

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ И.Т. ТРУБИЛИНА»

На правах рукописи

**Семёнов Иван Владимирович**

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ  
ПРИ ИХ УСИЛЕНИИ ИНЪЕКЦИОННЫМИ СВЯЯМИ ДЛЯ РЕКОН-  
СТРУИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
А.И. Полищук

Краснодар – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ О РАСЧЕТАХ И КОНСТРУКЦИИ ФУНДАМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ</b> .....	12
1.1. Основные сведения .....	12
1.2. Обзор конструктивных решений фундаментов при их усилении сваями для реконструируемых зданий .....	14
1.3. Обзор конструктивных решений свай, устраиваемых при помощи инъекции мелкозернистого бетона .....	16
1.4. Обзор экспериментальных исследований работы свай, устраиваемых инъекцией мелкозернистого бетона в глинистых грунтах .....	24
1.5. Обзор методов расчета усиления фундаментов сваями и их элементов для реконструируемых зданий .....	27
1.6. Задачи исследований .....	33
<b>2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ С ГЛИНИСТЫМ ГРУНТОМ ОСНОВАНИЯ</b> .....	35
2.1. Конструкции инъекционных свай и фундаментов, усиливаемых инъекционными сваями .....	35
2.2. Методика численных исследований (моделирования) работы инъекционных свай в составе фундаментов реконструируемого здания с использованием ПК Midas .....	37
2.2.1. Методика исследований (моделирования) работы одиночной инъекционной сваи .....	39
2.2.2. Методика исследований (моделирования) работы фундаментов мелкого заложения, усиливаемого инъекционными сваями .....	52
2.3. Результаты численного моделирования работы одиночной инъекционной сваи и отдельного усиливаемого фундамента в глинистом грунте при их нагружении .....	60
2.4. Сопоставление результатов численных исследований работы свай с экспериментальными данными .....	65
2.5. Выводы по разделу 2 .....	70
<b>3. ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ФУНДАМЕНТА ПРИ ЕГО УСИЛЕНИИ ИНЪЕКЦИОННЫМИ СВАЯМИ</b> .....	71
3.1. Основные положения о перераспределении нагрузки между элементами усиливаемого фундамента .....	71
3.2. Данные о перераспределении нагрузок в системе «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» .....	73

3.3. Разработка метода расчета доли нагрузки, передаваемой на грунт основания элементами усиливаемого фундамента инъекционными сваями .....	79
3.4. Выводы по разделу 3 .....	85
<b>4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ФУНДАМЕНТОВ С УЧЕТОМ ИХ УСИЛЕНИЯ ИНЪЕКЦИОННЫМИ СВАЯМИ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ ДЛЯ РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ .....</b>	<b>86</b>
4.1. Инженерный метод определения конечной осадки одиночной инъекционной сваи и его обоснование .....	86
4.2. Обоснование инженерного метода определения конечной осадки фундаментов мелкого заложения при их усилении инъекционными сваями в условиях реконструкции зданий .....	102
4.3. Рекомендации по проектированию усиления отдельных и ленточных фундаментов инъекционными сваями для реконструируемых зданий .....	114
4.4. Практическое использование результатов исследований .....	116
4.5. Направления дальнейшего развития полученных результатов ...	121
4.6. Выводы по разделу 4 .....	121
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>122</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>124</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> Инженерно-геологические условия площадок натуральных испытаний инъекционных свай .....	<b>139</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b> Результаты расчета доли внешней нагрузки, передаваемой конструктивными элементами усиливаемого фундамента на грунтовое основание, в ПК Midas GTS .....	<b>142</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В</b> Значения давлений в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления инъекционными сваями, рассчитанные в ПК Midas GTS при различной ширине плитной части фундамента .....	<b>144</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г</b> Параметры аппроксимации для определения давления $p_{yc}$ при заданной ширине подошвы отдельного фундамента ...	<b>146</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д</b> Справки о внедрении результатов исследований ...	<b>148</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследований.** При реконструкции зданий на фундаментах мелкого заложения довольно часто возникает необходимость их усиления. Одним из способов увеличения несущей способности фундаментов является изменение их схемы работы путем передачи части нагрузки от реконструируемого здания на инъекционные сваи. Образованный таким образом фундамент в здании *иногда называют комбинированным* (Петухов А. А., Филиппович А. А. и др., 2006–2014), который может быть отдельным (отдельно стоящим), ленточным или плитным. Под *инъекционными понимаются сваи*, которые формируются в предварительно подготовленных скважинах путем инъекции под давлением подвижной бетонной смеси с последующей опрессовкой системы «свая – грунт основания». При устройстве таких свай используются стальные перфорированные трубчатые инъекторы специальной конструкции, которые вдавливаются в грунт на заданную глубину. (Полищук А. И., Петухов А. А., Шалгинов Р. В. и др., 2006–2010). Если же скважина разбуривается с использованием шнекового или другого оборудования, то такие сваи называют *буроинъекционными* (например, конструкции «Titan» или «Атлант»). В диссертации отдельные результаты исследований относятся к оценке работы буроинъекционных свай, которые рассматривались как категория инъекционных. Это объясняется тем, что способ устройства ствола (тела) буроинъекционной сваи при прочих равных условиях аналогичен инъекционной свае.

К настоящему времени накоплен научно-практический опыт расчета, конструирования и устройства инъекционных свай для усиления фундаментов реконструируемых зданий. Выполнены исследования по оценке изменения свойств глинистых грунтов вокруг ствола инъекционных свай на этапе их устройства, предложены инженерные методы определения несущей способности одиночных инъекционных свай (в том числе конических), выявлены осо-

бенности перераспределения внешней нагрузки между элементами ленточного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями. Однако до настоящего времени вопросы прогнозирования осадок усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах исследованы пока недостаточно. Поэтому тема диссертационной работы является *актуальной*.

**Степень разработанности темы.** Вопросы усиления (проектирование и устройство) фундаментов мелкого заложения при помощи инъекционных свай для реконструируемых зданий исследовались как отечественными, так и зарубежными учеными: Бартоломей А. А., Бахолдин Б. В., Блащук Н. В., Богомолов А. Н., Готман А. Л., Гусев Г. Н., Далматов Б. И., Джантимиров Х. А., Знаменский В. В., Коновалов П. А., Конюшков В. В., Мангушев Р. А., Мирошниченко Р. В., Мирсаяпов И. Т., Невзоров А. Л., Нуждин Л. В., Нуждин М. Л., Оржеховский Ю. Р., Осокин А. И., Парамонов В. Н., Петухов А. А., Полищук А. И., Пономарев А. Б., Пронозин Я. А., Самохвалов М. А., Сальский И. С., Тарасов А. А., Тер-Мартirosян А. З., Улицкий В. М., Федоровский В. Г., Филиппович А. А., Цытович Н. А., Шалгинов Р. В., Шашкин А. Г., Шулятьев О. А. и др. Анализ опубликованных статей указанных выше специалистов для условий реконструкции и восстановления зданий показывает, что в настоящее время накоплен практический опыт конструирования и устройства инъекционных свай для усиления фундаментов реконструируемых зданий. Выполнены исследования по определению несущей способности одиночных инъекционных свай в глинистых грунтах. Выявлены особенности перераспределения нагрузки между элементами ленточного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями. Конструктивные решения и методы расчета осадок фундаментов, усиливаемых с применением инъекционных свай в глинистых грунтах, должного развития пока не получили.

**Цель работы** заключалась в обосновании методов прогнозирования осадок усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в условиях реконструкции зданий, обеспечивающих эффективное их применение в глинистых грунтах.

### **Задачи исследования:**

1. Разработать и обосновать методику расчета системы одиночной инъекционной сваи («инъекционная свая – глинистый грунт») и отдельного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями («фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт»).

2. Выполнить численное моделирование напряженно-деформированного состояния разработанных систем (одиночные инъекционные сваи и усиленные ими фундаменты мелкого заложения в разнотипных глинистых грунтах). Сопоставить результаты моделирования с данными натурных испытаний инъекционных свай.

3. Разработать метод к определению доли внешней нагрузки, перераспределяемой между элементами системы «подошва фундамента – инъекционные сваи».

4. Разработать методы расчета осадок одиночных инъекционных свай и осадок фундаментов мелкого заложения, усиливаемых инъекционными сваями в глинистых грунтах для условий реконструкции зданий.

5. Составить рекомендации по проектированию усиления фундаментов мелкого заложения (отдельных, ленточных) инъекционными сваями в глинистых грунтах и выполнить их практическую апробацию.

**Объект исследований.** Инъекционная, буроинъекционная свая и усиливаемый фундамент с использованием таких свай в глинистых грунтах для реконструируемых зданий.

**Предмет исследований.** Взаимодействие инъекционных, буроинъекционных свай и усиливаемого фундамента такими сваями с глинистым грунтом основания в условиях реконструкции зданий.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Установлено *влияние геометрических параметров* системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» на перераспределение внешней нагрузки между его конструктивными элементами. Выявлено, что для квадратных в плане отдельных фундаментов (например, размером 1х1 м, 2х2 м и др.) изменение длины устраиваемых инъекционных свай от 3 до 9 м приводит

к повышению доли внешних нагрузок, передаваемой на глинистый грунт основания сваями, с 23–52% до 59–82%.

2. Разработан **метод определения** значений доли внешней нагрузки, передаваемой на основные конструктивные элементы усиливаемого отдельного фундамента в глинистых грунтах. Метод основан на использовании эмпирического подхода, который позволяет вычислять давление по подошве отдельного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями, после реконструкции здания при известных величинах давления по подошве фундамента до реконструкции здания и геометрических параметров усиливаемого фундамента.

3. Предложен **инженерный метод расчета** конечных осадок одиночных инъекционных свай в глинистом грунте, который учитывает линейную и нелинейную зависимости перемещения (осадки) сваи от прикладываемой внешней нагрузки, а также особенности способа устройства инъекционных свай.

4. Обоснован **инженерный метод расчета** конечных осадок усиливаемых фундаментов мелкого заложения (отдельных, ленточных) с применением инъекционных свай в глинистом грунте, который учитывает влияние конструктивных параметров и физико-механических свойств основания в околосвайном пространстве на их работу в условиях эксплуатации реконструируемого здания.

**Практическая, теоретическая значимость работы и ее использование.** *Теоретическая значимость* работы заключается в обосновании методики расчета системы «инъекционные сваи – глинистый грунт» в составе усиливаемых фундаментов; в разработке инженерного метода расчета их осадок для реконструируемых зданий.

*Практическая значимость* работы заключается в разработке инженерных методов расчета осадок и рекомендаций по проектированию усиления фундаментов инъекционными, буроинъекционными сваями в глинистых грунтах, которые использованы:

– при подготовке документации «Обследование зданий при разработке проектно-сметной документации на реконструкцию объектов биофабрики

федерального казенного предприятия «Армавирская биологическая фабрика». Здание клиники №5» (авторы: Семёнов И. В. и др.; г. Краснодар, ООО «БауПроект», 2023);

– при подготовке монографии «Усиление фундаментов инъекционными сваями при реконструкции зданий» (Семёнов И. В. и др.; М., Издательство АСВ, 2023, 212 с.) для специалистов проектных и строительных организаций;

– при подготовке научно-практического пособия «Фундаменты мелкого заложения для многоэтажных зданий» (Семёнов И. В. и др.; М., Издательство АСВ, 2019. – 214 с.) и использования его материалов предприятием ООО «БауПроект» в 2019–2024 гг.;

– в учебном процессе кафедры оснований и фундаментов Кубанского ГАУ (подготовка ВКР студентами-магистрантами по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство»; чтение лекций по дисциплине «Проектирование оснований и фундаментов реконструируемых зданий» и «Основания и фундаменты сооружений»);

– при подаче заявок на получение грантов в конкурсах научных проектов различных уровней, в том числе губернаторский конкурс молодежных инновационных проектов «Премия IQ года» (2019, лауреат – Семёнов И. В., 2-е место).

**Методология и методы исследований.** Теоретические методы исследований заключались в выполнении численного моделирования работы инъекционных свай и фундаментов, усиливаемых инъекционными сваями, в глинистых грунтах различной разновидности. Разрабатывались инженерный метод расчета осадок одиночных инъекционных свай и метод прогнозирования осадок фундаментов, усиливаемых инъекционными сваями, в глинистых грунтах для реконструируемых зданий. В рамках экспериментальных методов исследований анализировались результаты испытаний натуральных одиночных инъекционных свай в глинистых грунтах, а также данные о мониторинге осадок усиливаемых фундаментов буроинъекционными сваями. Результаты теоретических исследований сопоставлялись с экспериментальными данными.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика и результаты компьютерного моделирования работы инъекционных одиночных свай и отдельных усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах.

2. Инженерный метод расчета конечных осадок одиночных инъекционных свай в глинистых грунтах.

3. Инженерный метод расчета конечных осадок усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах для реконструируемых зданий.

4. Рекомендации по проектированию усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах для реконструируемых зданий.

**Область исследования.** В соответствии с темой диссертации, сформулированной целью, научной новизной и установленной теоретической, практической значимостью рассматриваемая работа соответствует паспорту научной специальности 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения, п. 7: «Разработка новых методов расчета, конструирования и устройства оснований, фундаментов и подземных сооружений при реконструкции, усилении и ликвидации аварийных ситуаций».

**Степень достоверности** результатов исследований подтверждена использованием современных представлений о механике грунтов и численном моделировании. В работе использованы сертифицированные и верифицированные программные продукты, реализующие метод конечных элементов (МКЭ), а также известные методы математической обработки полученных результатов. Результаты теоретических исследований сопоставлялись с экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации доложены и обсуждены на 11 российских и международных конференциях различного уровня, проводившихся в городах: Воронеж (2019); Кисловодск (2019); Краснодар (2015–2025); Новочеркасск (2018, 2022); Пермь (2024); Тюмень (2018).

**Личный вклад автора** заключается в следующем:

1. Сформулированы задачи диссертационной работы на основе поиска и

обобщения литературных источников, связанных с существующими методами проектирования усиления фундаментов эксплуатируемых зданий и сооружений с использованием свай.

2. Обоснована методика расчета системы «инъекционные сваи – глинистый грунт» в составе усиливаемых фундаментов путем выполнения численных расчетов и обработки полученных результатов.

3. Разработан инженерный метод расчета конечных осадок одиночных инъекционных свай в глинистых грунтах.

4. Разработан инженерный метод расчета конечных осадок усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в глинистом грунте для реконструируемых зданий.

5. Разработаны рекомендации по проектированию усиления фундаментов с использованием инъекционных свай в глинистых грунтах для условий реконструкции зданий.

6. Подготовлены и опубликованы статьи и заявки на изобретения, а также осуществлен авторский надзор при внедрении результатов диссертационных исследований на практике.

7. Разработаны направления дальнейшего развития по расчету и конструированию фундаментов, усиливаемых инъекционными, буроинъекционными сваями (отдельных и ленточных) для реконструируемых зданий.

**Публикации.** Основные материалы диссертационных исследований опубликованы в 2 монографиях, 1 справочнике геотехника, 1 научно-практическом пособии, 24 научных статьях и 4 патентах РФ на изобретения. Из числа опубликованных статей 5 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 – в источниках, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 103 наименований и 5 приложений. Общий объем работы составляет 149 страниц, включая 69 рисунков и 20 таблиц.

Автор выражает благодарность научному руководителю – Заслуженному строителю РФ, доктору технических наук, профессору Полищуку А. И. – за методологические рекомендации, конструктивные замечания и постоянное внимание к работе. Соискатель признателен сотрудникам кафедры оснований и фундаментов Кубанского ГАУ за консультационную поддержку и участие в обсуждении результатов на протяжении выполнения исследований.

# **1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ О РАСЧЕТАХ И КОНСТРУКЦИИ ФУНДАМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ**

## **1.1. Основные сведения**

Реконструкция зданий практически всегда связана с повышением нагрузок на основания и фундаменты. При этом увеличиваются как постоянные, так и временные нагрузки за счет замены устаревшего технологического оборудования и увеличения плотности его размещения, установки мостовых и подвесных кранов большей грузоподъемности, замены и усиления отдельных строительных конструкций и т. п. Накопленный опыт реконструкции зданий показывает, что при увеличении нагрузок на строительные конструкции усиление фундаментов (упрочнение оснований) рекомендуется выполнять в том случае, когда отсутствует резерв несущей способности грунтов оснований

При строительстве зданий, сооружений промышленного и гражданского назначения довольно часто используются фундаменты мелкого заложения, которые устраиваются, обычно, в открытых котлованах и траншеях [32, 53]. Особенности таких фундаментов являются небольшая глубина заложения и передача внешних нагрузок на грунт через подошву фундамента. В настоящей работе рассматриваются отдельные фундаменты под колонны реконструируемых гражданских или промышленных зданий. Такие фундаменты выполняют из монолитного железобетона либо сборными (рис. 1.1).

Отдельные фундаменты являются одной из разновидностей фундаментов мелкого заложения, которые передают нагрузку на грунты основания преимущественно через подошву. Исходными данными для определения размеров подошвы фундаментов являются результаты инженерно-геологических изысканий и данные по нагрузкам, приходящимся на обрез фундаментов от проектируемого здания. В ходе эксплуатации здания нагрузки на фундаменты могут быть увеличены (например, при надстройке или устройстве дополнительного технологического оборудования в рамках реконструкции здания). В этом случае размеров подошвы отдельного фундамента становится недостаточно. Для

обеспечения несущей способности фундаментов реконструируемого здания прибегают к различным мероприятиям по их усилению [11].

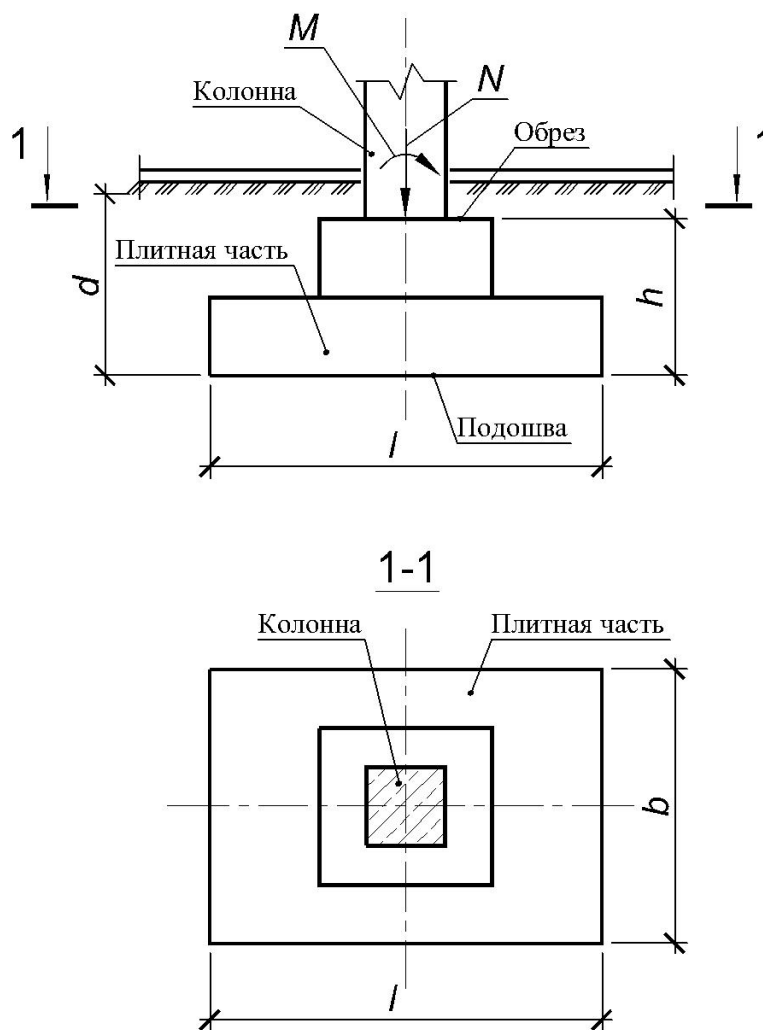


Рисунок 1.1 – Схема отдельного фундамента мелкого заложения

В работах Мальганова А. И., Плевкова В. С., Полищука А. И. [27, 55] представлена классификация способов усиления фундаментов, одним из которых является увеличение несущей способности фундаментов.

Увеличение несущей способности фундаментов может быть выполнено различными способами (без изменения схемы работы фундаментов, с изменением схемы работы фундаментов, с изменением напряженного состояния). В настоящей работе в качестве способа усиления рассматривается увеличение несущей способности отдельного фундамента с изменением его схемы работы. Это достигается за счет перераспределения внешней вертикальной

нагрузки между существующей плитной частью отдельного фундамента и вновь устраиваемыми сваями. Указанный способ довольно прогрессивный и позволяет провести повышение несущей способности фундаментов с минимальными трудозатратами и предельным сокращением объемов земляных работ [1] в условиях плотной городской застройки. На сегодняшний день разработано значительное количество технических решений по устройству свай при усилении фундаментов в различных грунтовых условиях.

## **1.2. Обзор конструктивных решений фундаментов при их усилении сваями для реконструируемых зданий**

Комбинированный фундамент представляет собой ленточный, отдельно стоящий или плитный (сплошной) фундамент, усиленный сваями. Устройство свай и передача на них нагрузки от фундаментов реконструируемых, восстанавливаемых зданий выполняется различными способами. В практике проектирования усиления отдельных фундаментов используют два способа их сопряжения с вновь устраиваемыми инъекционными сваями (рис. 1.2):

- 1) за счет примыкания свай к существующему фундаменту через дополнительные конструкции;
- 2) устройство свай непосредственно через подошву существующего фундамента.

Подробная информация о вышеуказанных способах приведена в работах Мальганова А. И., Плевкова В. С., Полищука А. И., Улицкого В. М. и др. [21, 22, 27, 55, 90, 91].

Первый способ усиления (рис. 1.2, а) применяется в случаях, когда состояние плитной части существующего фундамента является неудовлетворительным (имеются видимые дефекты, сколы, трещины, разрушение бетона, участки значительной коррозии арматуры). В этом случае по периметру вблизи фундамента выполняют инъекционные сваи, нагрузка на которые передается через устраиваемые вокруг существующего фундамента дополнительные конструкции (железобетонные обоймы, балки, подкосы). При этом

осуществляется жесткое сопряжение дополнительных конструкций с конструктивными элементами существующих фундаментов (сварка, замоноличивание).

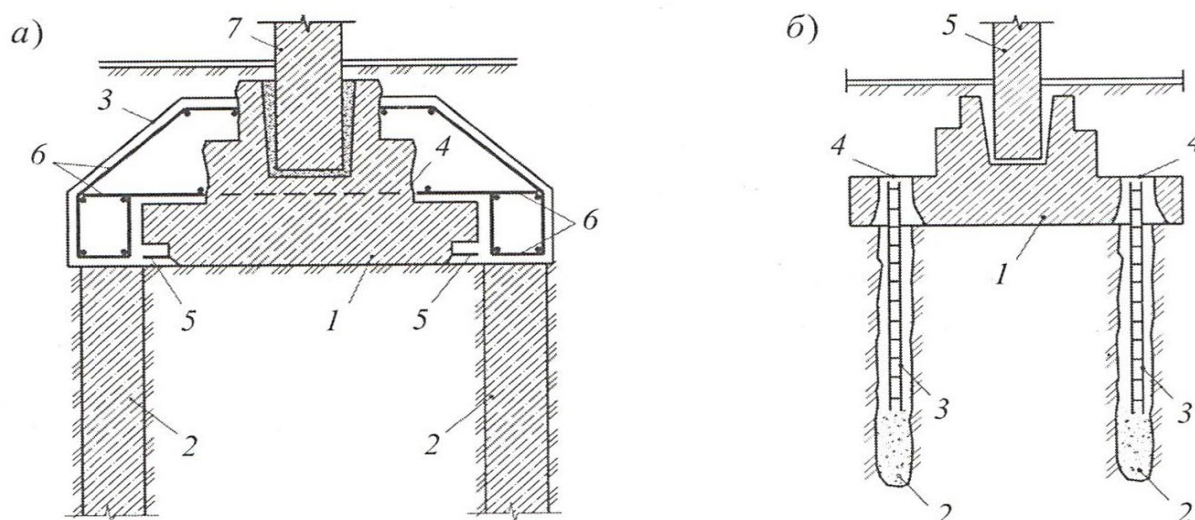


Рисунок 1.2 – Способы сопряжения конструктивных элементов усиленного отдельного фундамента при передаче части нагрузки на инъекционные сваи (по данным Полищука А. И.) [55]:

- а* – передача дополнительной нагрузки на инъекционные сваи через железобетонную обойму: 1 – усиливаемый отдельный фундамент; 2 – инъекционная свая; 3 – железобетонная обойма; 4 – поверхность фундамента, подготовленная к бетонированию; 5 – выпуски рабочей арматуры из тела существующего фундамента; 6 – арматура железобетонной обоймы; 7 – железобетонная колонна;
- б* – устройство инъекционных свай непосредственно через подошву существующего фундамента: 1 – усиливаемый отдельный фундамент; 2 – тело инъекционных свай; 3 – арматурные каркасы; 4 – конусообразные отверстия в плитной части существующего фундамента; 5 – железобетонная колонна

Второй способ усиления (рис. 1.2, *б*) применяется при удовлетворительном состоянии плитной части существующего фундамента (отсутствие видимых дефектов, достаточная прочность бетона) [8]. Суть способа заключается в передаче части нагрузки от фундамента на инъекционные сваи, которые устраивают непосредственно через плитную часть отдельного фундамента. Преимуществом данного способа является снижение объема земляных и бетонных работ.

Использование способа усиления отдельных фундаментов путем изменения его схемы работы за счет передачи части внешней нагрузки от существующего фундамента на инъекционные сваи имеет ряд преимуществ перед увеличением несущей способности таких фундаментов при помощи уширения их

подошвы. Достоинства такого способа во многом тесно связаны с особенностями технологии устройства инъекционных свай:

- 1) сниженное вибрационное воздействие на окружающую среду при устройстве инъекционных свай;
- 2) возможность ведения работ прямо из внутренних помещений реконструируемого здания с минимальным объемом земляных и бетонных работ;
- 3) высокая надежность инъекционных свай наряду с малой материалоемкостью.

