3. В рамках разработки методики расчета системы усиления установлено изменение модуля деформации грунта в зависимости от коэффициента пористости. Так, увеличение модуля деформации при e от 0,8 до 0,95 в рассматриваемом варианте составляет 35–42% в верхнем слое, увеличение средневзвешенного значения модуля деформации по глубине - 10-35%, удельного сцепления – 22–27 % и угла внутреннего трения – 17–23 %. Выявлено, что суммарное воздействие от опрессовки и цементации в упругой постановке задачи может приводить к увеличению несущей способности свай за счет дополнительного бокового обжатия на 45-55% в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов, в условиях релаксации и сохранения остаточных напряжений – на 15–20%.

4. Разработана методика аналитического расчета осадки комбинированных свайных фундаментов, полученных путем переустройства из ленточных свайных фундаментов с учетом особенностей данной геотехнической системы. Использование данной методики показало достаточную для инженерных расчетов точность в пределах 15–25% по отношению к результатам численного моделирования и экспериментальным данным.

5. Численным моделированием доказано, что при отсутствии мероприятий по усилению осадка ленточных фундаментов на слабых пылевато-глинистых основаниях может значительно превысить нормативные значения и привести к отказу несущих и ограждающих конструкций. Применение предложенного метода усиления ленточных свайных фундаментов за счет опрессовки и цементации грунтового основания позволяет значительно, до семи и более раз снизить величину

нереализованной осадки и тем самым может обеспечить полные осадки в пределах допустимых значений.

б. Выполненные натурные исследования напряженно-деформированного состояния основания аварийного здания в процессе его усиления доказали, что после выполнения работ в соответствии с предложенным способом усиления доля передаваемой нагрузки от здания на сваи составила 70% и соответственно оболочек в пролетных частях между ростверками – 30%, при минимальных дополнительных осадках в процессе усиления, не превышающих нескольких миллиметров и величиной конечной нереализованной осадки с прогнозируемым значением не более 20мм.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования: определение дополнительной несущей способности свай, в рассматриваемой системе усиления, во времени, в зависимости от реологических свойств грунтов и использование технологии цементации для направленного закрепления грунта в контактном слое стволов свай.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных

в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. **Давлатов, Д.Н.** Усиление свайных фундаментов путём переустройства их в комбинированный фундамент с опрессовкой и цементацией грунтового основания / Я.А. Пронозин, Р.В. Мельников, Н.Д. Корсун, **Д.Н. Давлатов** // Геотехника. – Москва, 2017. – №4. – С. 36–41;
2. **Давлатов, Д.Н.** Взаимодействие системы усиления свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием эксплуатируемого сооружения / Я.А. Пронозин, М.А. Степанов, А.Н. Шуваев, **Д.Н. Давлатов** // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – Пермь, 2018. – Том 9. – №3. – С. 42–53.

**Публикации в изданиях, проиндексированных в базе
Web of Science.**

3. **Davlatov, D. N.** Laboratory Investigation on Interaction of the Pile Foundation Strengthening System with the Rebuilt Solid Pile-Slab Foundation [Text] / Y. A. Pronozin, M. A. Stepanov, D. V. Rachkov, V. M. Chikishev, **D. N. Davlatov** // Civil Engineering Journal. – 2020. – Vol. 6. – No. 2. – P. 258–264.

В других изданиях:

4. **Давлатов, Д.Н.** Исследование поведения многоэтажного жилого дома на свайных фундаментах в условиях неравномерного напластования слабых грунтов и насыпи / Р.В. Мельников, Н.Д. Корсун, Н.Ю. Киселёв, **Д.Н. Давлатов** // Материалы всероссийской национальной конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и геотехнические проблемы территорий» – Пермь, 2017. – С. 458–468.

5. **Давлатов, Д.Н.** Обследование жилого дома в городе Тюмень / **Д.Н. Давлатов**, С. Марзбоншохи // Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии–нефтегазовому региону» – Тюмень, 2018. – Том IV. – С. 160–163.

6. **Давлатов, Д.Н.** Экспериментальные исследования взаимодействия системы усиления свайных фундаментов с переустройством в сплошной свайно-плитный в лабораторных условиях / Я.А. Пронозин, **Д.Н. Давлатов**, Ш. Обиджони// «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» – Тюмень, 2018. – Том I. – С. 133–137.

Подписано в печать 24.09.2020. Формат 60x90 1/16. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 1937.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.