В настоящей работе в качестве основного рассматривается способ усиления отдельных фундаментов при помощи инъекционных свай, устраиваемых непосредственно через плитную часть существующего фундамента.

### **1.3. Обзор конструктивных решений свай, устраиваемых при помощи инъекции мелкозернистого бетона**

Основные понятия и положения о сваях, которые устраиваются путем инъекции (подачи под давлением) мелкозернистого бетона, представлены в работах Дмитриева Н. В., Мангушева Р. А., Никитенко М. И., Нуждина Л. В., Нуждина М. Л., Петухова А. А., Пронозина Я. А., Пьянкова С. А., Сального И. С. и др. [13, 30, 34, 36, 37, 48, 70, 71 и др.], а также в нормативной документации [83]. К таким сваям относят «сваи, которые формируются в предварительно подготовленных скважинах за счет инъекции под давлением подвижной бетонной смеси и последующей опрессовки околосвайного массива грунта» [48]. Подготовка скважин для свай, устраиваемых путем инъекции мелкозернистого бетона, осуществляется различными способами:

- вдавливание иньектора в грунт основания (*иньекционные сваи*);
- бурение скважин (*буроиньекционные сваи*); согласно СП 24.13330.2021 [83] буроиньекционными называются сваи диаметром 0,15–0,35 м, устраиваемые в пробуренных скважинах путем нагнетания (иньекции) в них мелкозернистой бетонной смеси, а также устраиваемые полым шнеком.

Обычно, технологический цикл свай, устраиваемых путем инъекции мелкозернистого бетона, включает в себя следующие основные операции:

- устройство скважины путем бурения или прокола;
- монтаж арматурного каркаса;
- подача в скважину мелкозернистого подвижного бетона;
- выполнение опрессовки околосвайного массива грунта.

В зависимости от способа выполнения опрессовки околосвайного массива грунта сваи, устраиваемые путем инъекции мелкозернистого бетона, могут быть классифицированы по способу их устройства:

- подача при помощи растворонасоса дополнительной порции бетонной смеси через тампон, который разжимается в устье скважины, в отверстии существующего фундамента или в специальном заранее забетонированном устьевом патрубке;

- подача под давлением бетонной смеси через полый шнек в забой устроенной скважины или на заданном участке ее длины;

- выполнение электрогидродинамической опрессовки стенок и забоя скважины при помощи электроразрядной технологии (разрядно-импульсная технология РИТ);

- «вторичная инъекция» – опрессовка заданного участка тела сваи при помощи инъекционного разрыва бетона первичной инъекции скважины.

В работе Bruce и Juran [98] приводится классификация, согласно которой по способу производства сваи, устраиваемые путем инъекции мелкозернистого бетона, делятся на следующие категории:

Тип А: В скважину подается бетонная смесь при этом опрессовка скважины происходит только за счет силы тяжести. После заполнения скважины бетоном в нее устанавливают арматурный каркас.

Тип В: Бетонная смесь подается по стволу бурового оборудования. После достижения заданной отметки буровой инструмент изымается. В скважину устанавливают арматурный каркас. Давление бетона обычно составляет от 0,3 до 1 МПа.

Тип С: Бетонная смесь подается в скважину по такому же принципу, как и для типа А. Затем в заполненную скважину устанавливают арматурный каркас. По истечении 15–25 минут в заполненную скважину с смонтированным каркасом опускают труду и под давлением 1 МПа проводят опрессовку скважины. Данный метод практикуется в основном на территории Франции.

Тип D: Данная технология состоит из двух этапов и схожа с технологией Тип С. При данном методе, бетонная смесь может опрессовывать скважину как под собственным весом (Тип А), так и под давлением (Тип В). После начала твердения бетонной смеси через полый буровой инструмент подается бетонная смесь под давлением от 2 до 8 МПа. При этом может быть использована пакерзапирающая область, в которой осуществляется подача бетона.

Далее представлены наиболее распространенные технологии свай, устраиваемых путем инъекции мелкозернистого бетона.

**Буроинъекционные сваи «GEWI» (Dywidag).** В работе Рытова С. А. [73] представлена информация о способе устройства свай «GEWI» (Dywidag, Германия), которая устраивается путем погружения арматурного каркаса с инъекционными трубками в заранее пробуренную скважину с бетонной смесью (рис. 1.3). Технология предусматривает вторичную опрессовку после набора прочности бетона. Надежность выполнения опрессовки обеспечивается устройством на каждой инъекционной трубке по три клапана. Поперечное сечение сваи показано на рис. 1.4.

К недостаткам указанного способа устройства инъекционных свай стоит отнести особенности погружаемой конструкции, для изготовления которой требуются дополнительные трудозатраты. Кроме того, необходимо отметить сложность контроля работы клапанов и их целостности. Тем не менее, сваи «GEWI» находят применение при укреплении стенок откосов котлована, при выполнении усиления фундаментов.

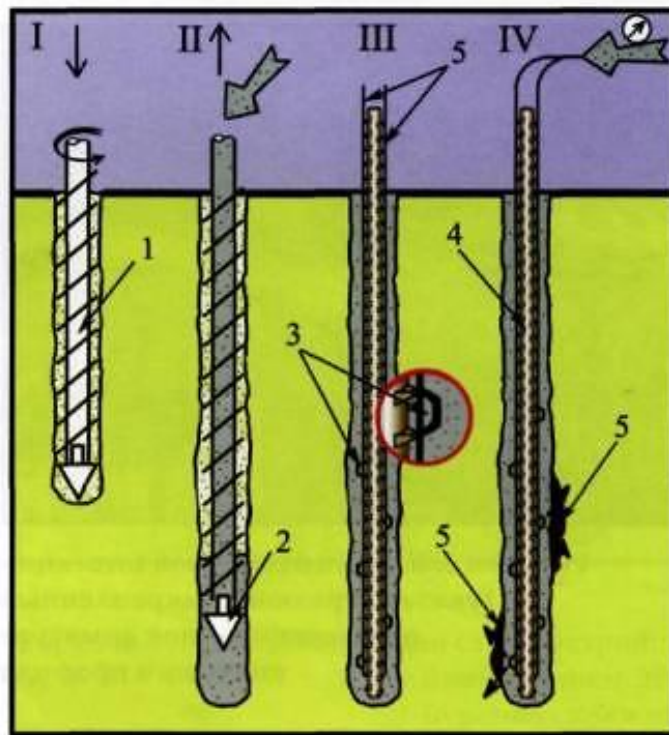


Рисунок 1.3 – Технология устройства свай «GEWI» (Dywidag)  
(по данным Рыгова С. А.) [73, с. 39]:

I, II – устройство скважины и подача в нее бетонной смеси; III – опускание арматурного каркаса, на котором установлены инъекционные трубки; IV – выполнение опрессовки скважины через инъекционные трубки; 1 – проходной шнек; 2 – клапан шнека; 3 – клапаны для инъекции; 4 – одиночный центральный стержень из высокопрочной арматуры с винтового профиля; 5 – инъекционные трубки

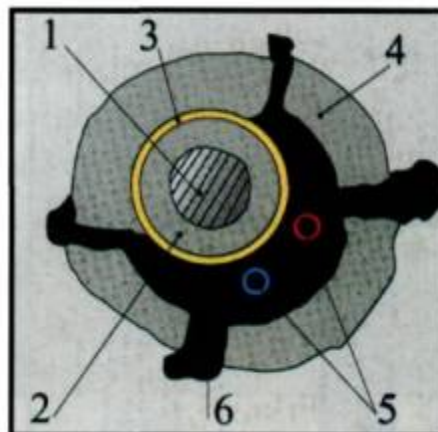


Рисунок 1.4 – Поперечное сечение сваи «GEWI» (Dywidag)  
(по данным Рыгова С. А.) [73, с. 40]:

1 – полнотелый арматурный стержень из высокопрочной стали; 2 – первичная антикоррозионная защита (бетонная смесь); 3 – вторичная антикоррозионная защита (пластмассовая гофрированная труба); 4 – бетон первичной инъекции; 5 – промываемые инъекционные трубки, 6 – бетон вторичной инъекции

**Буроинъекционные сваи «Titan» (Ischebeck Gmbh).** Согласно данным производителя Ischebeck Gmbh (Германия) [35] буроинъекционные сваи «Titan» устраиваются путем бурения и одновременной подачи через полую штангу цементно-песчаного раствора (давление 1–2 МПа).

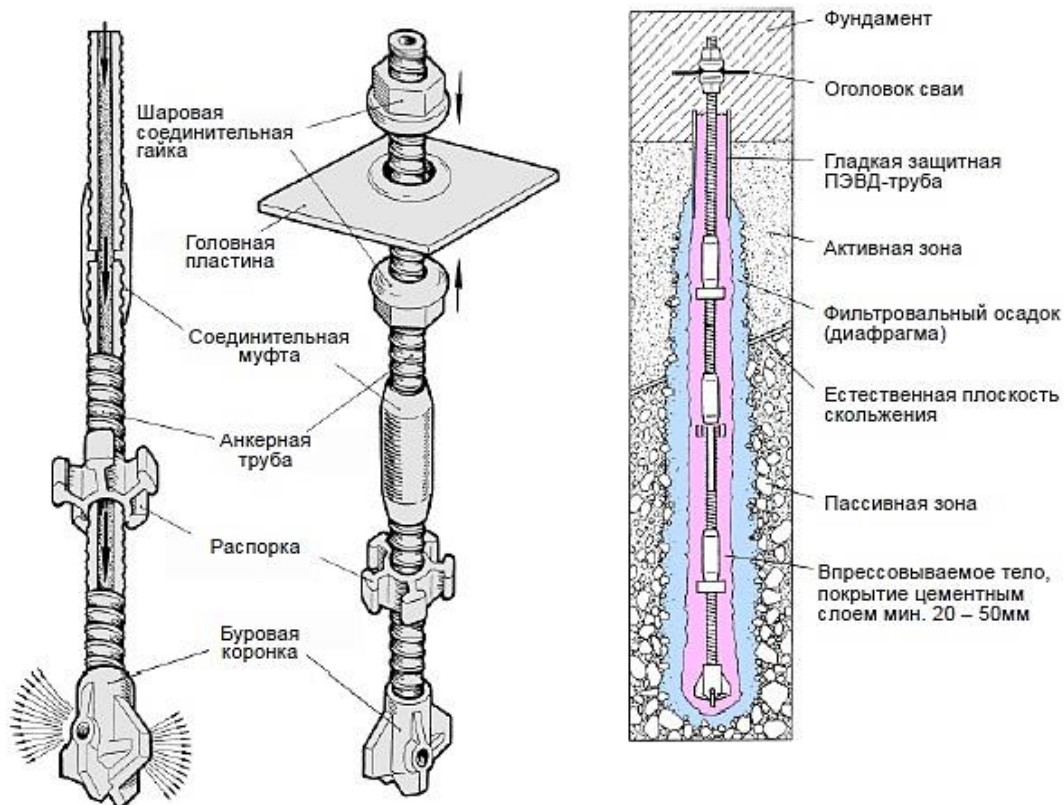


Рисунок 1.5 – Конструкция буроинъекционной анкерной сваи «Titan» (по данным производителя Ischebeck Gmbh) [35, с. 6]

Бурение скважины осуществляется при помощи специальной буровой коронки на нижнем конце штанги (рис. 1.5). Тип буровой коронки и состав мелкозернистой бетонной смеси назначают, исходя из физико-механических характеристик разрабатываемого массива грунта. При подаче под давлением бетонной смеси цементное вяжущее инфильтруется в основание, что приводит к увеличению сопротивления грунта вдоль боковой поверхности устраиваемой буроинъекционной сваи. Тело сваи формируется за счет возвратно-поступательного движения буровой коронки с одновременной радиальной подачей инъекционного раствора. Несмотря на довольно высокую стоимость, буроинъекци-

онные сваи «Titan» применяются для крепления подпорных стенок и ограждений котлована, устройства как новых фундаментов, так и усиления существующих в условиях реконструкции.

Представленный способ устройства буроинъекционных свай был усовершенствован автором настоящей диссертационной работы. Разработанные технологии устройства буроинъекционных свай, а также их использование при усилении фундаментов, подтверждены патентами РФ на изобретения (патенты РФ: № 2514261, № 2524077, № 2672698 и № 2672699) [43, 44, 46, 47].

**Буроинъекционные сваи, устраиваемые с использованием разрядно-импульсной технологии (сваи РИТ).** Сваи, устраиваемые на основе разрядно-импульсной технологии (рис. 1.6), применяются с 1975 г. По данным Готмана А. Л, Знаменского В. В., Мангушева Р. А., Пономарева А. Б., Рытова С. А., Самарина Д. Г. [29, 73, 74] сущность технологии заключается в том, что заполненная бетоном скважина обрабатывается серией высоковольтных электрических разрядов. Возникающий электрогидравлический эффект позволяет увеличить первоначальный диаметр скважины более, чем в два раза. В зоне воздействия разрядов наблюдается уплотнение и снижение пористости грунтов основания. Способ устройства свай РИТ включает в себя следующие технологические операции:

- 1) устройство скважины;
- 2) подача в скважину мелкозернистой бетонной смеси;
- 3) обработка скважины серией высоковольтных электрических разрядов на необходимых глубинах;
- 4) погружение арматурного каркаса в скважину.

Сваи РИТ применяются при возведении ограждающих конструкций подземных и подпорных сооружений, для устройства фундаментов в условиях нового строительства и реконструкции зданий (сооружений). Однако их применение может быть ограничено инженерно-геологическими условиями строительной площадки. Так, при наличии в основании водонасыщенных грунтов или производстве работ ниже уровня подземных (грунтовых) вод наблюдается

эффект разжижения (полная потеря прочности) ударной волной высоковольтного электрического разряда. Таким образом, недостатком рассматриваемого способа устройства инъекционной сваи является ограничение возможности его применения в водонасыщенных грунтах ниже уровня подземных (грунтовых) вод.

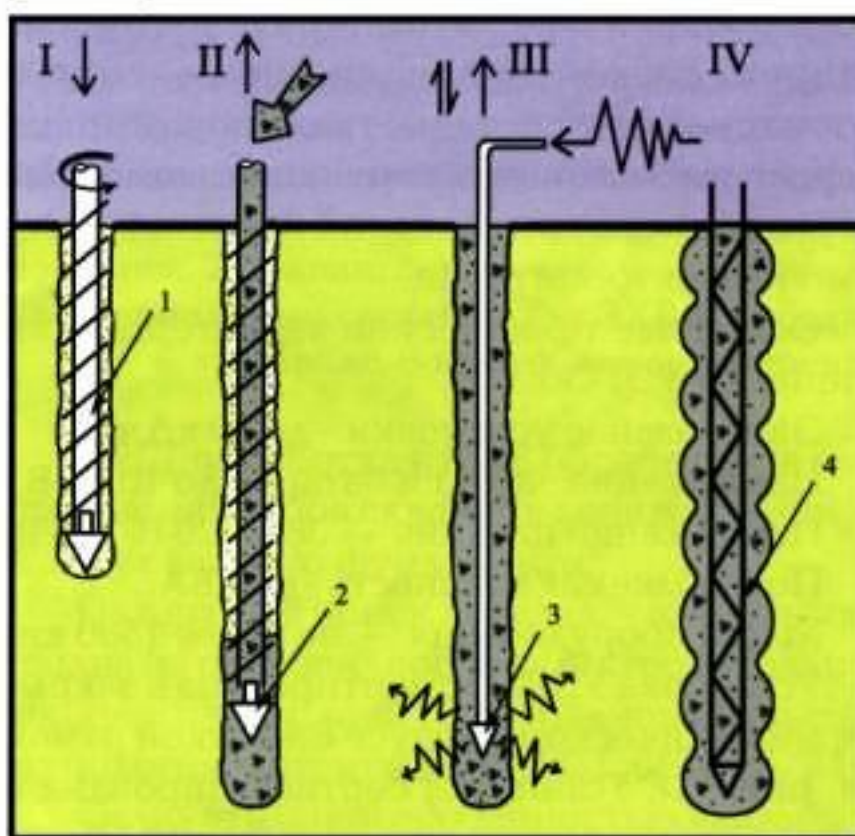


Рисунок 1.6 – Технологическая схема устройства буроинъекционных свай с использованием разрядно-импульсной технологии (по данным Рытова С. А.) [73, с. 41]:

I – бурение скважины; II – подача в скважину мелкозернистой бетонной смеси; III – обработка скважины серией высоковольтных электрических разрядов на необходимых глубинах; IV – погружение арматурного каркаса в скважину; 1 – буровой шнек; 2 – клапан; 3 – источник высоковольтных электрических разрядов; 4 – арматурный каркас

**Инъекционные сваи, устраиваемые вдавливанием инъектора.** Одним из эффективных способов усиления эксплуатируемых фундаментов зданий, сооружений является способ передачи части нагрузки от надземных строительных конструкций на инъекционные сваи (рис. 1.7). Устройство таких свай осуществляется вдавливанием инъектора (перфорированная стальная труба с наконечником на нижнем конце) в глинистый грунт с последующей подачей

под давлением подвижной бетонной смеси и его опрессовкой [45, 48]. Данный способ устройства свай был разработан в 2003–2009 гг. в ТГАСУ (г. Томск) совместно с другими организациями и получил распространение при выполнении геотехнических работ и реконструкции зданий, сооружений в Томске, Новосибирске, Кемерово и других городах России.

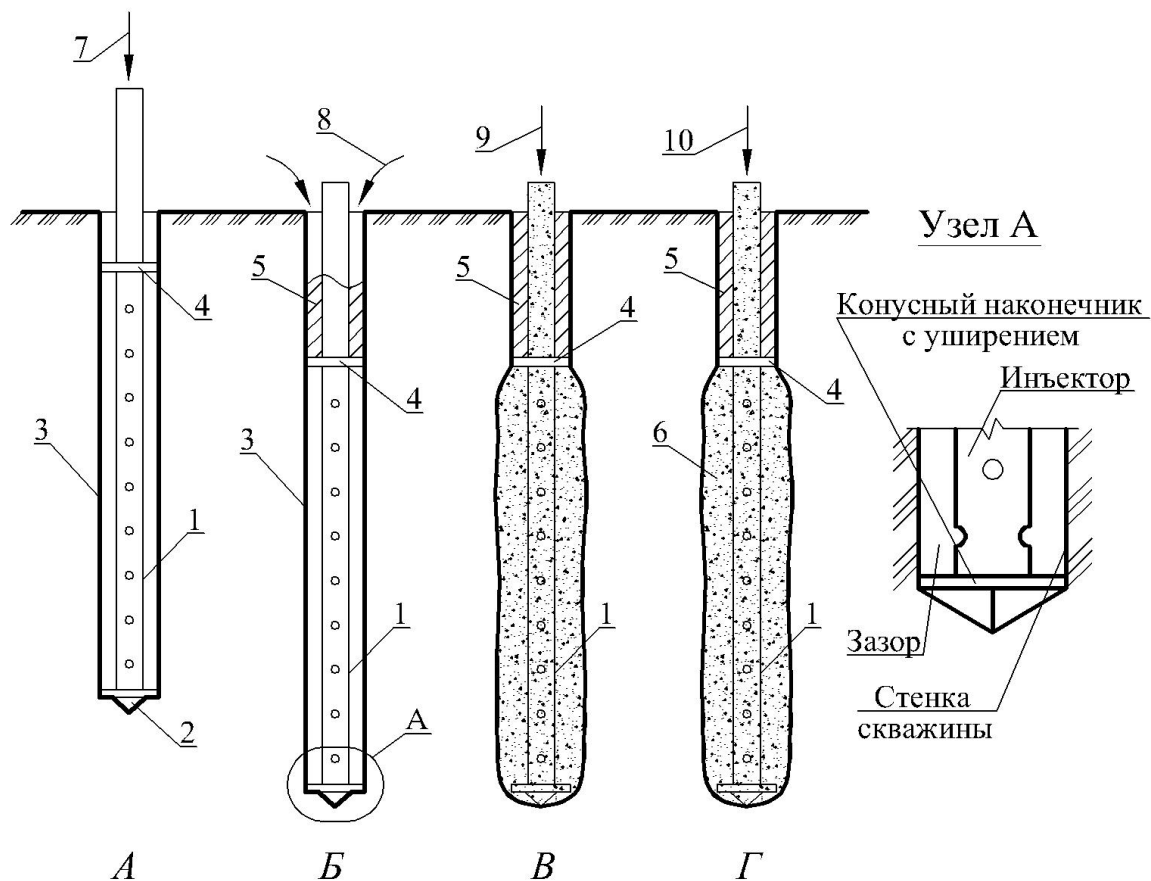


Рисунок 1.7 – Технологическая схема устройства инъекционных свай  
(по данным Петухова А. А., Шалгинова Р. В. и др. [48, 96]:

*А* – вдавливание стального перфорированного иньектора; *Б* – тампонирующее затрубное пространство иньектора; *В* – нагнетание в скважину через отверстия иньектора подвижной бетонной смеси под давлением  $p_{н} = 500–900$  кПа; *Г* – опрессовка грунта через 20–30 минут после нагнетания бетонной смеси; 1 – стальной перфорированный иньектор; 2 – конусный наконечник с уширением; 3 – стенка скважины; 4 – верхнее «запорное» кольцо; 5 – тампонаж; 6 – инъекционная свая; 7 – направление вдавливающей нагрузки; 8 – заполнение затрубного пространства иньектора тампонажным раствором; 9 – ступенчатое нагнетание бетонной смеси с промежуточной опрессовкой грунта; 10 – опрессовка грунта рабочим давлением

Согласно результатам экспериментальных исследований Петухова А. А. [48], вследствие инъекции (подачи под давлением) мелкозернистого бетона в

скважину через иньектор происходит ее радиальное расширение, способствующее увеличению диаметра иньекционной сваи и, соответственно, увеличению площади ее боковой поверхности (рис. 1.7). Способ нагнетания мелкозернистого бетона в скважину предусматривает диапазон изменения давления иньекции  $p_{и}$  от 500 до 900 кПа. На этапе выполнения этой работы осуществляется тщательный контроль над процессом нагнетания, чтобы исключить вероятность появления гидравлического разрыва массива грунта вокруг сваи (особенно в слабых глинистых грунтах).

Рассматриваемый способ устройства иньекционных свай имеет ряд достоинств:

- 1) отсутствие вибрационного воздействия на окружающую застройку;
- 2) повышенная несущая способность в связи с применением ступенчатой опрессовки;
- 3) снижение усилия вдавливания в 1,5–4 раза за счет воздушного зазора между иньектором и грунтом;
- 4) применение доступных и наиболее распространенных материалов из сортамента стандартных профилей, представленных на рынке.

#### **1.4. Обзор экспериментальных исследований работы свай, устраиваемых иньекцией мелкозернистого бетона в глинистых грунтах**

Экспериментальные исследования несущей способности и конечных осадок иньекционных свай выполнялись Петуховым А. А. [48], Шалгиновым Р. В. [96], Тарасовым А. А. [57, 87, 88] в г. Томске и г. Кемерово в 2003–2005 гг. под руководством Полищука А. И.

Испытания иньекционных свай выполнялись на трех опытных площадках г. Томска и г. Кемерово.

Площадка №1 располагалась в г. Томске по ул. Белинского, 32. Испытания выполнялись в подвале существующего торгового здания [48]. Физико-

механические характеристики грунтов площадки №1 приведены в таблице 1 Приложения А.

Площадка №2 располагалась в г. Томске по ул. Соляной. Испытания выполнялись в подвале существующего торгового здания [48]. Физико-механические характеристики грунтов площадки №2 приведены в таблице 2 Приложения А.

Площадка №3 располагалась в г. Кемерово на территории Кемеровского государственного сельскохозяйственного института (КГСХИ). Испытания выполнялись вблизи здания лабораторного корпуса института [48]. Физико-механические характеристики грунтов площадки №3 приведены в таблице 3 Приложения А.

*Методика проведения испытаний.* Для выполнения испытаний инъекционных свай вертикальной вдавливающей нагрузкой в глинистых грунтах на площадке №3 (г. Кемерово) использовалась установка, состоящая из гидравлического домкрата, системы балок и анкерных свай. На площадках №1 и №2 (г. Томск) применялась аналогичная установка, в качестве упорной конструкции которой служили существующие строительные конструкции зданий (ростверки). По данным Петухова А. А. [48] после набора прочности бетона проводились испытания свай статической вертикальной вдавливающей нагрузкой в соответствии с ГОСТ 5686–94. Нагружение инъекционных свай производилось равномерно, ступенями по 15–20 кН. После каждой ступени нагружения снимались показания всех приборов для измерения деформаций (вертикальных перемещений свай).

*Результаты испытаний.* В соответствии с указанной выше методикой в 2002–2003 гг. были выполнены натурные испытания инъекционных свай на трех площадках в г. Томске и г. Кемерово. На площадке №1 (г. Томск, ул. Белинского, 32) было устроено 7 инъекционных свай с маркировкой СИ-1–СИ-7 (длина свай  $L_{св} = 4,6$  м (в том числе длина участка тампонажа 600 мм); средний диаметр свай  $d_{св} = 250$  мм). На площадке №2 (г. Томск, ул. Соляная) было устроено 12 инъекционных свай с маркировкой СИ-8–СИ-19 (длина свай

$L_{\text{св}} = 4,5$  м (в том числе длина участка тампонажа 500 мм); средний диаметр сваи  $d_{\text{св}} = 220$  мм). На площадке №3 (г. Кемерово, КГСХИ) было устроено 12 инъекционных свай с маркировкой ИС-1–ИС-12 (длина свай  $L_{\text{св}} = 3,5; 5$  м (в том числе длина участка тампонажа 1500 мм); средний диаметр сваи  $d_{\text{св}} = 270$  мм). Результаты испытаний свай представлены в виде графиков зависимости осадки инъекционных свай от прикладываемой к ним вертикальной вдавливающей нагрузки (рис. 1.8).

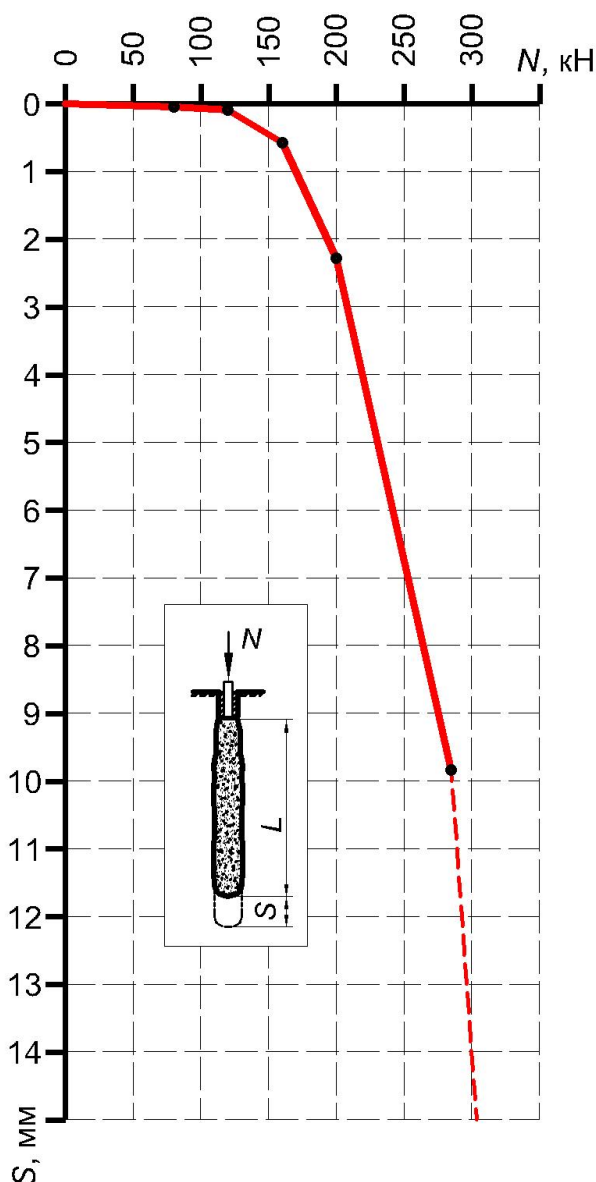


Рисунок 1.8 – График зависимости осадки  $S$  инъекционной сваи ИС-4 на площадке №3 (длина сваи  $L_{\text{св}} = 5$  м); средний диаметр сваи  $d_{\text{св}} = 270$  мм) от прикладываемой к ней вертикальной вдавливающей нагрузки  $N$  (по данным Петухова А. А. [48])

## 1.5. Обзор методов расчета усиления фундаментов сваями и их элементов для реконструируемых зданий

*Методы расчета свай.* Инъекционные сваи по характеру работы относят к висячим сваям, так как вклад нижнего конца сваи в ее несущую способность, как правило, меньше сопротивления вдоль боковой поверхности сваи. В частности, Jeon и Kulhaway в своей работе [101] отмечают, что в случае для инъекционных свай, для которых характерно соотношение диаметра сваи к ее длине ( $d_{св}/L_{св}$ ) в разы большее, чем у остальных типов свай, нагрузка передается на грунт в основном через боковую поверхность свай. Несущая способность сваи по острию мала. Следовательно, повышение несущей способности инъекционной сваи достигается путем увеличения ее боковой поверхности (регулирование длины сваи) и улучшения контакта «свая – грунт».

Расчет несущей способности висячих свай, к которым приложена вертикальная вдавливающая нагрузка производится, обычно, только по прочности грунта, так как по прочности материала сваи она всегда заведомо выше. Расчет ведется в соответствии с требованиями нормативных документов [82, 83]. Положения по расчету висячих свай, в том числе инъекционных, приводятся в работах Егорова А. И., Джантимирова Х. А. и др. [15, 72], рекомендациях [14]. Зарубежный опыт решения данного вопроса представлен в работах Bruce D. A., Traylor R. P., Jeon S., Kulhawy F. H., Lizzi F. и др. [99, 101, 102 и др.].

Сопротивление висячей сваи по грунту может быть определено двумя методами: практический (расчет ведется с учетом табличных данных, полученных эмпирическим путем в результате научных исследований) и полевые исследования (натурные испытания свай, динамическое или статическое зондирование). Учесть корректно особенности взаимодействия висячей сваи с грунтом основания в конкретных инженерно-геологических условиях площадки, опираясь на табличные данные, как правило, затруднительно. В связи с этим, результаты полевых исследований являются наиболее достоверными при

оценке работы свай, тогда как практический метод целесообразно использовать для ориентировочного определения несущей способности одиночных свай на стадии проектирования.

В СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты [83] представлен метод расчета свайных фундаментов, основанный на использовании табличных данных многолетних исследований. Метод нашел широкое применение в практике проектирования. В его основу легли данные опытных испытаний забивных свай, проведенные профессором Лугой А. А. [25]. Полученные значения расчетных сопротивлений грунта под нижним концом и вдоль боковой поверхности свай в различных грунтовых условиях легли в основу формулы СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты. Она позволяет вычислить несущую способность висячей сваи в зависимости от табличных значений расчетных сопротивлений грунта основания вдоль боковой поверхности сваи и под ее нижним концом. Так как метод увязан с работой забивных свай, его использование для инъекционных свай приводит к большим запасам по несущей способности, и, зачастую, не отражает особенностей технологии устройства тех или иных свай. Также стоит отметить, что метод используется в большей степени для нового строительства и не учитывает напряженно-деформируемое состояние грунта основания существующего фундамента здания.

Согласно СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты [83] для расчета осадки одиночной сваи длиной  $l$ , прорезающей слой грунта с модулем сдвига  $G_1$  и коэффициентом Пуассона  $\nu_1$ , опирающейся на грунт, рассматриваемый как линейно-деформируемое полупространство с параметрами  $G_2$  и  $\nu_2$ , допускается производить по формуле:

$$s = \beta \frac{N}{G_1 l}, \quad (1.1)$$

где  $N$  – вертикальная нагрузка, передаваемая на сваю, МН;  $\beta$  – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\beta = \frac{\beta'}{\lambda_1} + \frac{1 - (\beta'/\alpha')}{\chi}. \quad (1.2)$$

Параметры в формуле (1.2) определяют в соответствии с рекомендациями СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты.

Приведенный выше метод определения осадки одиночной сваи имеет сходие с методом определения несущей способности недостатки: не отражает особенностей технологии устройства тех или иных свай. Кроме того, данный метод не учитывает нелинейной зависимости осадок сваи от прикладываемой нагрузки, которая характерна для реальной работы свай в различных грунтовых условиях.

Исследованиями в области разработки методов расчета конечных осадок свай и свайных фундаментов занимались Барвашов В. А., Бартоломей А. А., Бахолдин Б. В., Готман А. Л., Горбунов-Посадов М. И., Лапшин Ф. К., Полищук А. И., Тер-Мартirosян З. Г., Федоровский В. Г., Цытович Н. А., Randolph M. F., Wroth C. P. и др.

Randolph M. F., Wroth C. P. (1978) считали, что при нагружении свай развиваются преимущественно сдвиговые деформации в околосвайном массиве грунта [105]. При этом деформации грунта вокруг сваи условно представляются в виде концентрических цилиндров, на боковой поверхности которых действуют касательные напряжения ( $\tau$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau_m$ ). Аналогичное решение, но с учетом реологических свойств глинистых грунтов, было получено Тер-Мартirosяном З. Г. и др. [89]. Формула для определения линейной осадки ствола сваи  $w$  (по Randolph M. F. и др., 1978), возникающей от действия касательных напряжений ( $\tau$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau_m$ ), вдоль ее боковой поверхности имеет вид:

$$w = \frac{\tau_0 \cdot r_0}{G} \cdot \int_{r_0}^{r_m} \frac{dr}{r} = \frac{\tau_0 \cdot r_0}{G} \cdot \ln \left( \frac{r_m}{r_0} \right), \quad (1.3)$$

где  $r$  – горизонтальное расстояние от вертикальной оси сваи  $z$  до любой границы в пределах линейно-деформируемой области околосвайного массива грунта, м;  $r_m$  – горизонтальное расстояние от вертикальной оси сваи  $z$  до границы, где вертикальные перемещения грунта  $w$  равны нулю (радиус влияния),

$m$ ;  $r_0$  – радиус инъекционной сваи, м;  $\tau_0$  – касательные напряжения, действующие на боковой поверхности инъекционной сваи, кПа;  $G$  – начальный модуль сдвига грунта, кПа.

Следует отметить, что такая схема деформирования околосвайного массива грунта при нагружении одиночной сваи впервые была предложена Барвашовым В. А. [2], который назвал ее «телескопический сдвиг». Уточнение расчетных схем и развитие методов расчета осадок одиночных свай в пылеватоглинистых и других грунтах было выполнено Федоровским В. Г., Готманом А. Л., Лapidусом Л. С., Лапшиным Ф. К, Мангушевым Р. А. и др. [9, 23, 24, 29, 92, 93 и др.].

*Особенности расчета фундаментов, усиливаемых сваями.* Исследования совместной работы свай в составе усиливаемых фундаментов мелкого заложения представлены в работах Блащук Н. В., Голубева К. В., Гусева Г. Н., Готмана А. Л., Готман Н. З., Джантимирова Х. А., Знаменского В. В., Зотовой Е. В., Луги А. А., Малышкина А. П., Мирошниченко Р. В., Оржеховского Ю. Р., Осокина А. И., Полищука А. И., Пронозина Я. А., Самохвалова М. А., Сернова В. А., Струнина П. В., Фадеева А. Б., Федоровского В. Г., Филиппович А. А. и др.

В работе Зотовой Е. В. и др. [19] представлен механизм включения в работу ростверка при нагружении свайного фундамента. Указывается, что при малых нагрузках ростверк практически не работает; при дальнейшем увеличении нагрузок происходит перераспределение напряжений, ростверк полностью включается в работу, что приводит к замедлению скорости роста касательных напряжений по поверхности сваи и увеличению общей жесткости системы в вертикальном направлении).

В работе Гусева Г. Н. и др. [10] предлагается алгоритм для определения долей нагрузок, передаваемых на сваи и плитный ростверк плитно-свайного фундамента. Формула прошла проверку на практике при расчете фундаментов высотных зданий в программном комплексе ANSYS. Также указано, что распределение полного нагружения между плитой и сваями в плитно-свайном

фундаменте существенно зависит от отношения жесткостных характеристик подстилающих грунтов.

Оржеховский Ю. Р. и др. [38] в своей работе приводит расчетные формулы для определения несущей способности свай (свайных кустов), воспринимающие долю нагрузки, которую необходимо снять с подошвы плиты. Детальная методика подобных расчетов содержится в СТП 02494791–001–2012 [85].

Осокин А. И. в своей работе [39] приводит особенности передачи на сваи дополнительной нагрузки в условиях реконструкции зданий.

Анализом перераспределения нагрузки между элементами ленточного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями, занималась Филиппович А. А. [56, 58, 94]. Предложенный метод позволяет определить доли нагрузки, приходящиеся на подошву фундамента и инъекционные сваи, с учетом геометрических характеристик фундамента и инженерно-геологических условий площадки строительства.

В работе Блащук Н. В. [6] приведены результаты численного моделирования, на основе которого разработана методика расчета допустимой нагрузки на вновь устраиваемый свайный фундамент и усиливаемый при помощи выносных свай ленточный фундамент мелкого заложения.

Серновым В. А. [81], Струниным П. В. [86] проведены экспериментальные и теоретические исследования напряженно-деформированного состояния грунта в межсвайном пространстве. При шаге свай менее  $3d-4d$  ( $d$  – диаметр сваи) происходит понижение сил трения на их боковой поверхности, возникает явление блокирования межсвайного грунта. В этом случае авторами рекомендуется выполнять расчет осадки свайного фундамента как условного массива с некоторым допущением. Однако при большем шаге (более  $3d-4d$ ) работу свай в кусте целесообразно оценивать как для одиночной сваи.

При помощи инженерного метода расчета усиления оснований, представленного в работе Джантимирова Х. А. [72], можно определить количество инъекционных свай для усиления существующего фундамента, а также дополни-

тельную осадку усиленного фундамента. При этом есть возможность нахождения долей нагрузки, приходящейся на инъекционные сваи и плитную часть существующего фундамента. При заданном числе свай  $n_n$  для усиления фундамента на естественном основании нагрузка на одну сваю  $P_n$  определяется при решении квадратного уравнения:

$$a_1 P_n^2 - a_2 P_n + a_3 = 0 \quad (1.4)$$

где  $P_n$  – нагрузка на одну сваю.  $a_1, a_2, a_3$ .

Недостатком данного метода является необходимость проведения статических испытаний инъекционных свай для получения следующих исходных для расчета параметров:

- начальный коэффициент жесткости свай  $C_0$ , кН/м;
- критическая нагрузка на сваю  $P_{кр}$ , кН;
- расчетная нагрузка, допускаемая на сваю,  $P^*$ , кН.

В работе Мирошниченко Р. В. [33] представлена методика расчета повышения несущей способности основания с определением необходимого количества микросвай усиления. Метод основан на применении эквивалентного объемного модуля деформации грунта (осредненный модуль деформации грунта и микросвай). Существенным недостатком предлагаемого метода является то, что устраиваемые инъекционные сваи и грунт между ними представлен в виде единого массива.

Представленный выше обзор показывает, что в настоящее время накоплен практический опыт конструирования и устройства инъекционных свай для усиления фундаментов реконструируемых зданий. Выполнены исследования по определению несущей способности одиночных инъекционных свай в глинистых грунтах. Выявлены особенности перераспределения нагрузки между элементами ленточного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями.

Однако, несмотря на довольно большое количество исследований в области работы инъекционных свай в глинистых грунтах, вопросы расчета осадок инъекционных свай в глинистых грунтах рассмотрены недостаточно. Исполь-

зубые для определения осадок свай методы расчета не учитывают особенности технологии изготовления инъекционных свай в глинистых грунтах, а также, зачастую, нелинейную работу грунта основания.

Ключевым моментом при реконструкции, восстановлении зданий и сооружений является прогнозирование осадок усиливаемых фундаментов. От правильности принимаемых проектных решений по увеличению несущей способности фундаментов зависит работоспособное состояние надземных строительных конструкций и всего здания в целом. Поэтому необходимо отметить важность вопроса об определении осадки отдельных фундаментов мелкого заложения при их усилении инъекционными сваями в условиях реконструкции, восстановления зданий (сооружений) с учетом перераспределения внешних нагрузок между ними, а также технологическими особенностями устройства таких свай.

Таким образом, развитие методов расчета усиления отдельных фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах для реконструируемых зданий имеет довольно большое научно-практическое значение.

### **1.6. Задачи исследований**

На основе анализа и обобщения данных, представленных в предыдущих параграфах, сформулированы *задачи диссертационной работы*:

1. Разработать и обосновать расчетные системы одиночной инъекционной сваи («инъекционная свая – глинистый грунт») и отдельного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями («фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт»).

2. Выполнить численное моделирование напряженно-деформированного состояния разработанных систем (одиночные инъекционные сваи и усиленные ими фундаменты мелкого заложения в разнотипных глинистых грунтах). Сопоставить результаты моделирования с данными натурных испытаний инъекционных свай.

3. Разработать метод к определению доли внешней нагрузки, перераспределяемой между элементами системы «подошва фундамента – инъекционные сваи».

4. Разработать методы расчета осадок одиночных инъекционных свай и осадок фундаментов мелкого заложения, усиливаемых инъекционными сваями в глинистых грунтах для условий реконструкции зданий.

5. Составить рекомендации по проектированию усиления фундаментов мелкого заложения (отдельных, ленточных) инъекционными сваями в глинистых грунтах и выполнить их практическую апробацию.

## 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ С ГЛИНИСТЫМ ГРУНТОМ ОСНОВАНИЯ

### 2.1. Конструкции инъекционных свай и фундаментов, усиливаемых инъекционными сваями

Одним из эффективных способов устройства *инъекционных свай* при усилении фундаментов реконструируемых, зданий (сооружений) является подача бетонной смеси в скважины через инъекторы специальной конструкции. Устройство таких свай осуществляется вдавливанием инъектора в глинистый грунт с последующей подачей под давлением мелкозернистой подвижной бетонной смеси и опрессовкой образованной скважины (Полищук А. И., Петухов А. А. и др., 2004) [10, 48, 82 и др.] (рис. 2.1). Данный способ устройства свай был разработан в 2003–2009 гг. в ТГАСУ (г. Томск) и получил распространение при выполнении геотехнических работ и реконструкции зданий, сооружений в Томске, Новосибирске, Кемерово и других городах России. Область применения рассматриваемых инъекционных свай распространяется на глинистые грунты (супеси, суглинки, глины) мягкопластичной, пластичной (для супесей) и текучепластичной консистенции.

Способ нагнетания мелкозернистого бетона в скважину предусматривает диапазон изменения давления инъекции  $p_{и}$  от 500 до 900 кПа. На этапе выполнения этой работы осуществляется тщательный контроль над процессом нагнетания, чтобы исключить вероятность появления гидравлического разрыва массива глинистого грунта вокруг сваи (особенно в слабых глинистых грунтах). Согласно результатам экспериментальных исследований (Петухов А. А. и др., 2006), вследствие инъекции (поддачи под давлением) мелкозернистого бетона в скважину через инъектор происходит ее радиальное расширение, способствующее увеличению диаметра инъекционной сваи и площади ее боковой поверхности.

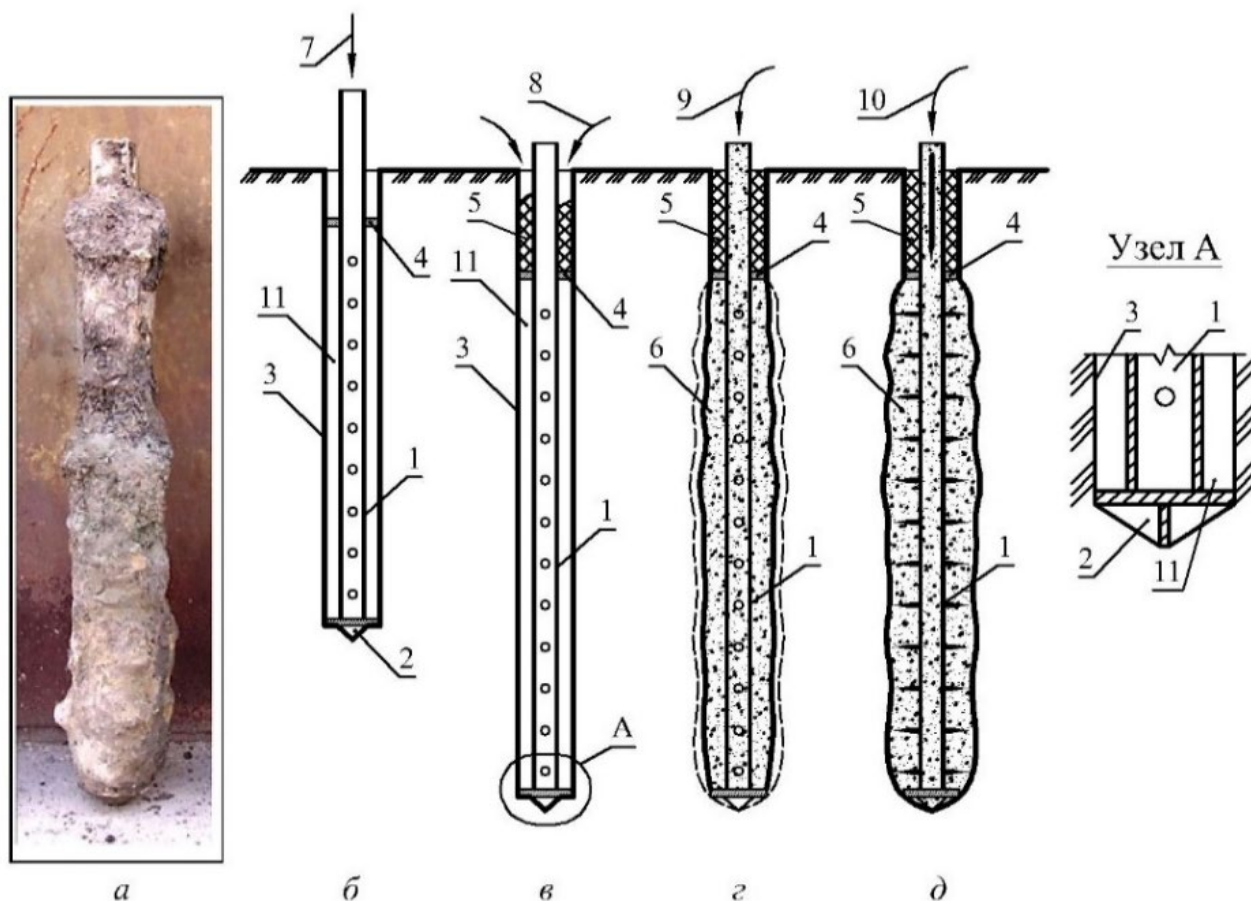


Рисунок 2.1 – Схема устройства инъекционных свай (по данным Семенова И. В.):  
*a* – общий вид инъекционной сваи после экскавации (результаты исследований Пегухова А. А. и др.); *б* – вдавливание стального перфорированного инъектора; *в* – тампонирующее затрубное пространство инъектора; *г* – нагнетание в скважину через отверстия инъектора подвижной бетонной смеси; *д* – опрессовка скважины; 1 – стальной перфорированный инъектор; 2 – конусный наконечник с уширением; 3 – стенка скважины; 4 – верхнее «запорное» кольцо; 5 – тампонаж из цементно-песчаного раствора; 6 – тело инъекционной сваи; 7 – направление вдавливания инъектора; 8 – направление тампонирующего затрубного пространства инъектора; 9 – направление нагнетания подвижной бетонной смеси в скважину; 10 – опрессовка скважины; 11 – воздушный зазор между стенкой скважины и инъектором

В диссертационной работе рассматриваются отдельные фундаменты мелкого заложения, усиливаемые инъекционными сваями непосредственно через существующую плитную часть фундамента (рис. 2.2). Исследования проводились при следующих геометрических параметрах усиливаемых фундаментов: ширина подошвы фундамента составляла 1; 1,5 и 2 м; глубина заложения фундамента 1 м.

## 2.2. Методика численных исследований (моделирования) работы инъекционных свай в составе фундаментов реконструируемого здания с использованием ПК Midas

**Общие положения.** В настоящем разделе в качестве метода исследования работы фундаментов используется компьютерное моделирование, основные положения которого базируются на методе конечных элементов. Прежде, чем приступить к исследованию работы отдельного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями в глинистых грунтах, необходимо обосновать возможность применения программного комплекса *Midas GTS* для решения поставленных в работе задач. Для этого выполним моделирование одиночной инъекционной сваи в глинистом грунте и сопоставим его результаты с данными натурных испытаний свай.

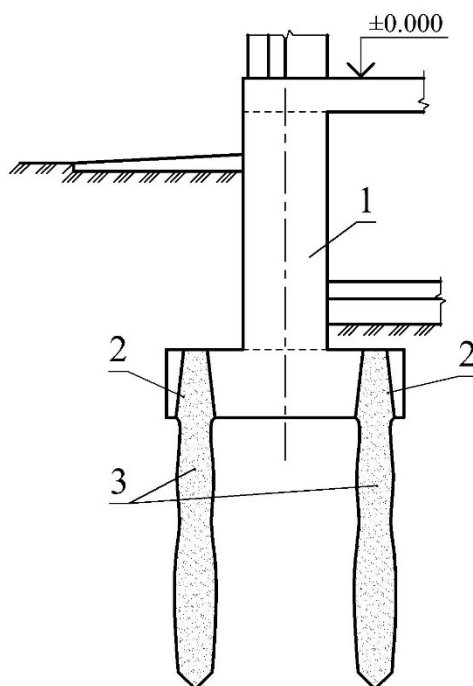


Рисунок 2.2 – Конструктивное решение фундамента, усиливаемого инъекционными сваями:

1 – существующий отдельный фундамент мелкого заложения; 2 – отверстия в плитной части фундамента для устройства инъекционных свай и их сопряжения с существующим фундаментом; 3 – инъекционные сваи

Согласно проведенным ранее исследованиям [81, 86], взаимным влиянием свай в кусте либо свай, используемых для усиления отдельно стоящих фундаментов, можно пренебречь в том случае, если расстояние между сваями будет составлять более  $3d-4d$  ( $d$  – диаметр инъекционной сваи). В этом случае

погрешность результатов расчета не превысит 5–10% (установлено по данным Иванова И. И. и др., 1998). Таким образом, работу инъекционных свай в составе усиливаемого фундамента с достаточной точностью можно оценить по характеру работы одиночной инъекционной сваи. Следовательно, первоочередной задачей исследований ставилась проверка результатов моделирования работы одиночной инъекционной сваи в программном комплексе на базе метода конечных элементов и обоснование возможности его применения для проведения дальнейших исследований.

В диссертации обоснование применения программного комплекса для моделирования работы усиливаемого отдельного фундамента в глинистых грунтах производилось на основе сравнения с данными натурных испытаний инъекционных свай в глинистых грунтах. Для этого использовались результаты исследований Петухова А. А., выполненные в г. Томске и г. Кемерово в 2003–2005 гг. (см. п. 1.4 настоящей диссертации). Полученные данные позволили сделать выводы о возможности применения программного комплекса для решения поставленных задач.

Компьютерное моделирование включает в себя подбор соответствующих параметров конечно-элементной расчетной системы (модель материалов сваи и грунта, типы конечных элементов, геометрия расчетной системы, граничные условия), составление алгоритма создания конечно-элементной расчетной системы с учетом технологии устройства свай. Кроме того, для проведения обоснования применения программного комплекса *Midas GTS* необходимо подобрать рациональные размеры расчетной системы, при которых их влияние на результаты расчета осадок минимально.

**Грунтовые условия опытной площадки.** Грунтовые условия, в которых выполнялось моделирование инъекционных свай, а также исследования отдельных фундаментов, усиливаемых при помощи таких свай, представлены глинистыми грунтами с консистенцией от мягкопластичной до текучей. Это связано, главным образом, с наличием информации о натурных испытаниях

инъекционных свай именно в таких грунтах и возможностью сравнения результатов численного моделирования с опытными данными.

Натурные испытания инъекционных свай в г. Томске и г. Кемерово (Петухов А. А., 2003) выполнялись в слабых водонасыщенных глинистых грунтах – суглинки мягко-текуче-пластичной консистенции, супеси текуче-пластичной консистенции (см. п. 1.4 настоящей диссертации). Физико-механические характеристики грунтов варьировались в следующих диапазонах: удельный вес грунта  $\gamma = 18\text{--}20$  кН/м<sup>3</sup>; коэффициент пористости  $e = 0,6\text{--}1,0$ ; модуль упругости  $E = 4\text{--}10$  МПа; удельное сцепление  $c = 14\text{--}20$  кПа; угол внутреннего трения  $\varphi = 16\text{--}22^\circ$ .

### **2.2.1. Методика исследований (моделирования) работы одиночной инъекционной сваи**

*Обоснование модели грунта для расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт».* В соответствии с ГОСТ 25100–2020 «Грунты. Классификация» [7], грунт – горные породы, почвы, техногенные образования, представляющие собой многокомпонентную и многообразную геологическую систему и являющиеся объектом инженерно-хозяйственной деятельности человека. Грунт является пластичным материалом, находящемся в сложном напряженном состоянии, и необходимо заранее знать, в какой момент при той или иной комбинации главных напряжений наступает опасное состояние материала, влекущее за собой потерю несущей способности. Решение данной задачи осложнено тем, что число сочетаний из главных напряжений неограниченно велико, поэтому приходится вводить критерий прочности (пластичности, текучести) – некоторую функцию – гипотезу (предположение) о преимущественном влиянии на прочность материала того или иного фактора, который отвечает за возникновение опасного состояния [69].

В настоящее время существует более десятка критериев пластичности, которые реализованы в программном комплексе *Midas GTS* (табл. 2.1). Выбор модели грунта обусловлен, главным образом, имеющимися результатами

натурных испытаний инъекционных свай (см. п. 2.2), в рамках которых определялось ограниченное число параметров деформируемости (модуль упругости  $E$ ), прочности (угол внутреннего трения  $\varphi$ , удельное сцепление  $c$ ) и физических параметров (влажность  $W$ , плотность  $\rho$ , коэффициент пористости  $e$ , показатель консистенции  $I_L$ ) грунта основания. В связи с этим, в данной работе в качестве критерия пластичности (модели) грунта принимается критерий Кулона-Мора (упругопластическая модель Кулона-Мора).

Таблица 2.1 – Основные упругопластические модели грунта для моделирования глинистых грунтов в ПК *Midas GTS*

Наименование модели грунта	Особенности применения модели
Мора-Кулона ( <i>Mohr-Coulomb</i> )	Достаточно результатов испытаний грунта на прямой сдвиг
Модифицированная модель Мора-Кулона ( <i>Modified Mohr-Coulomb</i> )	Необходимы результаты трехосных испытаний грунта
Друкера-Прагера ( <i>Drucker Prager</i> )	Достаточно результатов испытаний грунта на прямой сдвиг; критерий нашел применение для моделирования дорожных покрытий и композитных материалов
Слабого грунта ( <i>Soft Soil</i> )	Дополнительно к основным параметрам прочности и деформируемости необходимы жесткость при разгрузке и повторном нагружении и параметры переуплотнения OCR и POP
Упрочняющегося грунта ( <i>Hardening Soil</i> )	Необходимы результаты трехосных испытаний грунта

Для задания параметров модели Кулона-Мора необходимы угол внутреннего трения грунта  $\varphi$  и удельное сцепление грунта  $c$ .

**Параметры материалов конечно-элементной расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт».** Для выполнения тестовых расчетов на начальном этапе в качестве основания был принят грунт, представляющий собой мягкопластичный суглинок. Физико-механические характеристики грунта следующие: удельный вес грунта  $\gamma = 19$  кН/м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ ; модуль упругости  $E = 6$  МПа; удельное сцепление  $c = 20$  кПа; угол внутреннего трения  $\varphi = 18^\circ$  (рис. 2.3).

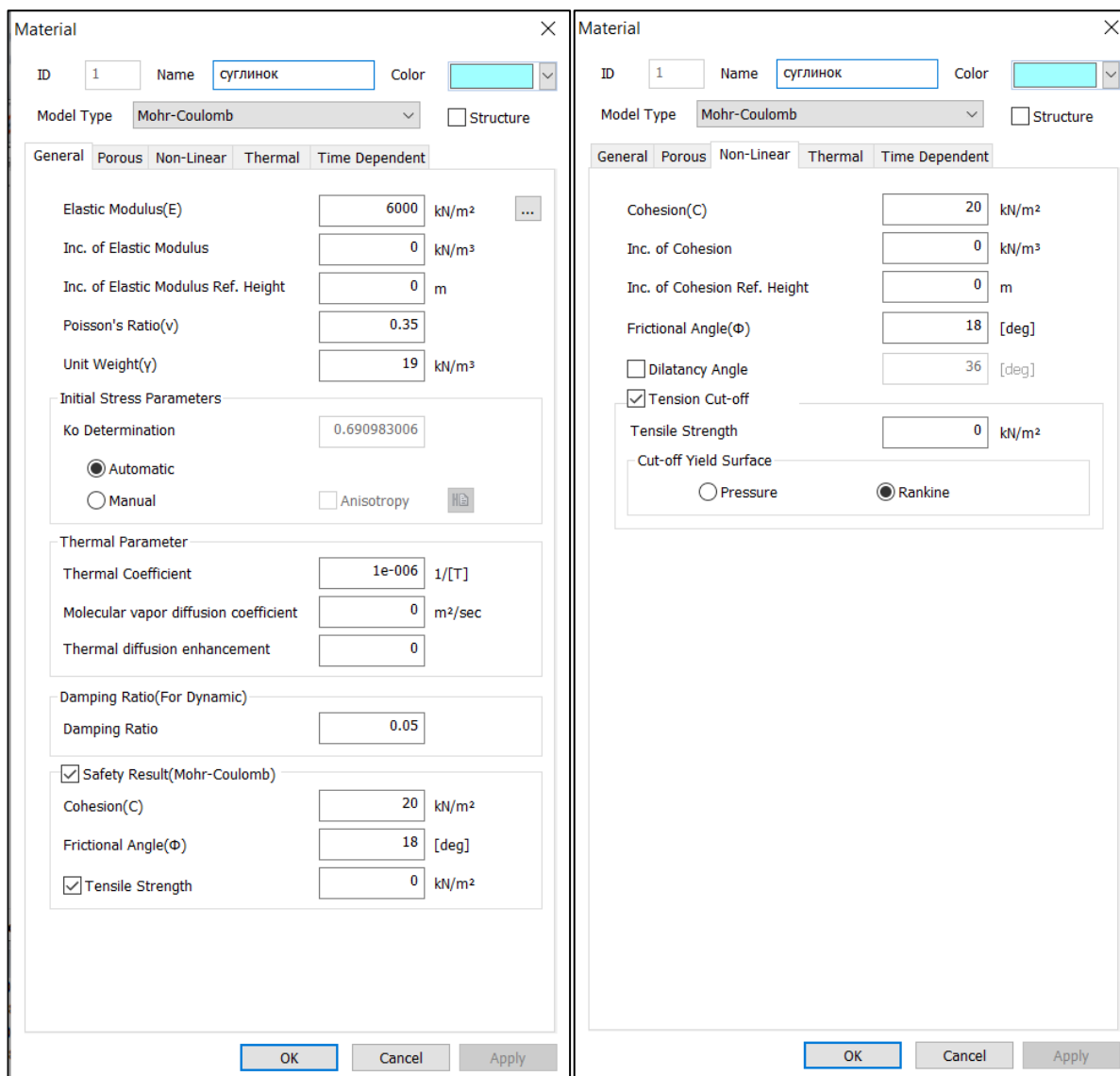


Рисунок 2.3 – Параметры материала массива грунта конечно-элементной расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт»

Вокруг боковой поверхности сваи предусматривается дополнительный массив шириной  $2d_{св}$  (от ствола), для которого, с учетом данных натурных испытаний инъекционных свай (Петухов А. А., Тарасов А. А., 2004–2006 гг.) [48, 57, 87, 88], задаются скорректированные характеристики грунта (рис. 2.4):

$$c_{упл} = K_c \cdot c; \quad (2.1)$$

$$\varphi_{упл} = K_\varphi \cdot \varphi;$$

где  $c$ ,  $\varphi$  – соответственно удельное сцепление (кПа) и угол внутреннего трения (град) глинистого грунта естественного сложения;  $K_c$ ,  $K_\varphi$  – безразмерные коэффициенты, принимаемые по табл. 2.2.

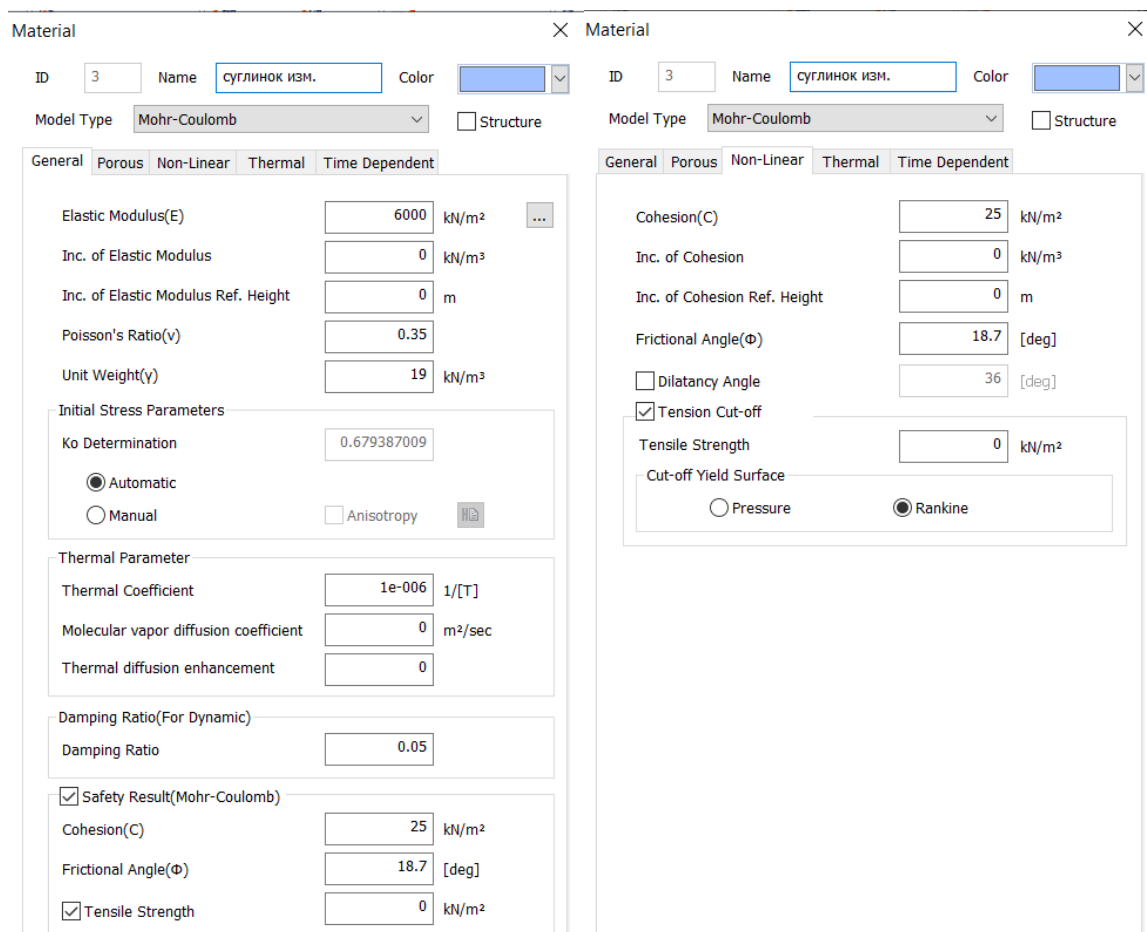


Рисунок 2.4 – Параметры материала уплотненного грунта (в пределах  $2d_{св}$  от ствола сваи) конечно-элементной расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт»

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов  $K_\phi$ ,  $K_c$  для определения прочностных характеристик уплотненных глинистых грунтов вокруг ствола инъекционных свай после их опрессовки (по данным Полищука А. И., Петухова А. А., 2007)

№ п/п	Наименование грунта	Значения безразмерных коэффициентов для определения прочностных характеристик уплотненного глинистого грунта вокруг ствола инъекционных свай после их опрессовки	
		$K_\phi$	$K_c$
1	Супесь пластичная и текучепластичная ( $I_L \geq 0$ )	1,04–1,07	1,05–1,15
2	Суглинки, глины текучепластичные и текучие ( $I_L > 0,75$ )	1,01–1,03	1,05–1,20
3	Суглинки, глины мягкопластичные и тугопластичные ( $0,25 \leq I_L \leq 0,75$ )	1,02–1,06	1,20–1,35

Примечание: 1. Значения коэффициентов  $K_c$ ,  $K_\phi$  были установлены авторами настоящей статьи на основе результатов исследований. 2. Меньшие значения коэффициентов  $K_c$ ,  $K_\phi$  принимаются для глинистых грунтов слабых (текучепластичных, текучих).

Тело сваи выполняется из мелкозернистого бетона естественного твердения класса В20. Согласно [69], для моделирования поведения подобного искусственного строительного материала с высокой жесткостью рекомендуется применять линейно-упругую модель (модель *Elastic*). Для задания параметров данной модели необходимы значения модуля упругости  $E$ , принимаемого в соответствии с классом бетона, коэффициента Пуассона  $\nu$ , объемного веса бетона  $\gamma$ . Данная модель соответствует линейному закону Гука. Физико-механические характеристики материала сваи (бетона) следующие: модуль упругости  $E = 23\,500$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,2$ ; удельный вес  $\gamma = 25$  кН/м<sup>3</sup> (рис. 2.5).

Material

ID: 2 Name: бетон В20 Color: [Yellow]

Model Type: Elastic  Structure

General Porous Thermal Time Dependent

Elastic Modulus(E): 23500000 kN/m<sup>2</sup>

Inc. of Elastic Modulus: 0 kN/m<sup>3</sup>

Inc. of Elastic Modulus Ref. Height: 0 m

Poisson's Ratio( $\nu$ ): 0.2

Unit Weight( $\gamma$ ): 25 kN/m<sup>3</sup>

Initial Stress Parameters

Ko Determination: 1

Automatic  Manual  Anisotropy

Thermal Parameter

Thermal Coefficient: 1e-006 1/[T]

Molecular vapor diffusion coefficient: 0 m<sup>2</sup>/sec

Thermal diffusion enhancement: 0

Damping Ratio(For Dynamic)

Damping Ratio: 0.05

Safety Result(Mohr-Coulomb)

Cohesion(C): 30 kN/m<sup>2</sup>

Frictional Angle( $\phi$ ): 36 [deg]

Tensile Strength: 0 kN/m<sup>2</sup>

OK Cancel Apply

Рисунок 2.5 – Параметры материала сваи конечно-элементной расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт»

**Геометрическое моделирование конечно-элементной расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт».** Графически расчетная система «инъекционная свая – глинистый грунт» представляет собой правильную четырехугольную призму, внутри которой размещено тело инъекционной сваи в форме цилиндра (рис. 2.6). Размеры цилиндра сваи задаются его высотой  $L_{\text{св}}$  и диаметром  $d_{\text{св}}$ . Размеры призмы массива грунта задаются половиной ширины основания  $r$  и высотой  $H$ . Последняя характеристика определяется по формуле, выведенной в ходе исследований, проведенных под руководством доцента Ещенко О. Ю. на кафедре «Основания и фундаменты» [16]:

$$H_{\text{min}} = L_{\text{св}} \cdot (1,5d_{\text{св}} + 1), \quad (2.2)$$

где  $H_{\text{min}}$  – рекомендуемая высота расчетного массива грунта, м;  $L_{\text{св}}$  – длина сваи, м;  $d_{\text{св}}$  – диаметр сваи, м.

Исследование по определению рекомендуемых размеров оснований призмы массива грунта  $r$  представлено ниже.

**Выбор конечных элементов и генерация сетки конечных элементов расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт».** Создание сетки конечных элементов тела сваи и массива грунта осуществляется автоматически на основе трехмерной твердотельной геометрической формы при помощи инструмента «*Mesh – Generate – 3D*». Для построения расчетной системы используется преимущественно гексаэдральная гибридная форма сетки конечных элементов (комбинированная – с использованием тетраэдров и гексаэдров). На границе с телом инъекционной сваи – в зоне наибольших напряжений – необходимо предусмотреть сгущение сетки (уменьшение размера элементов) грунтового массива (рис. 2.7). При этом, согласно п. 3.2.1 [107], рекомендуется избегать увеличения размеров прилегающих элементов более, чем в два раза.

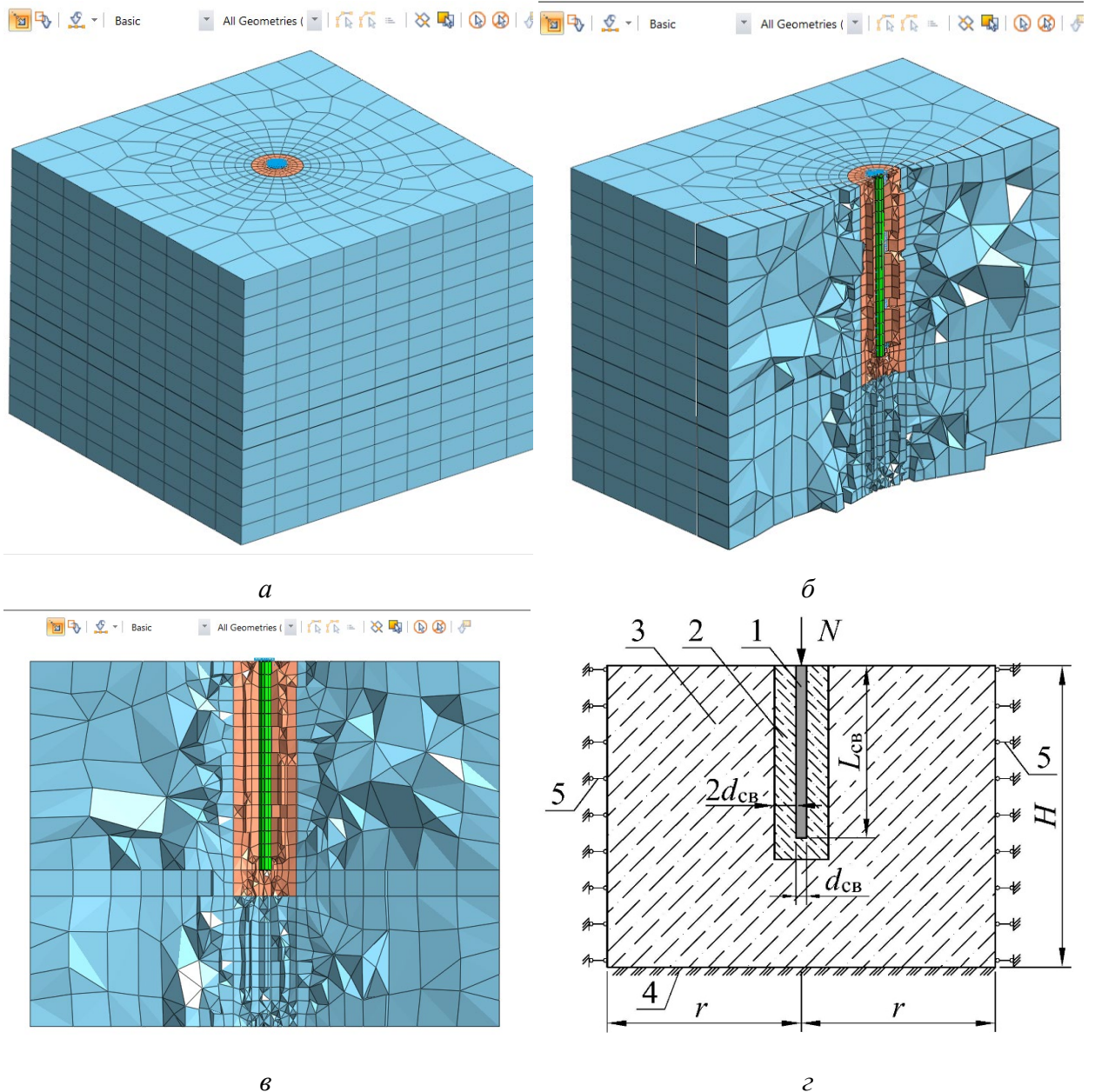


Рисунок 2.6 – Расчетная система «инъекционная свая – глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*:

*a* – общий вид расчетной системы (изометрический вид); *б* – разрез расчетной системы (изометрический вид); *в* – то же (вид сбоку); *г* – расчетная схема с обозначениями; 1 – инъекционная свая; 2 – уплотненный грунт (в пределах  $2d_{св}$  от ствола сваи); 3 – массив грунта (мягкопластичный суглинок); 4 – жесткое закрепление (исключаются все перемещения); 5 – шарнирное сопряжение (по боковой поверхности возможны вертикальные перемещения);  $L_{св}$  – длина сваи;  $d_{св}$  – диаметр сваи;  $H$  – высота массива грунта;  $r$  – половина ширины основания массива грунта

Для того, чтобы инъекционная свая и грунт работали отдельно, на боковой поверхности сваи создаются обычные интерфейсные конечные элементы (тип интерфейсного элемента – *Interface Plane*; тип модели материала интер-

фейсного элемента – *Interface*; нелинейность интерфейсного элемента – *Coulomb Friction*), необходимые для реализации проскальзывания сваи относительно грунта (рис. 2.8). В качестве критерия прочности грунта обычных интерфейсных конечных элементов принимается также модель Кулона-Мора. Параметры прочности интерфейсных элементов определяют из испытаний на сдвиг по схеме «материал – грунт» в лабораторных условиях, а также принимаются на основе калибровки по статическим испытаниям инъекционных свай до достижения сходимости графиков зависимости осадки от нагрузки.

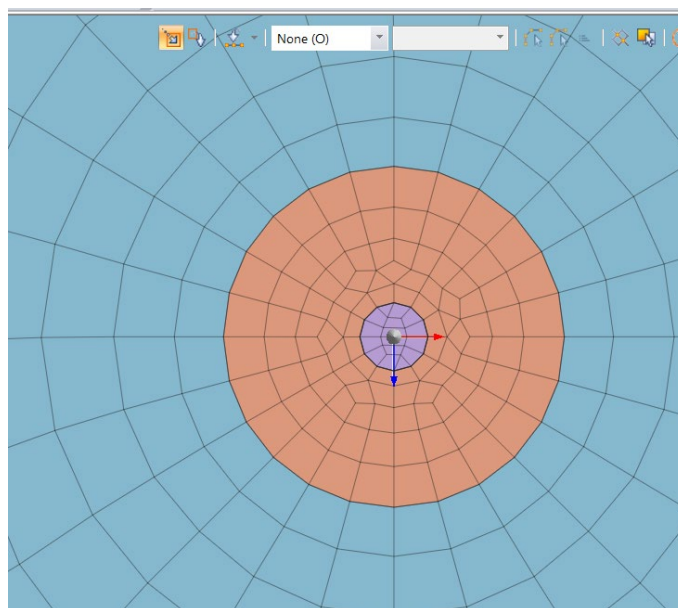


Рисунок 2.7 – Сгущение сетки конечных элементов грунтового массива на границе с телом инъекционной сваи

***Граничные условия конечно-элементной расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт».*** В рассматриваемой расчетной системе задаются кинематические граничные условия [31], которые подразумевают жесткое закрепление нижней поверхности модели и возможность вертикальных перемещений (вдоль оси  $Z$ ) по боковой поверхности (рис. 2.9, *a*). После этого прикладываются нагрузки, действующие на модель: собственный вес материалов сваи и грунта (учитывается программным комплексом автомати-

чески на основании заданных свойств материалов), равномерно распределенная нагрузка, приложенная к оголовку сваи (рис. 2.9, б). При выполнении расчета учитывается этапность (стадийность) приложения нагрузки на сваю.

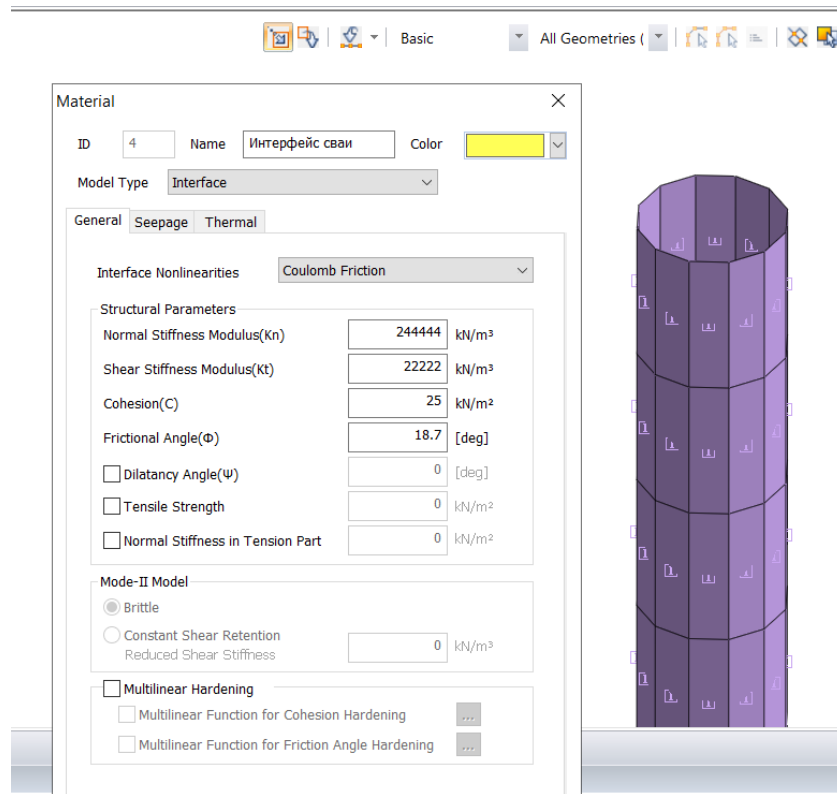


Рисунок 2.8 – Общий вид интерфейсных элементов на границе контакта инъекционной сваи с околовсвайным грунтом

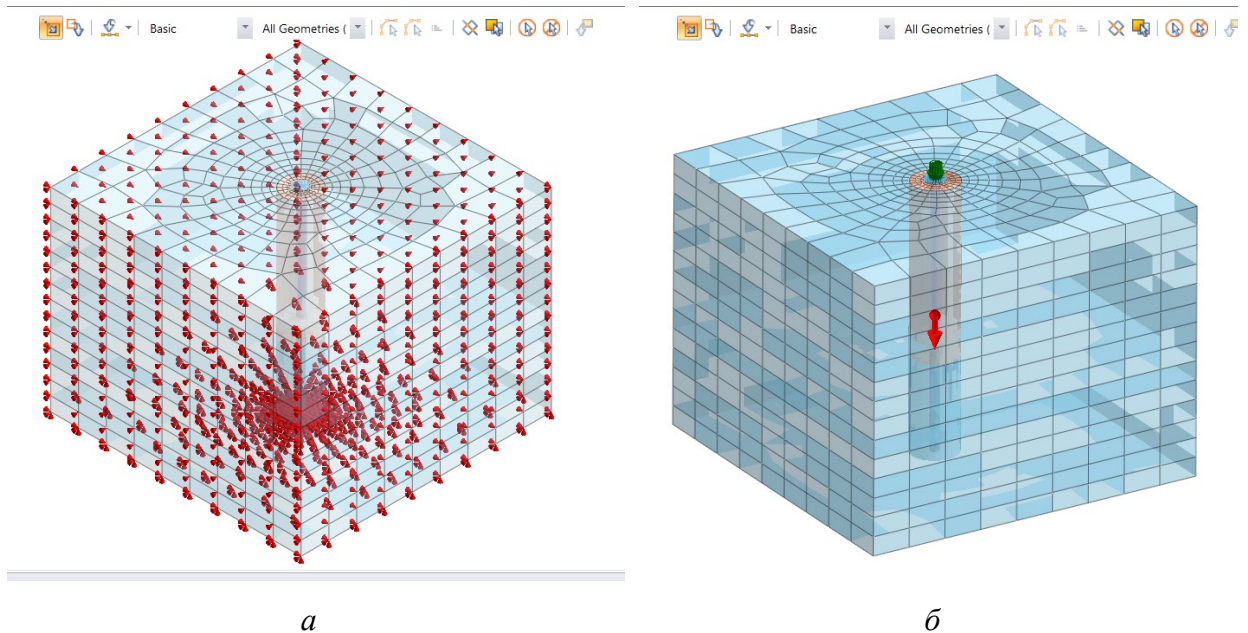


Рисунок 2.9 – Граничные условия расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*:  
 а – кинематические граничные условия; б – силовые граничные условия (собственный вес материалов и вертикальная нагрузка на сваю)

**Настройка расчета системы «инъекционная свая – глинистый грунт».** Поскольку по мере выполнения строительно-монтажных работ нагрузка на сваю передается не одновременно, расчет делится на три стадии. При помощи инструмента «*Analysis Case*» создается расчетный файл, в котором указывается тип расчета («*Construction Stage*») и вводятся параметры, учитывающие все стадии расчета, число итераций (приближений) и критерии сходимости. На первой стадии (рис. 2.10) производится расчет однородного массива грунта (и тело сваи, и грунтовой массив обладают свойствами грунта) с заданным собственным весом и граничными условиями, в результате которого определяются собственные напряжения грунта без учета перемещений («*Clear Displacement*»). На второй стадии (рис. 2.11) цилиндру внутри массива грунта присваиваются свойства бетона и околосвайному массиву грунта ( $2d_{\text{св}}$  от ствола сваи) свойства грунта со скорректированными прочностными характеристиками. Учитываются интерфейсные элементы на боковой поверхности сваи, перемещения не учитываются («*Clear Displacement*»). На третьей стадии (рис. 2.12) прикладывается вертикальная нагрузка на оголовок сваи с шагом нагружения 0,1 (10% от заданной нагрузки).

По окончании создания модели и ввода всех необходимых параметров программным комплексом производится расчет.

**Обоснование рациональных размеров расчетной системы.** Под оптимальными размерами расчетной системы понимаются такие значения половины ширины основания  $r$  и высоты  $H$  расчетного массива грунта, при которых его влияние на расчетные осадки сваи при действии вертикальной нагрузки сводилось бы к минимуму, а количество элементов решетки, влияющее на время расчета, не было завышено. Исследование влияния высоты  $H$  расчетной системы на перемещения одиночной инъекционной сваи было проведено ранее на кафедре «Основания и фундаменты» под руководством доцента Ещенко О. Ю. [16], поэтому на данном этапе работы будет рассмотрено исследование влияния половины ширины основания  $r$  расчетной системы на перемещения одиночной инъекционной сваи при действии вертикальной нагрузки.

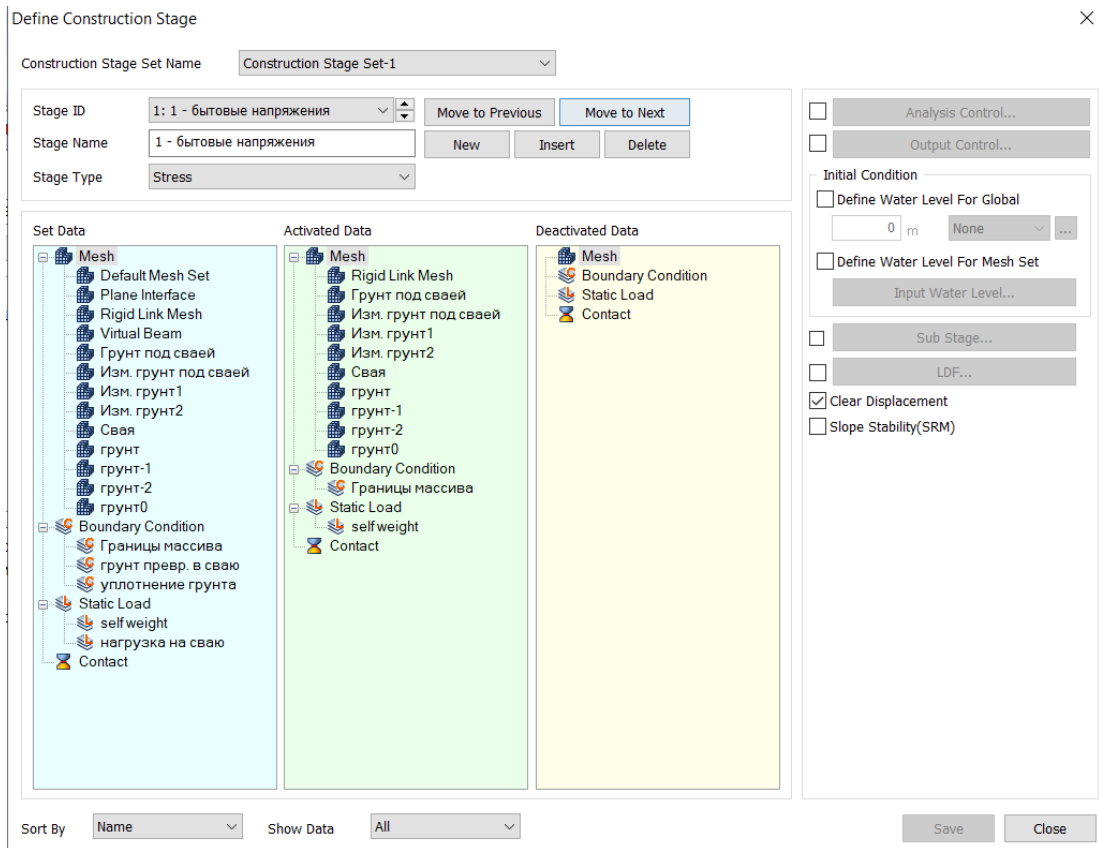


Рисунок 2.10 – Первая стадия (определение бытовых напряжений в грунте основания) расчета системы «инъекционная свая – глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*

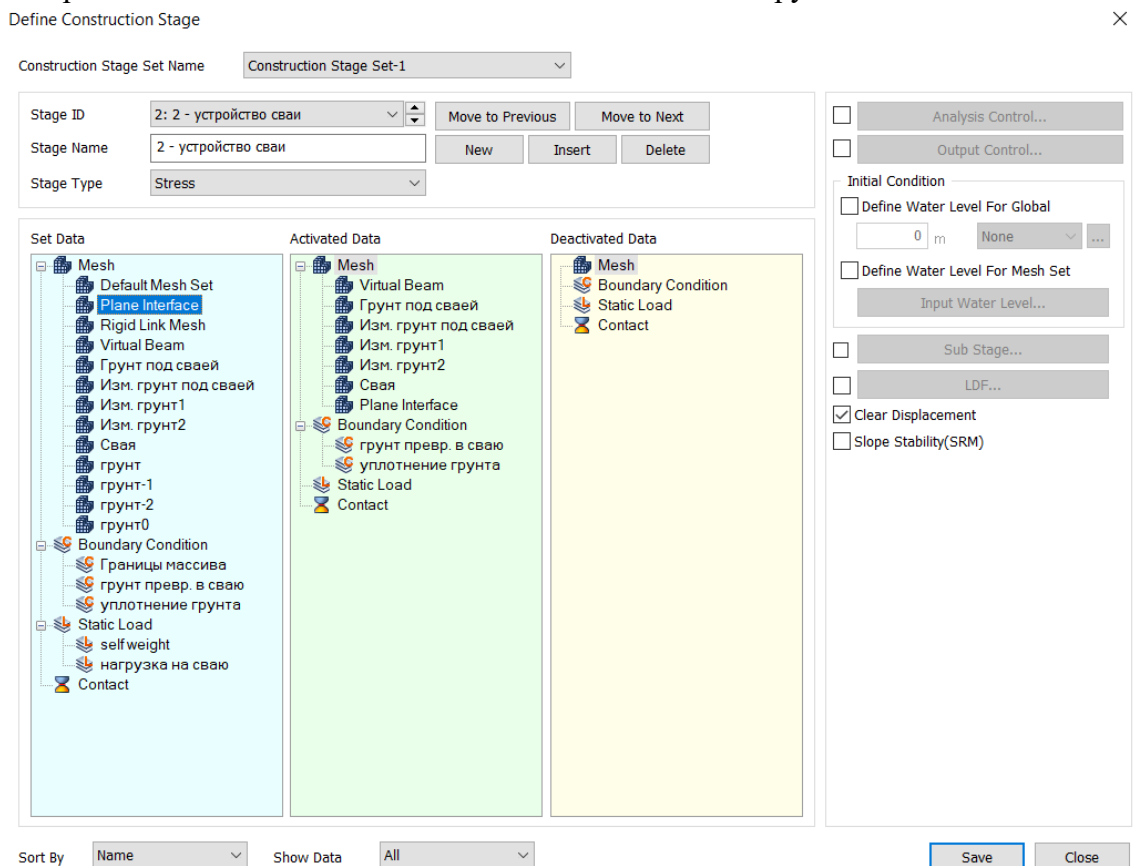


Рисунок 2.11 – Вторая стадия (устройство инъекционной сваи) расчета системы «инъекционная свая – глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*

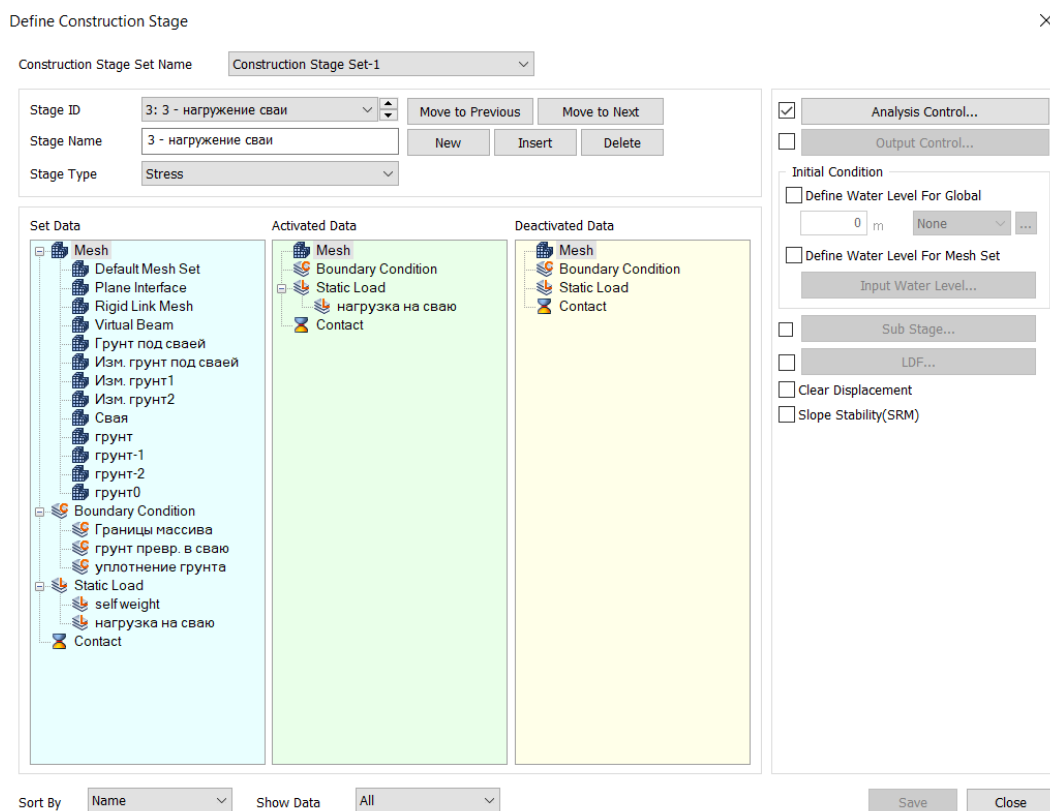


Рисунок 2.12 – Третья стадия (передача вертикальной нагрузки на инъекционную сваю) расчета системы «инъекционная свая – глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*

Исходные данные для материала грунта и материала сваи, а также порядок создания конечно-элементной расчетной системы приведены выше.

В ходе исследования были проведены серии расчетов одиночных инъекционных свай длиной 3 м и диаметрами 250, 300 и 350 мм, находящиеся в расчетном массиве однородного глинистого грунта. Высота расчетной системы принималась  $H = 3L_{св} = 9$  м (принята в целях исключения влияния высоты расчетной системы на осадку сваи), где  $L_{св}$  – длина сваи. Половина ширины основания расчетной системы принимались  $r = 5d_{св}$ ,  $r = 10d_{св}$ ,  $r = 15d_{св}$ ,  $r = 20d_{св}$ , где  $d_{св}$  – диаметр сваи. Численные значения конечных осадок принимались на этапе срыва инъекционной сваи (значительное изменение осадки сваи при малом изменении нагрузки, прикладываемой к ней).

На рис. 2.13 представлен график зависимости осадки  $S$  одиночной инъекционной сваи при действии вертикальной нагрузки от половины ширины основания расчетной системы  $r$ , составленный в соответствии с результатами проведенных расчетов.

Согласно полученному графику (рис. 2.13) на участках кривых 1, 2 и 3 с параметром  $r$  от  $5d_{св}$  до  $10d_{св}$  наблюдается существенное изменение осадки сваи, что говорит о значительном влиянии исследуемого параметра  $r$  на перемещения инъекционной сваи. На участке от  $10d_{св}$  до  $20d_{св}$  кривые выполаживаются – влияние параметра  $r$  на осадку сваи снижается. Через точки кривых, в которых относительное приращение перемещений сваи не превышает 1–2%, проведем прямую 4. При помощи канонического уравнения прямой на плоскости выведена формула (2.3) для определения рационального параметра половины ширины основания расчетной системы:

$$r = 7,5d_{св} + 2,625, \quad (2.3)$$

где  $r$  – рациональный размер половины ширины основания расчетного массива грунта, м;  $d_{св}$  – диаметр одиночной инъекционной сваи, м.

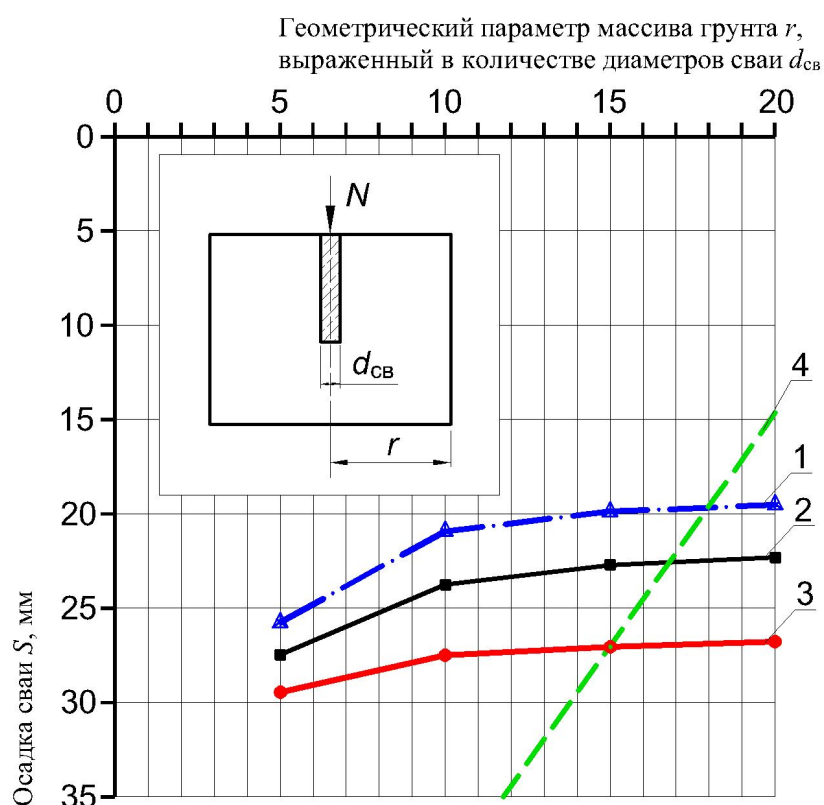


Рисунок 2.13 – Обоснование размеров расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт». График зависимости осадки одиночной инъекционной сваи  $S$  от половина ширины основания расчетной системы  $r$  при диаметре сваи  $d_{св}$ : 1 – 250 мм; 2 – 300 мм; 3 – 350 мм; 4 – прямая, проведенная через точки выполаживания кривых

Таким образом, формулы (2.2) и (2.3) позволяют определить оптимальные размеры конечно-элементной расчетной системы «инъекционная свая – глинистый грунт», при которых их влияние на перемещения одиночной инъекционной сваи будет минимальным.

### **2.2.2. Методика исследований (моделирования) работы фундаментов мелкого заложения, усиленного инъекционными сваями**

*Модель грунта для расчетной системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт».* Модель грунта (упругопластическая модель Кулона-Мора) принимается в соответствии с данными, представленными по расчетной системе «инъекционная свая – глинистый грунт» (см. п. 2.2.1).

*Параметры материалов конечно-элементной расчетной системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт».* Для выполнения тестовых расчетов на начальном этапе в качестве основания был принят грунт, представляющий собой мягкопластичный суглинок. Физико-механические характеристики грунта следующие: удельный вес грунта  $\gamma = 19$  кН/м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ ; модуль упругости  $E = 10$  МПа; удельное сцепление  $c = 20$  кПа; угол внутреннего трения  $\varphi = 18^\circ$  (рис. 2.14).

Аналогично данным п. 2.2.1, вокруг боковой поверхности свай предусматривается дополнительный массив шириной  $2d_{св}$  (от ствола), для которого задаются скорректированные характеристики грунта (рис. 2.15) с учетом формул (2.1).

Тело существующего отдельного фундамента и свай выполнялось из бетона класса В20. В качестве модели материала бетона (искусственный строительный материал с высокой жесткостью) принята линейно-упругая модель (модель *Elastic*). Физико-механические характеристики материала сваи (бетона) следующие: модуль упругости  $E = 23\ 500$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,2$ ; удельный вес  $\gamma = 25$  кН/м<sup>3</sup> (рис. 2.5).

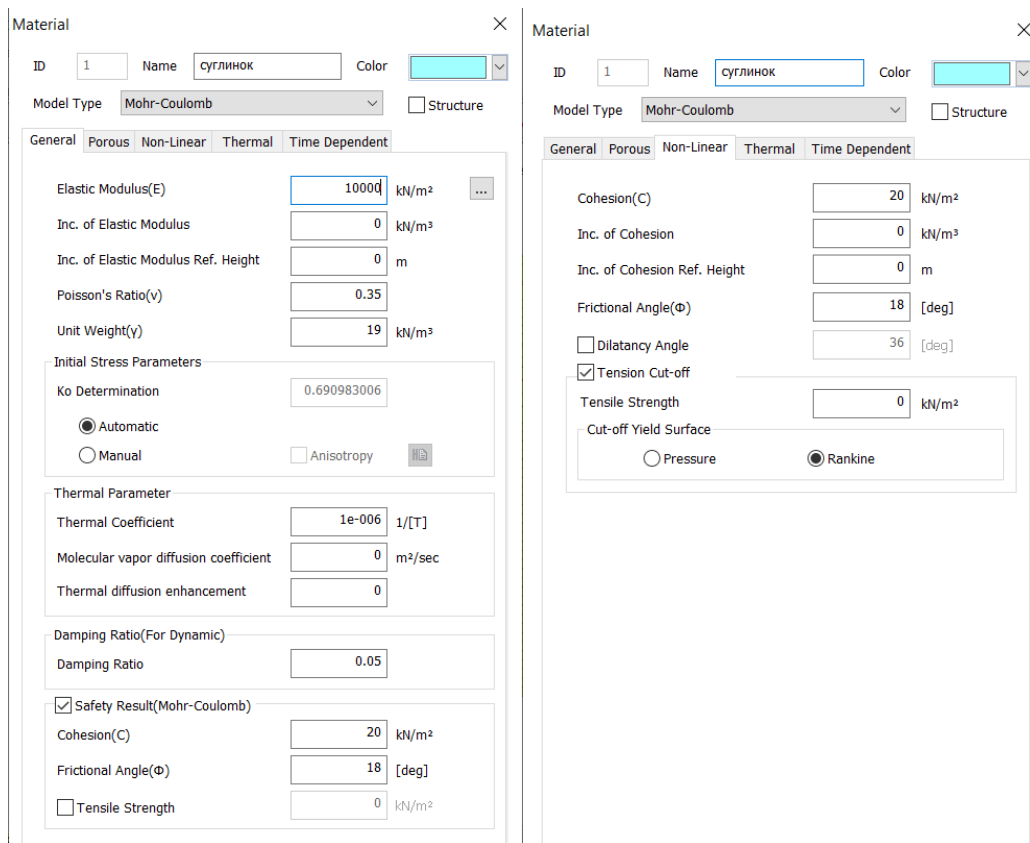


Рисунок 2.14 – Параметры материала массива грунта конечно-элементной расчетной системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт»

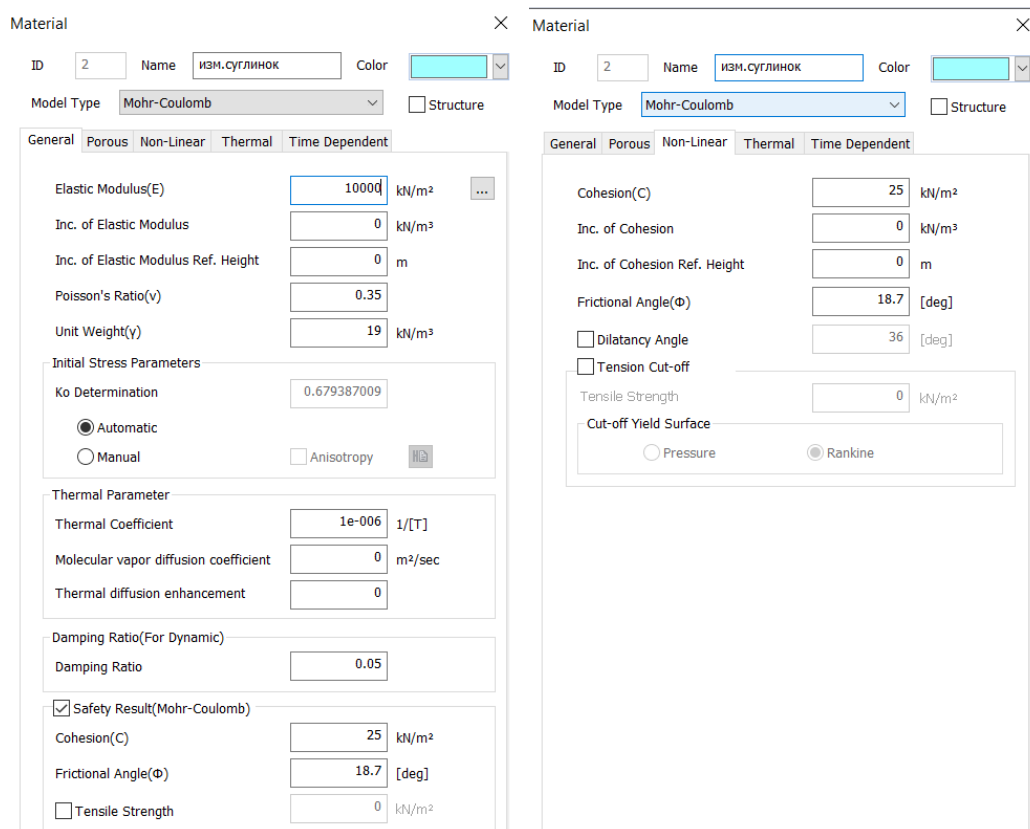


Рисунок 2.15 – Параметры материала уплотненного грунта (в пределах  $2d_{св}$  от стволов свай) конечно-элементной расчетной системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт»

**Геометрическое моделирование конечно-элементной расчетной системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт».** Графически расчетная система «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» представляет собой массив грунта в виде правильной четырехугольной призмы, в центре верхней части которой размещено тело отдельного фундамента, усиливаемого четырьмя инъекционными сваями (рис. 2.16). Размеры призмы определялись в соответствии с результатами выполненных тестовых расчетов и рекомендациями разработчиков программного комплекса *Midas GTS*. Графически инъекционные сваи задавались объемными элементами (цилиндрами; см. п. 2.2.1) длиной  $L_{св}$  (3,0; 6,0; 9,0 и 12,0 м) и диаметром  $d_{св} = 250$  мм. Глубина заложения фундамента  $d_f$  принималась равной 1 м, ширина подошвы отдельного фундамента  $b_f$  – 1; 1,5 и 2 м.

**Выбор конечных элементов и генерация сетки конечных элементов расчетной системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт».** Создание сетки конечных элементов расчетной системы осуществляется автоматически на основе трехмерной твердотельной геометрической формы при помощи инструмента «*Mesh – Generate – 3D*». Для построения расчетной системы используется преимущественно гексаэдральная гибридная форма сетки конечных элементов (комбинированная – с использованием тетраэдров и гексаэдров). На границе с телом отдельного фундамента и инъекционных свай – в зоне наибольших напряжений – необходимо предусмотреть сгущение сетки (уменьшение размера элементов) грунтового массива (рис. 2.17). При этом, согласно п. 3.2.1 [107], рекомендуется избегать увеличения размеров прилегающих элементов более, чем в два раза.

На боковой поверхности инъекционных свай (аналогично расчетной системе «инъекционная свая – глинистый грунт» в п. 2.2.1) создаются обычные интерфейсные конечные элементы (тип интерфейсного элемента – *Interface Plane*; тип модели материала интерфейсного элемента – *Interface*; нелинейность интерфейсного элемента – *Coulomb Friction*), необходимые для реализации проскальзывания свай относительно грунта (рис. 2.8).



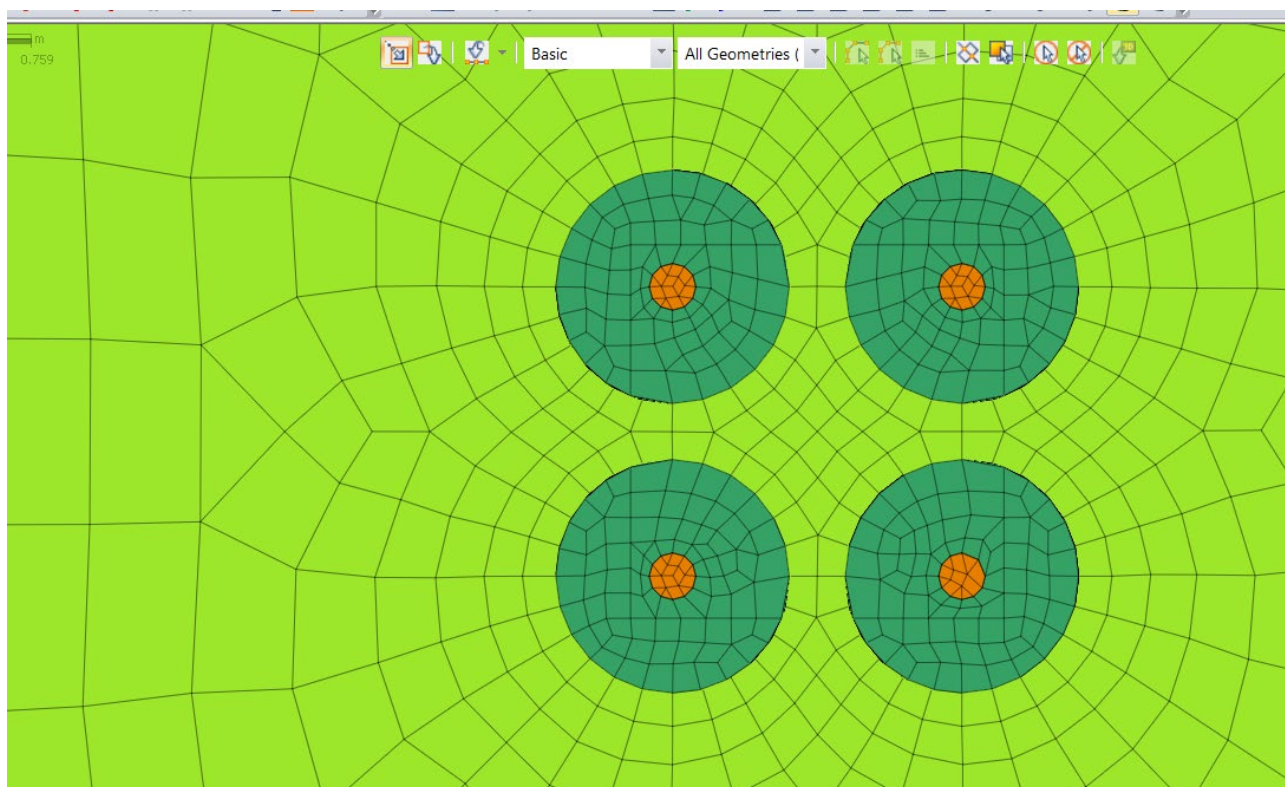


Рисунок 2.17 – Сгущение сетки конечных элементов грунтового массива на границе с телом инъекционных свай

***Граничные условия конечно-элементной расчетной системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт».*** В рассматриваемой конечно-элементной расчетной системе задаются следующие кинематические граничные условия (аналогично системе «инъекционная свая – глинистый грунт» в п. 2.2.1): в нижнем основании призмы расчетной системы исключаются все перемещения, по боковой поверхности возможны вертикальные перемещения вдоль оси  $Z$  (рис. 2.18, *a*). Силовые граничные условия учитываются в виде прикладываемой к подколоннику равномерно распределенной нагрузки, а также собственного веса задаваемых материалов расчетной системы (рис. 2.18, *б*). При выполнении расчета учитывается этапность (стадийность) приложения нагрузки на подколонник.

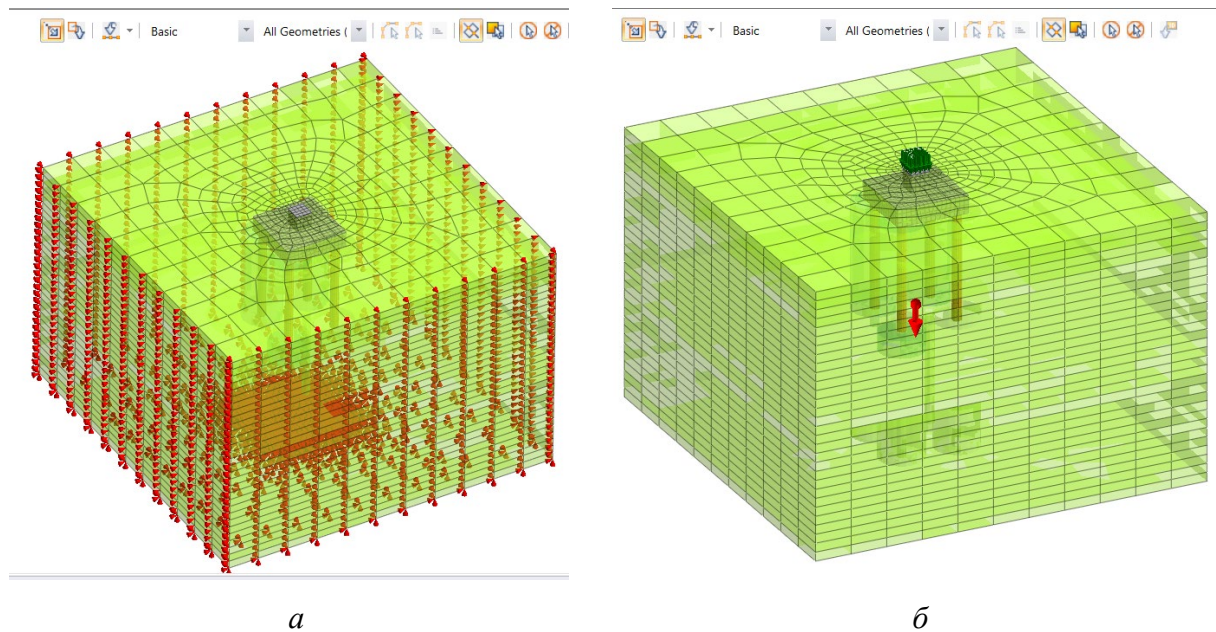


Рисунок 2.18 – Граничные условия расчетной системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*:  
*а* – кинематические граничные условия; *б* – силовые граничные условия (собственный вес материалов и вертикальная нагрузка на подколонник)

**Настройка расчета системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт».** Поскольку по мере выполнения строительного-монтажных работ (в том числе увеличение вертикальной нагрузки на отдельный фундамент мелкого заложения после реконструкции) нагрузка на сваю передается не одновременно, расчет делится на четыре стадии. При помощи инструмента «*Analysis Case*» создается расчетный файл, в котором указывается тип расчета («*Construction Stage*») и вводятся параметры, учитывающие все стадии расчета, число итераций (приближений) и критерии сходимости. На первой стадии (рис. 2.19) производится расчет однородного массива грунта (отдельный фундамент, инъекционные сваи и грунтовой массив обладают свойствами грунта) с заданным собственным весом и граничными условиями, в результате которого определяются собственные напряжения грунта без учета перемещений («*Clear Displacement*»). На второй стадии (рис. 2.20) – работа фундамента до реконструкции – отдельному фундаменту мелкого заложения внутри массива грунта присваиваются свойства бетона и прикладывается вертикальная нагрузка  $N_1 = R/A$  ( $R$  – расчетное сопротивление грунта основания фундамента

мелкого заложения, кПа;  $A$  – площадь подошвы фундамента, м<sup>2</sup>) на верхнюю грань подколонника; перемещения не учитываются («*Clear Displacement*»). На третьей стадии (рис. 2.21) – усиление отдельного фундамента инъекционными сваями – цилиндрам внутри массива грунта присваиваются свойства бетона и околосвайному массиву грунта ( $2d_{св}$  от стволов свай) свойства грунта со скорректированными прочностными характеристиками. Учитываются интерфейсные элементы на боковой поверхности свай, перемещения не учитываются («*Clear Displacement*»). На четвертой стадии (рис. 2.22) – работа усиленного фундамента после реконструкции – прикладывается увеличенная вертикальная нагрузка  $N_2 > R/A$  ( $R$  – расчетное сопротивление грунта основания фундамента мелкого заложения, кПа;  $A$  – площадь подошвы фундамента, м<sup>2</sup>) на подколонник с шагом нагружения 0,1 (10% от заданной нагрузки).

По окончании создания модели и ввода всех необходимых параметров программным комплексом производится расчет.

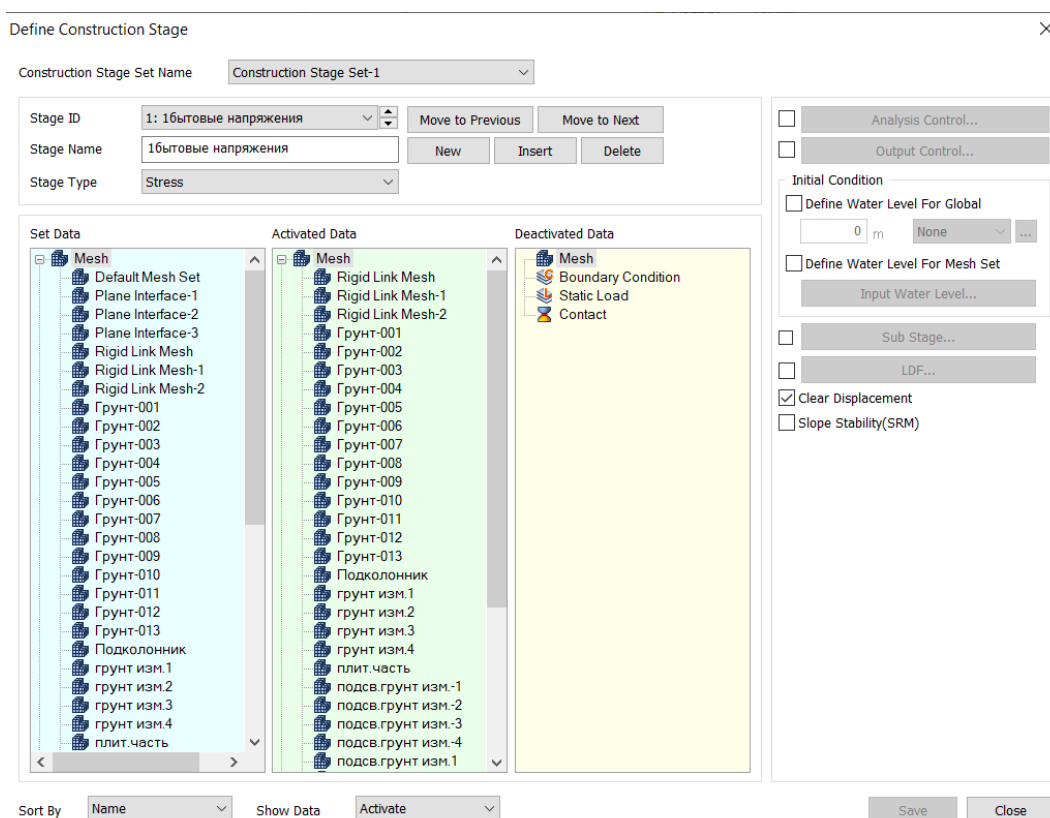


Рисунок 2.19 – Первая стадия (определение бытовых напряжений в грунте основания) расчета системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*

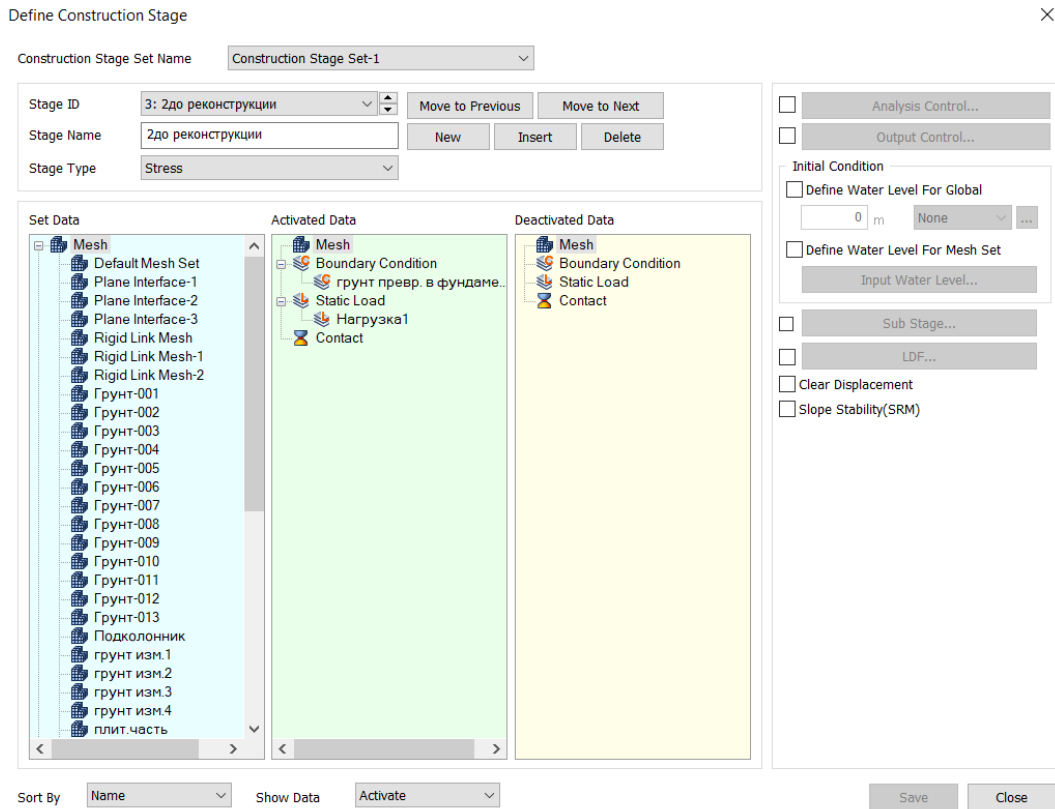


Рисунок 2.20 – Вторая стадия (работа отдельного фундамента до реконструкции) расчета системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*

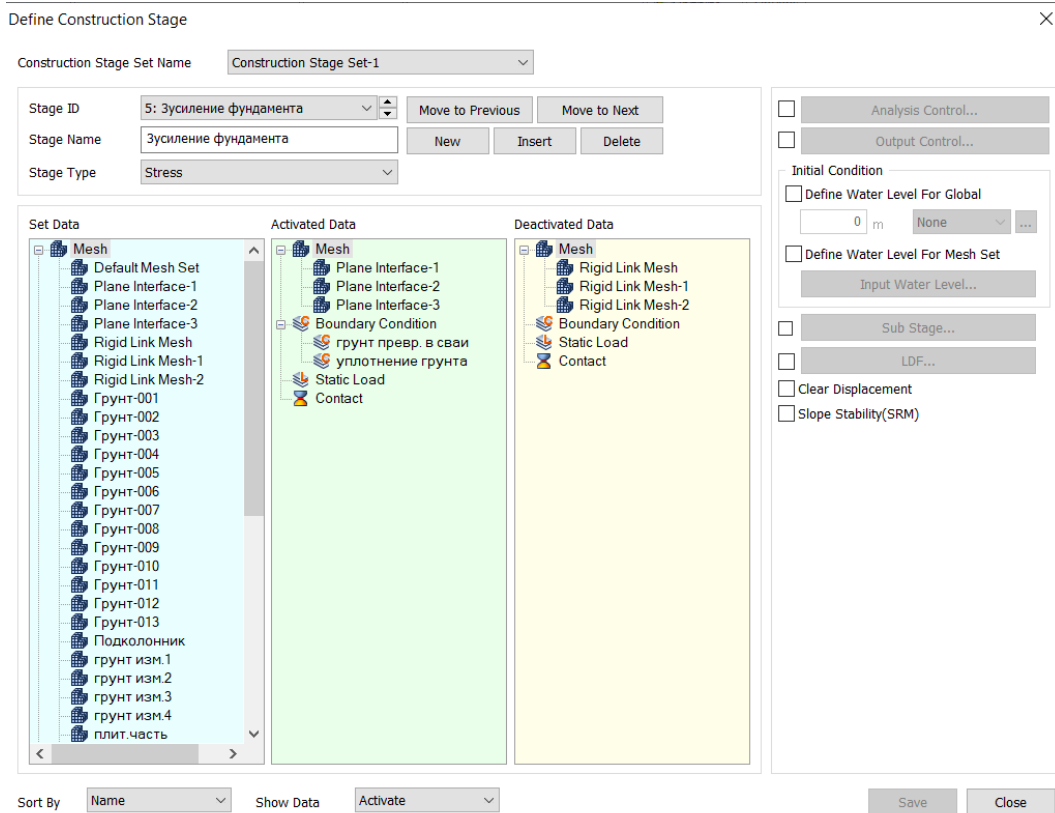


Рисунок 2.21 – Третья стадия (усиление отдельного фундамента инъекционными сваями) расчета системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*

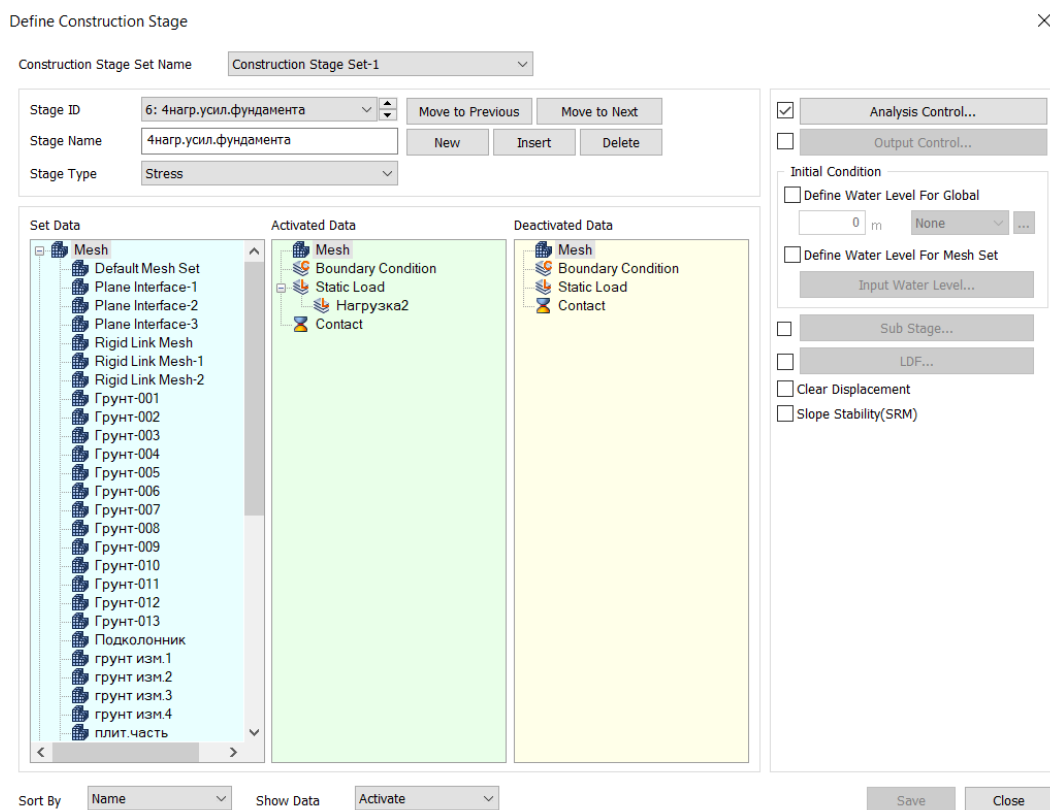


Рисунок 2.22 – Четвертая стадия (работа усиливаемого фундамента после реконструкции) расчета системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*

### 2.3. Результаты численного моделирования работы одиночной инъекционной сваи и отдельного усиливаемого фундамента в глинистом грунте при их нагружении

В соответствии с алгоритмом, представленным в п. 2.2.1, при помощи программного комплекса *Midas GTS* произведен расчет осадки одиночной инъекционной сваи длиной  $L_{св} = 4$  м и диаметром  $d_{св} = 0,25$  м в суглинке мягкопластичном со следующими физико-механическими характеристиками грунта: удельный вес грунта  $\gamma = 19$  кН/м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ ; модуль упругости  $E = 6$  МПа; удельное сцепление  $c = 20$  кПа; угол внутреннего трения  $\varphi = 18^\circ$ . Вертикальная нагрузка на сваю составила  $N = 300$  кН. Графические результаты расчета представлены на рис. 2.23–2.25.

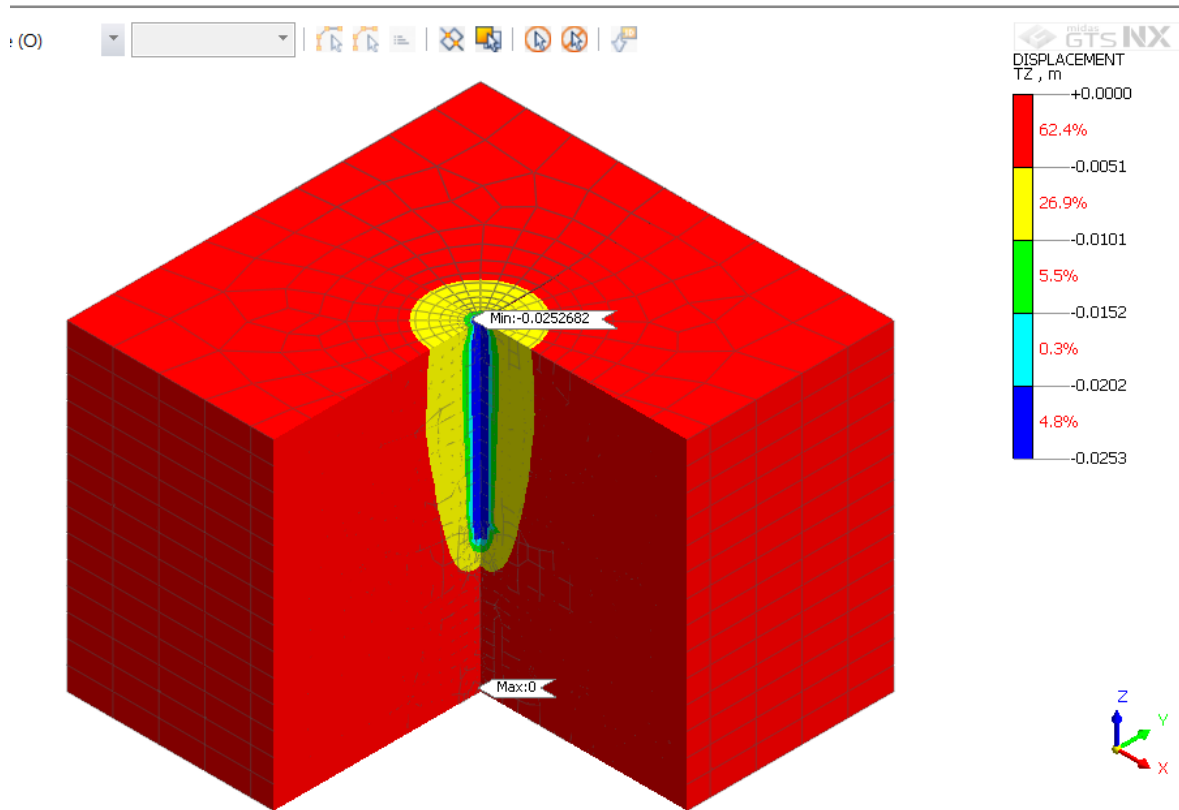


Рисунок 2.23 – Изополя вертикальных перемещений (осадок) одиночной инъекционной сваи в глинистом грунте по результатам расчета в ПК *Midas GTS*. Осадка сваи при вертикальной нагрузке  $N = 300$  кН составила 25,3 мм

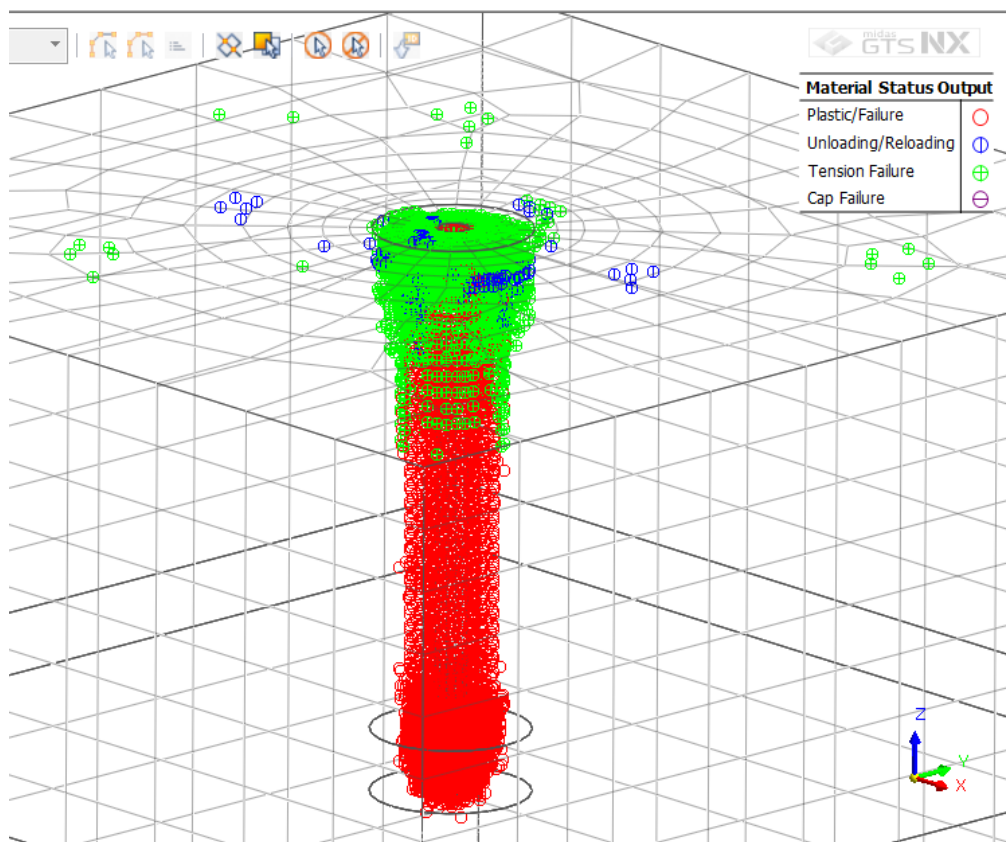


Рисунок 2.24 – Формирование зон пластических деформаций в околосвайном массиве глинистого грунта по результатам расчета в ПК *Midas GTS*

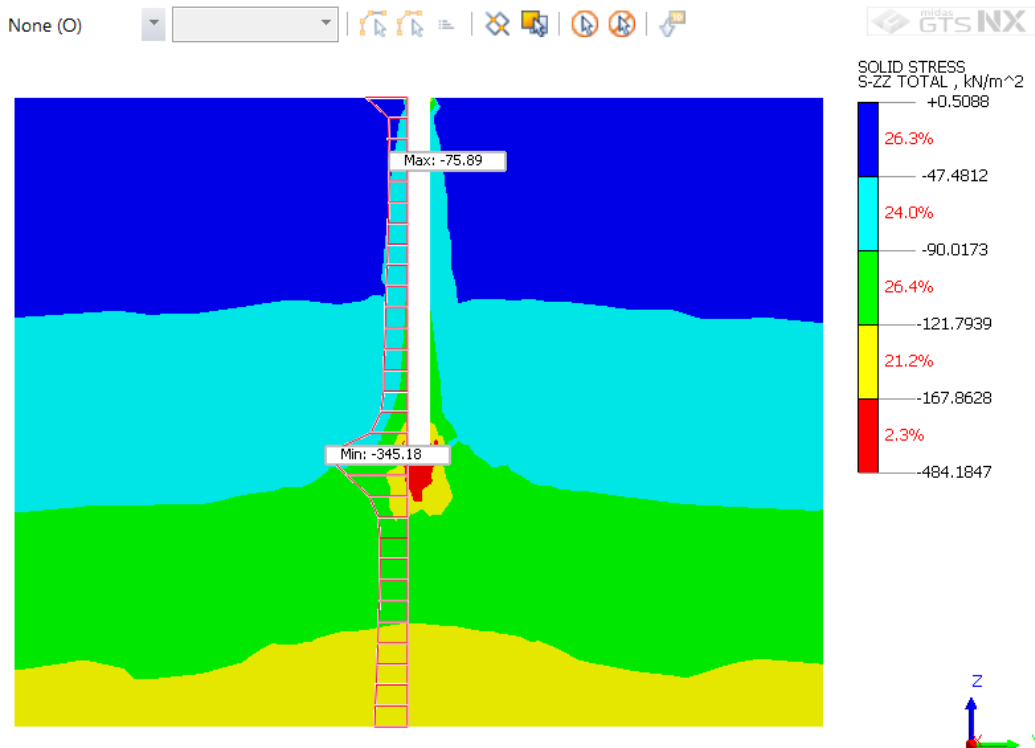


Рисунок 2.25 – Изополя общих (полных) напряжений относительно оси  $Z$  (вертикальных) в околосвайном массиве глинистого грунта по результатам расчета в ПК *Midas GTS*

При обосновании рациональных размеров расчетной системы (см. 2.2.1) выполнены расчеты осадок сваи диаметром  $d_{св} = 250$  мм и длиной  $L_{св} = 3$  м при различных размерах расчетной системы  $R$  (принимались  $5d_{св}$ ,  $10d_{св}$ ,  $15d_{св}$ ,  $20d_{св}$ ) и одной высоте  $H$  расчетного массива грунта. Результаты расчета приведены в таблицах 2.3, 2.4, 2.5, 2.6. На рис. 2.26 представлены графики зависимости осадки одиночной инъекционной сваи  $S$  от приложенной внешней нагрузки  $N$  при различных значениях геометрического параметра массива грунта  $R$ , составленные в соответствии с результатами расчетов в ПК *Midas GTS*.

Таблица 2.3 – Результаты расчета осадки сваи диаметром  $d_{св} = 250$  мм при геометрическом параметре массива грунта  $R = 5d_{св}$  (1250 мм):  $n$  – шаг нагружения;  $N$  – нагрузка, кН;  $S$  – осадка сваи, мм

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$N$	24.5	49	73.5	98	122.5	147	171.5	196	220.5	245	269.5	284.2
$S$	1.51	3.02	4.55	6.16	8.03	10.2	12.6	15.2	18	20.9	24	25.9

Таблица 2.4 – Результаты расчета осадки сваи диаметром  $d_{св} = 250$  мм при геометрическом параметре массива грунта  $R = 10d_{св}$  (2500 мм):  $n$  – шаг нагружения;  $N$  – нагрузка, кН;  $S$  – осадка сваи, мм

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$N$	24.5	49	73.5	98	122.5	147	171.5	196	220.5	245	269.5	284.2
$S$	0.68	1.35	2.04	2.85	4.11	5.72	7.7	10	12.7	15.7	19	21.1

Таблица 2.5 – Результаты расчета осадки сваи диаметром  $d_{св} = 250$  мм при геометрическом параметре массива грунта  $R = 15d_{св}$  (3750 мм):  $n$  – шаг нагружения;  $N$  – нагрузка, кН;  $S$  – осадка сваи, мм

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$N$	24.5	49	73.5	98	122.5	147	171.5	196	220.5	245	269.5	284.2
$S$	0.56	1.12	1.69	2.37	3.5	4.99	6.84	9.07	11.7	14.7	18	20.1

Таблица 2.6 – Результаты расчета осадки сваи диаметром  $d_{св} = 250$  мм при геометрическом параметре массива грунта  $R = 20d_{св}$  (5000 мм):  $n$  – шаг нагружения;  $N$  – нагрузка, кН;  $S$  – осадка сваи, мм

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$N$	24.5	49	73.5	98	122.5	147	171.5	196	220.5	245	269.5	284.2
$S$	0.56	1.12	1.69	2.37	3.5	4.99	6.84	9.07	11.7	14.7	18	20.1

На графиках рис. 2.26 при нагрузках от 0 до 100 кН наблюдается прямолинейный участок графика, что указывает на линейную зависимость осадки сваи от приложенной внешней нагрузки в соответствии с законом Гука. Данная тенденция присутствует и при выполнении натуральных испытаний инъекционных свай. После достижения нагрузки 100 кН начинают проявляться нелинейные (пластические) деформации (рис. 2.24), развивающиеся вплоть до достижения сваями этапа срыва (значительное изменение осадки сваи при малом изменении внешней нагрузки, прикладываемой к ней). Формирование нелинейных деформаций характерно для натуральных исследований свай. Из выше-

указанного следует вывод о том, что качественный характер изменения деформаций, приведенный на графиках (рис. 2.26), которые построены по результатам расчета в ПК *Midas GTS*, схож с характером развития осадок сваи при натуральных наблюдениях. Данная предпосылка позволяет говорить о возможности рассмотрения применимости разработанной расчетной системы для дальнейших исследований.

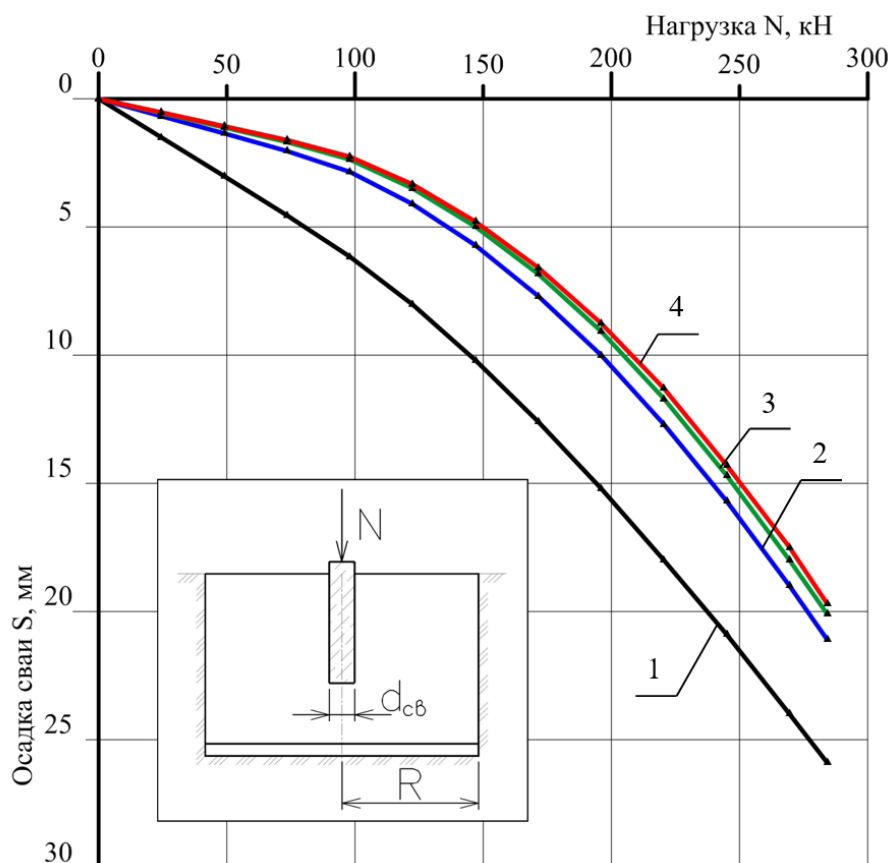


Рисунок 2.26 – Графики зависимости осадки одиночной инъекционной сваи  $S$  диаметром  $d_{св} = 250$  мм от приложенной нагрузки  $N$  при геометрическом параметре массива грунта  $R$ :  
 1 –  $5d_{св}$  (1250 мм); 2 –  $10d_{св}$  (2500 мм); 3 –  $15d_{св}$  (3750 мм); 4 –  $20d_{св}$  (5000 мм)

В соответствии с алгоритмом, представленным в п. 2.2.2, при помощи программного комплекса *Midas GTS* произведен расчет осадки отдельного фундамента мелкого заложения, усиливаемого инъекционными сваями, со следующими геометрическими размерами конструктивных элементов: ширина плитной части фундамента  $b_{ф} = 2$  м; глубина заложения подошвы фундамента  $d_f = 1$  м; длина инъекционных свай  $L_{св} = 3,0$  м; диаметр инъекционных свай  $d_{св} = 250$  мм. Вертикальная нагрузка на подколонник отдельного фундамента до усиления инъекционными сваями (до реконструкции) составила

$N_1 = 840$  кН; вертикальная нагрузка на подколонтник отдельного фундамента после усиления инъекционными сваями (после реконструкции) –  $N_2 = 1200$  кН. Физико-механические характеристики грунта основания следующие: удельный вес грунта  $\gamma = 19$  кН/м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ ; модуль упругости  $E = 10$  МПа; удельное сцепление  $c = 20$  кПа; угол внутреннего трения  $\phi = 18^\circ$ . Графические результаты расчета представлены на рис. 2.27–2.29.

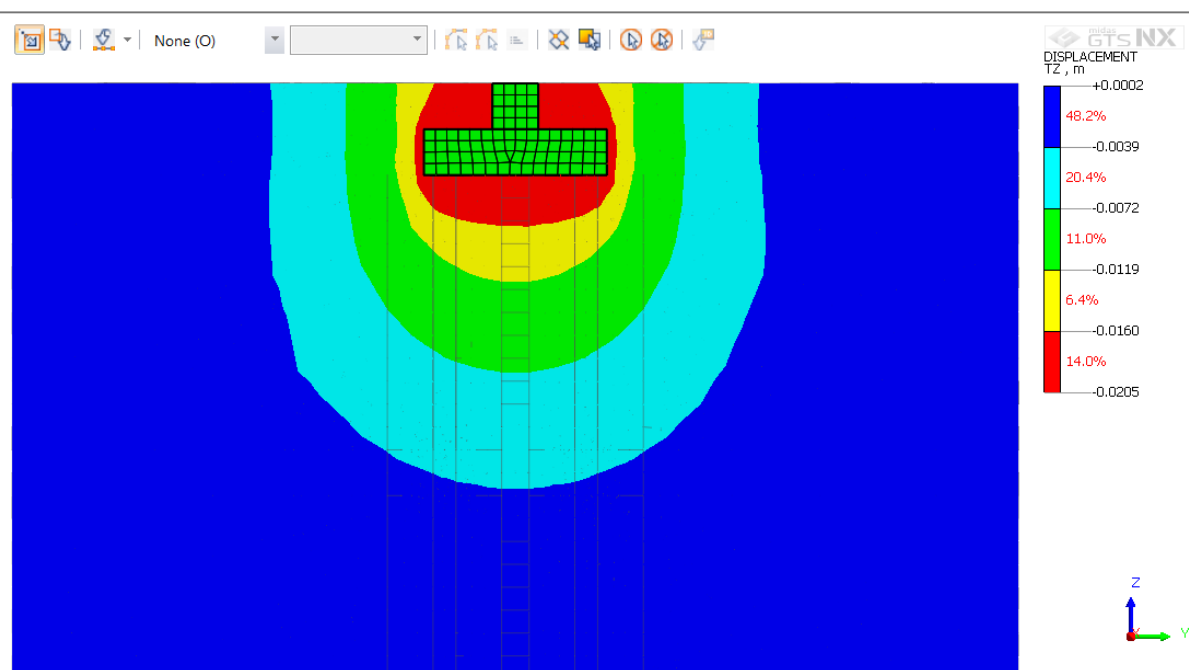


Рисунок 2.27 – Изополя вертикальных перемещений (осадок) фундамента мелкого заложения до его усиления инъекционными сваями (до реконструкции) в глинистом грунте по результатам расчета в ПК *Midas GTS*. Осадка фундамента при вертикальной нагрузке  $N_1 = 840$  кН составила 20,5 мм

#### 2.4. Сопоставление результатов численных исследований работы свай с экспериментальными данными

Обоснование возможности применения ПК *Midas GTS* для моделирования работы инъекционных свай выполнено при помощи конечно-элементных систем «инъекционная свая – глинистый грунт». При этом были использованы данные инженерно-геологических изысканий площадок и геометрических параметров натуральных свай, представленных в главе 1. В соответствии с алгоритмом п. 2.2.1 произведены расчеты по определению вертикальных перемещений (осадок) свай. На рис. 2.30, 2.31 приведено сопоставление результатов численных расчетов в ПК *Midas GTS* с данными наблюдений за натурными вертикально нагруженными одиночными инъекционными сваями.

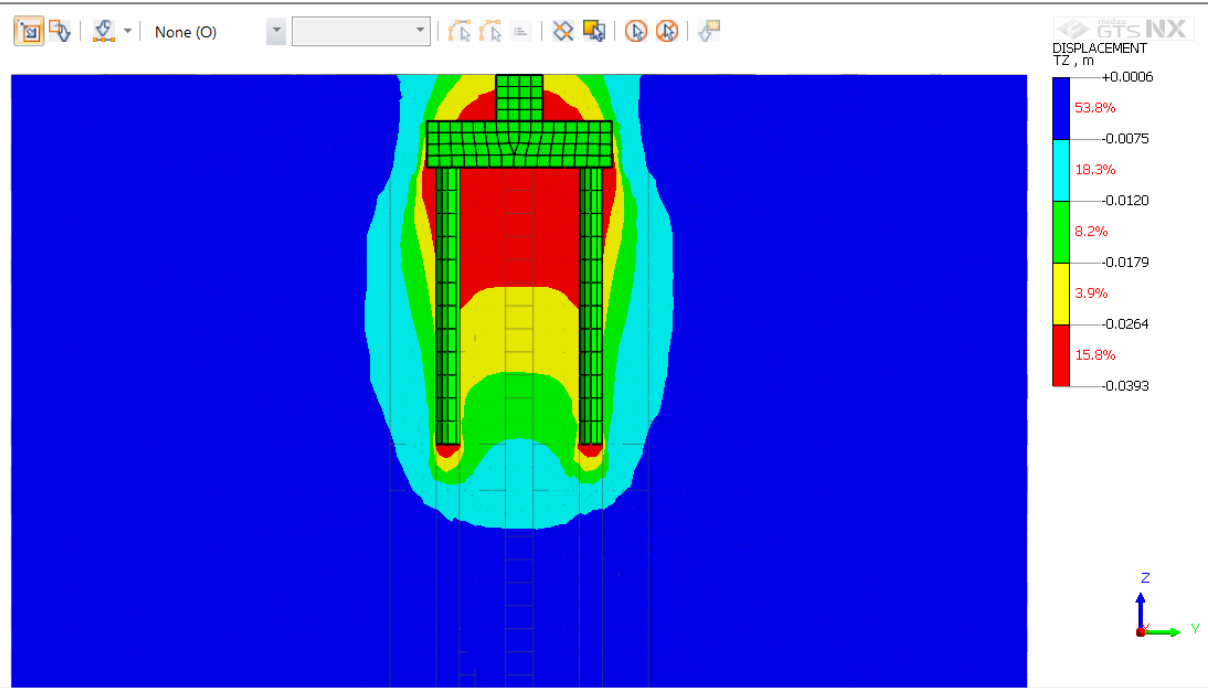


Рисунок 2.28 – Изополя вертикальных перемещений (осадок) фундамента мелкого заложения после его усиления инъекционными сваями (после реконструкции) в глинистом грунте по результатам расчета в ПК *Midas GTS*. Дополнительная осадка фундамента при вертикальной нагрузке  $N_2 = 1200$  кН составила 39,3 мм

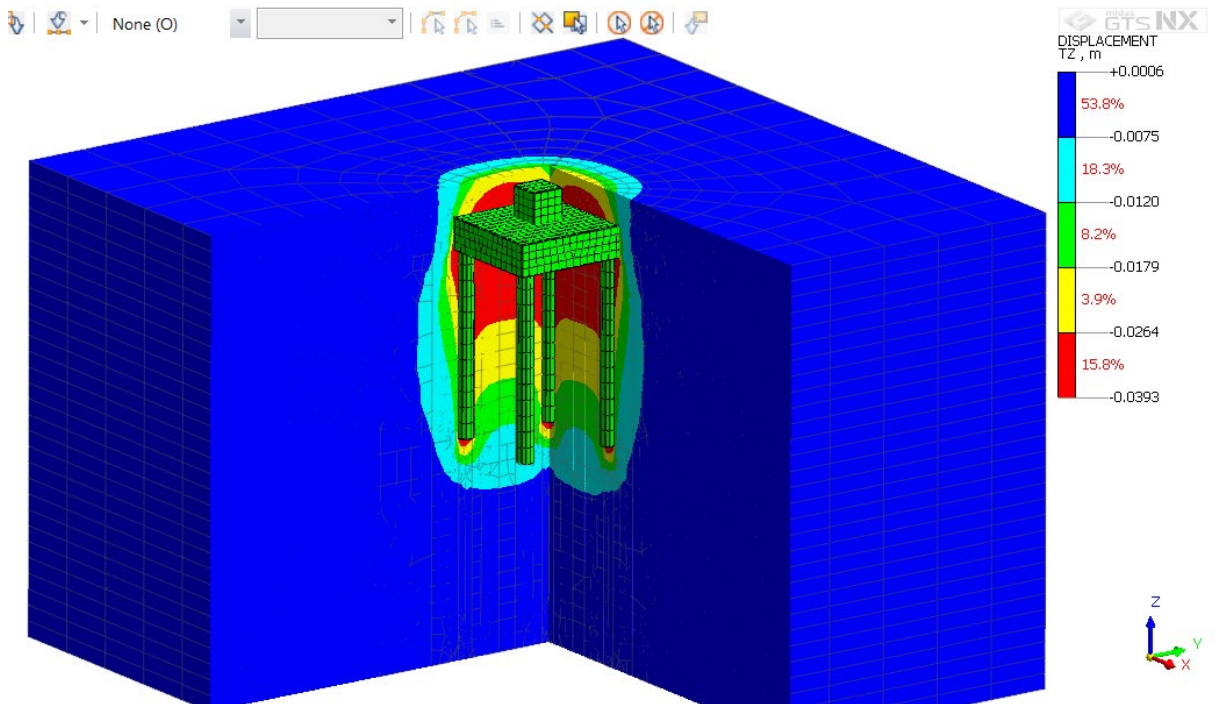


Рисунок 2.29 – Изополя вертикальных перемещений (осадок) фундамента мелкого заложения после его усиления инъекционными сваями (после реконструкции) в глинистом грунте по результатам расчета в ПК *Midas GTS*. Дополнительная осадка фундамента при вертикальной нагрузке  $N_2 = 1200$  кН составила 39,3 мм

Анализируя графики на рис. 2.30, 2.31 необходимо отметить их общую особенность – расположение значений осадки инъекционных свай, вычисленных в

программном комплексе *Midas GTS*, ниже данных натуральных наблюдений за сваями. Согласно полученным данным, разница между результатами моделирования (расчета) осадок свай и данными их натуральных испытаний, при одной и той же внешней нагрузке в рассматриваемом диапазоне нагружения 100–150 кН, не превышает 3–5 мм. Данный факт позволяет говорить о наличии запаса по осадке, а также о том, что поведение разработанной конечно-элементной системы в достаточной степени приближено к реальному поведению свай, устраиваемых путем инъекции мелкозернистого бетона в глинистых грунтах.

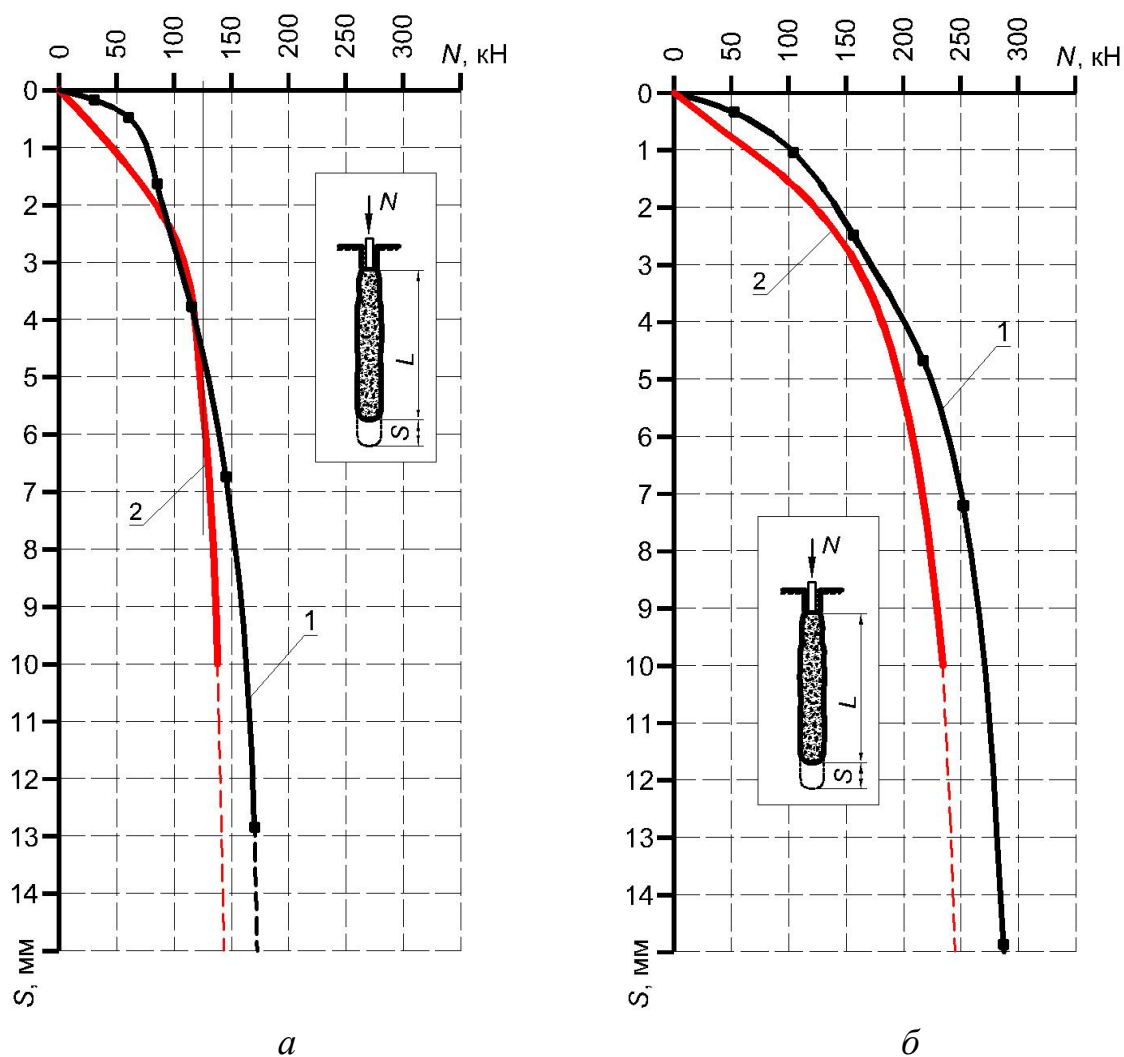


Рисунок 2.30 – Графики зависимости осадки одиночной инъекционной сваи  $S$  от приложенной нагрузки  $N$  в соответствии с:  
 1 – данными натуральных наблюдений; 2 – результатами расчета при помощи ПК *Midas GTS*;  $a$  – инъекционная свая СИ-2 на площадке №1 (длина свай  $L_{св} = 4,6$  м; средний диаметр свай  $d_{св} = 250$  мм);  $b$  – инъекционная свая СИ-19 на площадке №2 (длина свай  $L_{св} = 4,5$  м; средний диаметр свай  $d_{св} = 220$  мм)

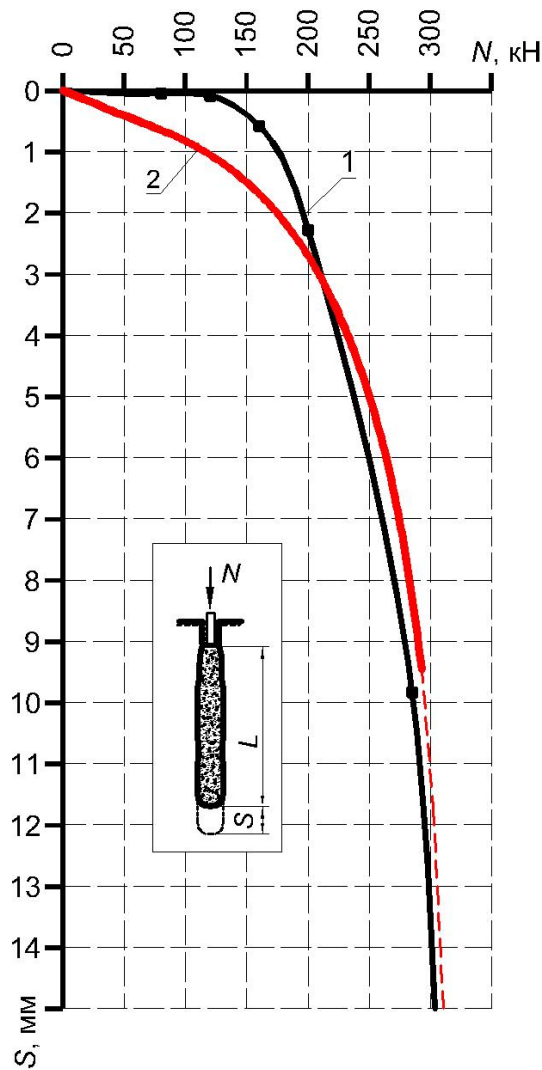


Рисунок 2.31 – Графики зависимости осадки  $S$  осадки одиночной инъекционной сваи ИС-4 на площадке №3 (длина свай  $L_{св} = 5$  м; средний диаметр свай  $d_{св} = 270$  мм) от прикладываемой к ним вертикальной вдавливающей нагрузки  $N$  в соответствии с: 1 – данными натурных наблюдений; 2 – результатами расчета при помощи ПК *Midas GTS*

Работа буроинъекционных свай оценивалась путем сопоставления графиков осадок, полученных по результатам численного моделирования и нагружения натуральных одиночных свай статической вдавливающей нагрузкой. Численное моделирование нагружения буроинъекционных свай выполнялось по аналогии с нагружением инъекционных свай с использованием ПК *Midas GTS*. Сопоставление результатов численного моделирования выполнялось с данными испытаний буроинъекционных натуральных одиночных свай, устраиваемых на площадке г. Санкт-Петербурга (ул. Ленсовета, Московский район; ЗАО «Проектно-конструкторско-технологический институт», 2005) [41]. В экспериментах использовались буроинъекционные сваи длиной 8 м и диаметром 250 мм; строительная

площадка представлена глинистыми грунтами – супесями пластичными и суглинками тугопластичными. Предварительно на рассматриваемой строительной площадке были выполнены инженерно-геологические изыскания (ПК «Универсал», 2003). Было установлено, что разница осадок натурной буроинъекционной сваи в диапазоне нагружения от 0 до 200 кН составила 1,0–2,3 мм (рис. 2.32). Следовательно, принятая конечно-элементная система соответствует реальной работе свай, устраиваемых путем инъекции мелкозернистого бетона в глинистые грунты.

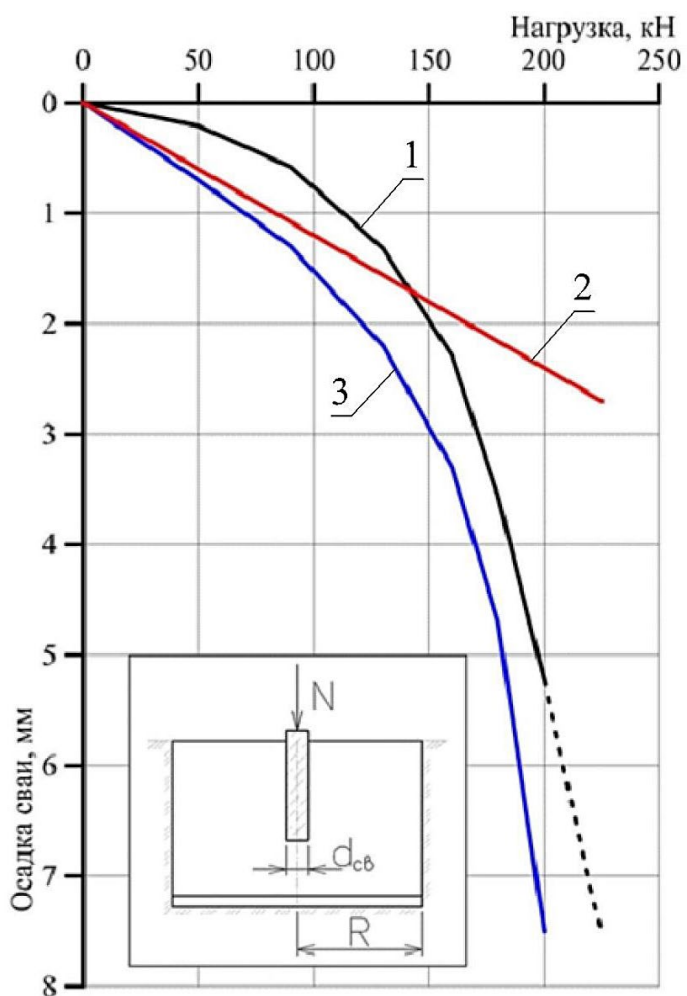


Рисунок 2.32 – Сопоставление осадок одиночной буроинъекционной сваи ( $d_{св} = 250$  мм,  $L_{св} = 8$  м)  $S$  от приложенной нагрузки  $N$ , определенных в соответствии с:  
 1 – данными натурных наблюдений; 2 – результатами расчета по СП 24.13330.2016 Свайные фундаменты; 3 – результатами расчета при помощи ПК *Midas GTS*

Из вышеуказанного следует вывод о том, что программный комплекс *Midas GTS* может быть использован для выполнения поставленных в работе задач, в том числе о перераспределении нагрузки между элементами усиленного инъекционными сваями отдельно стоящего фундамента в глинистых грунтах.

## 2.5. Выводы по разделу 2

1. Рассмотрены основные конструктивные элементы расчетных систем одиночной инъекционной сваи и отдельного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями.

2. Разработаны конечно-элементные расчетные системы «инъекционная свая – глинистый грунт» и «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» в программном комплексе *Midas GTS*. Представлены алгоритмы моделирования и результаты расчета указанных систем. Обоснованы рациональные размеры расчетной системы.

3. В рамках поставленных задач проведено обоснование применимости программного комплекса *Midas GTS* в качестве инструмента исследования. Выполнено сопоставление результатов компьютерных расчетов с натурными испытаниями вертикально нагруженных одиночных инъекционных свай в глинистых грунтах. Результаты моделирования показали, что качественный и количественный характер изменения осадок свай в зависимости от прикладываемой нагрузки, рассчитанных в *Midas GTS*, схож с данными, полученными при натурных наблюдениях за инъекционными сваями. Разность осадок составляет порядка 20–30%. Данный факт позволяет говорить о применимости разработанных расчетных систем для решения поставленных в настоящей работе задач, в том числе выполнения исследований перераспределения нагрузки между элементами отдельного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями, в глинистых грунтах.

### 3. ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ФУНДАМЕНТА ПРИ ЕГО УСИЛЕНИИ ИНЪЕКЦИОННЫМИ СВАЯМИ

#### 3.1. Основные положения о перераспределении нагрузки между элементами усиленного фундамента

При усилении отдельного фундамента инъекционными сваями происходит перераспределение внешней нагрузки между его конструктивными элементами, которые передают грунту основания соответствующие доли внешней нагрузки (рис. 3.1).

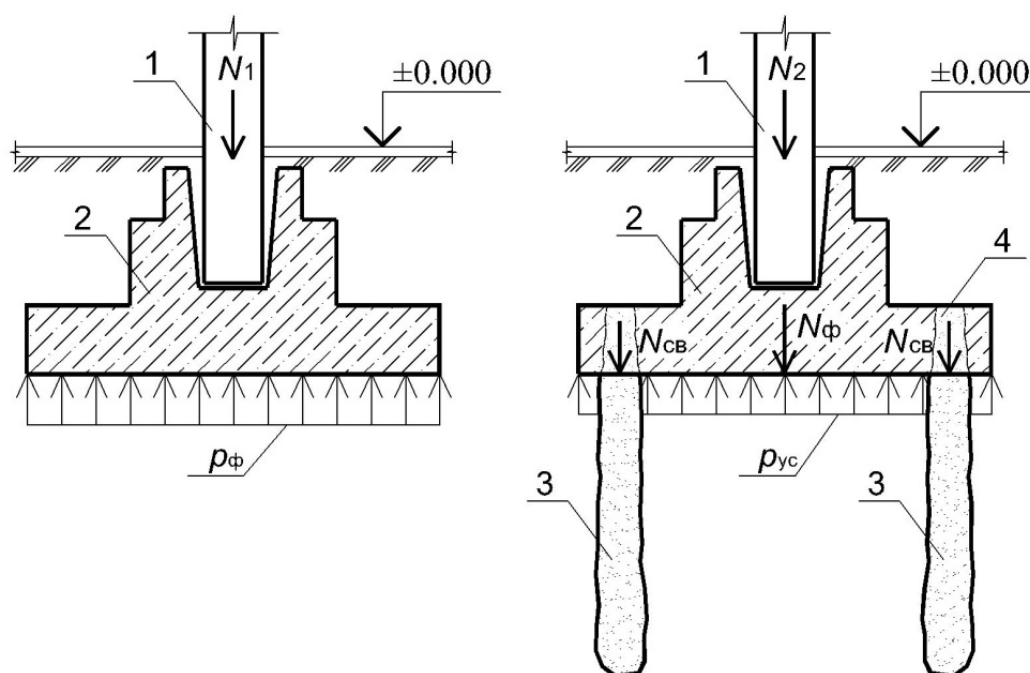


Рисунок 3.1 – Схема распределения внешней вертикальной нагрузки между конструктивными элементами отдельного фундамента:

*а* – до устройства инъекционных свай; *б* – после устройства инъекционных свай;  
1 – железобетонная колонна; 2 – отдельный фундамент; 3 – устраиваемая инъекционная свая; 4 – отверстие в плитной части фундамента;  $N_1$  – нагрузка от надземных строительных конструкций на отдельный фундамент до реконструкции;  $N_2$  – нагрузка от надземных строительных конструкций на отдельный фундамент после реконструкции;  $N_{\phi}$  – часть внешней нагрузки, передаваемая на плитную часть отдельного фундамента,  $N_{св}$  – часть внешней нагрузки, передаваемая на инъекционные сваи;  $p_{\phi}$  – давление по подошве отдельного фундамента до усиления;  $p_{ус}$  – давление по подошве отдельного фундамента после усиления

Исследование перераспределения нагрузок между конструктивными элементами отдельного фундамента, усиленного при помощи инъекционных свай, выполнено на основе результатов компьютерного моделирования в про-

граммном комплексе *Midas GTS* [63, 75, 76, 77]. Методика моделирования работы усиливаемых фундаментов представлена в п. 2.2.2. В рамках исследования варьировались основные геометрические параметры моделируемой системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт»: длина инъекционных свай  $L_{св}$  и ширина подошвы фундамента  $b_{ф}$ . Диапазон равномерно-распределенных нагрузок, прикладываемых последовательно в конечно-элементной расчетной системе «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт», составил 100–250 кПа. Расчет выполнялся в соответствии с длиной инъекционных свай ( $L_{св} = 3,0; 6,0; 9,0; 12,0$  м), шириной подошвы фундамента ( $b_{ф} = 1; 1,5; 2$  м) и физико-механическими свойствами грунтового массива (модуль упругости грунта  $E = 10$  МПа, угол внутреннего трения грунта  $\varphi = 12^\circ$ , удельное сцепление грунта  $c = 12$  кПа, объемный вес грунта  $\gamma = 18$  кН/м<sup>3</sup>).

По результатам расчета усиливаемого фундамента (отдельный и инъекционные сваи) построены характерные графики зависимости осадки фундамента от приложенной нагрузки (рис. 3.2).

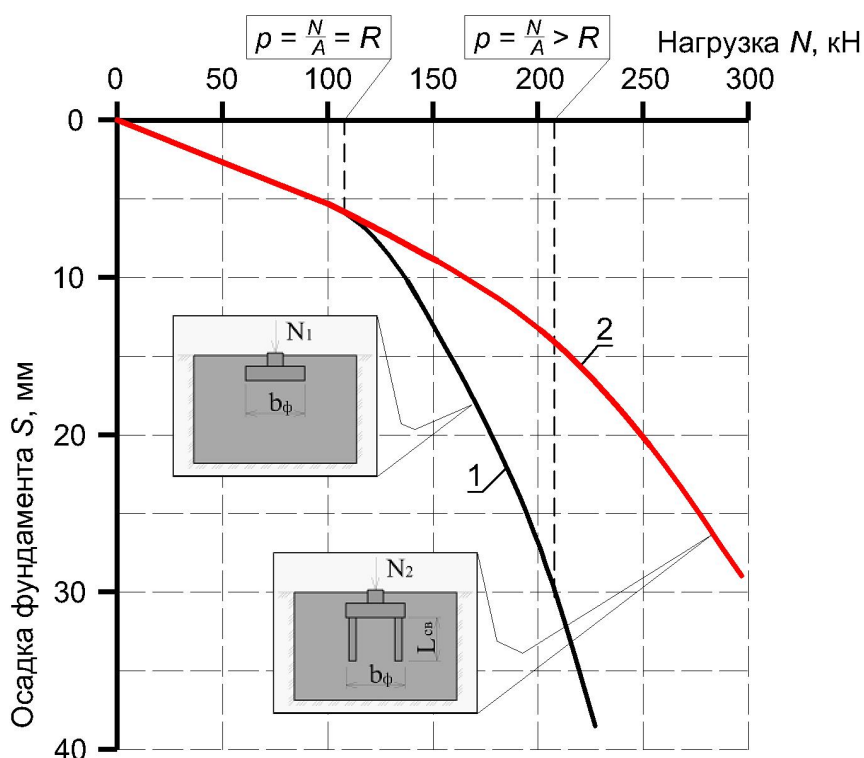


Рисунок 3.2 – Графики зависимостей осадок  $S$  отдельного фундамента от внешней вертикальной нагрузки  $N$  в условиях реконструкции здания: 1 – до усиления фундамента; 2 – после усиления сваями;  $N$  – нагрузка на фундамент до усиления;  $N_p$  – нагрузка на фундамент после усиления

До проведения работ по реконструкции здания (например, надстройки дополнительных этажей) отдельный фундамент воспринимает проектную нагрузку  $N_1$  ( $p < R$ ). После реконструкции нагрузка на фундамент увеличивается до значения  $N_2$  ( $p > R$ ). Требования, установленные нормативными документами, не выполняются, следовательно, необходимо усилить существующий фундамент. Усиление отдельного фундамента инъекционными сваями производится на этапе, когда давление  $p$  по подошве фундамента становится равным расчетному сопротивлению грунта основания  $R$ . При этом график зависимости осадки от нагрузки выполаживается. Значения расчетной осадки усиленного фундамента (рис. 3.2, 2) значительно ниже прогнозируемых расчетных осадок фундамента без усиления (рис. 3.2, 1).

### **3.2. Данные о перераспределении нагрузок в системе «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт»**

В рамках численного моделирования в ПК *Midas GTS* рассчитаны значения давлений  $p_{yc}$  в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления инъекционными сваями (рис. 3.1, б). С помощью полученных для каждого расчетного случая значений данных определены доли внешней нагрузки, которая передается конструктивными элементами усиливаемого фундамента (подошва плитной части отдельного фундамента, инъекционные сваи) на грунтовое основание. Результаты расчетов приведены в таблицах 1–3 Приложения Б.

Полученные данные моделирования в программном комплексе *Midas GTS* позволили составить графики зависимости доли внешней нагрузки, которая передается на инъекционные сваи, от их длины (рис. 3.3–3.6).

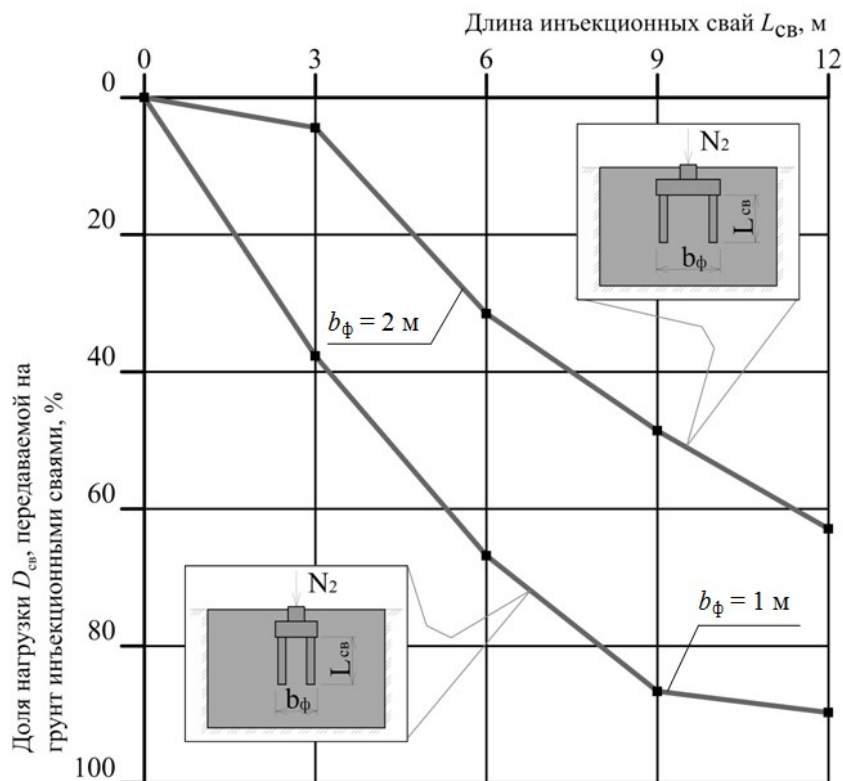


Рисунок 3.3 – Графики зависимости доли внешней нагрузки, которая передается на инъекционные сваи, от их длины (общее давление на элементы усиливаемого фундамента 100 кПа)

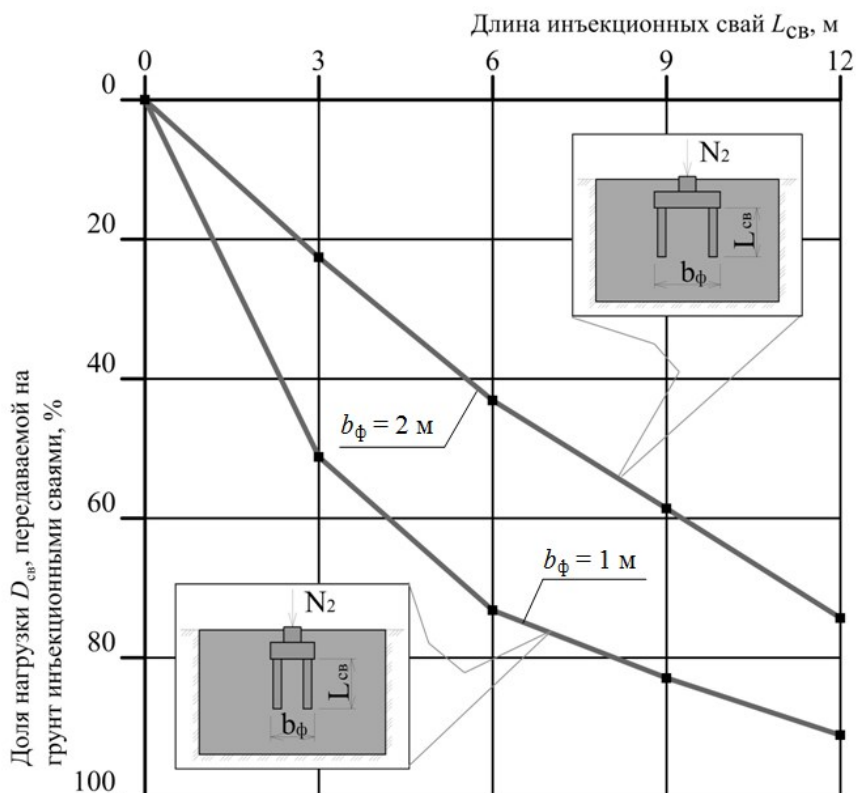


Рисунок 3.4 – Графики зависимости доли внешней нагрузки, которая передается на инъекционные сваи, от их длины (общее давление на элементы усиливаемого фундамента 150 кПа)

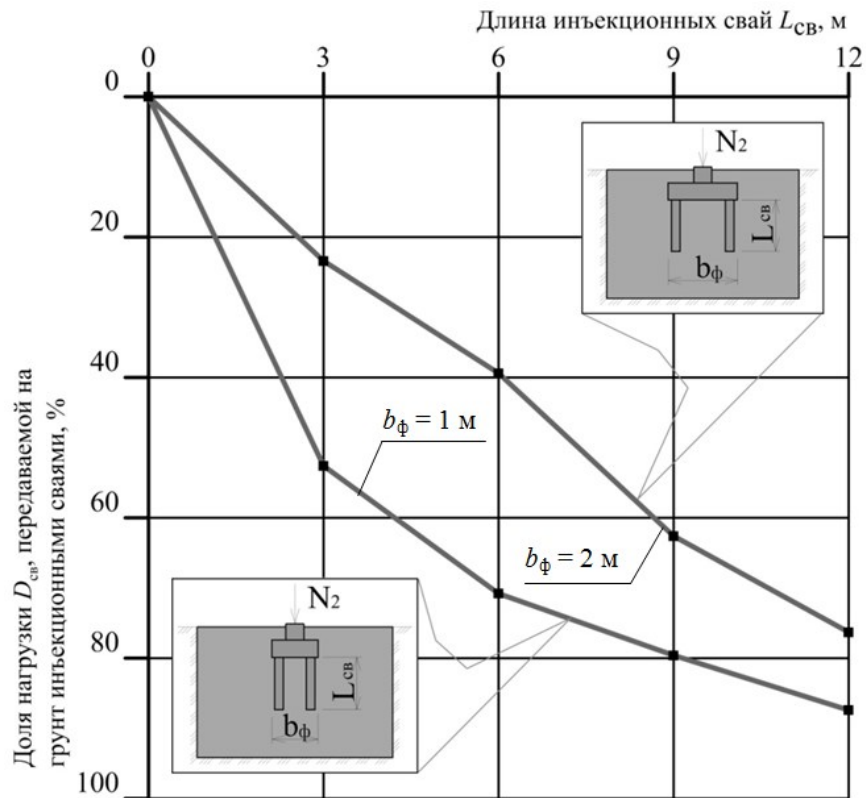


Рисунок 3.5 – Графики зависимости доли внешней нагрузки, которая передается на инъекционные сваи, от их длины (общее давление на элементы усиляемого фундамента 200 кПа)

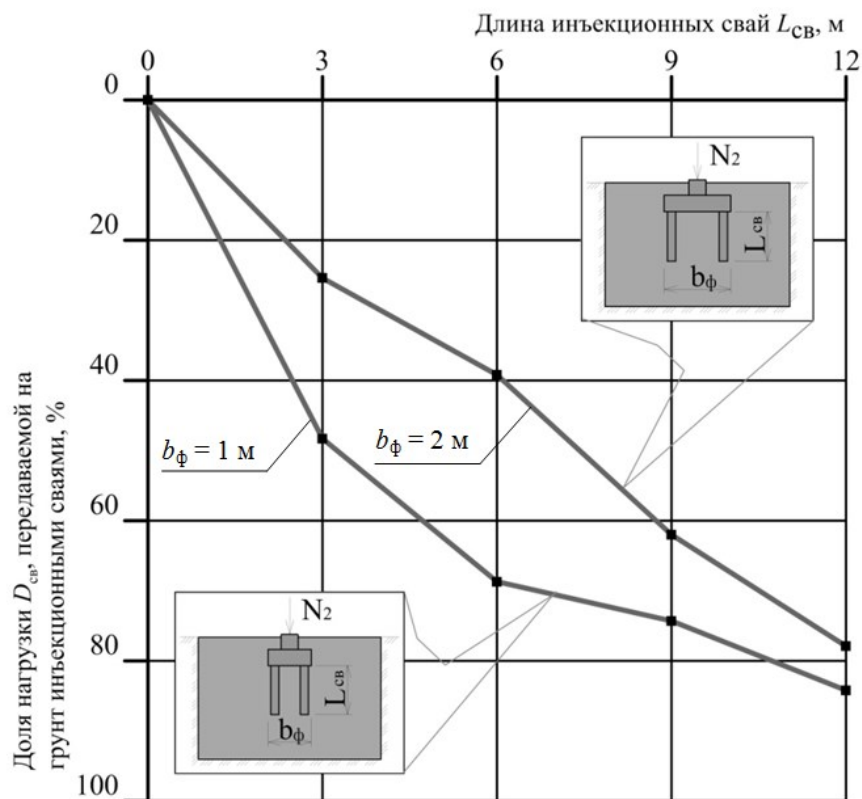


Рисунок 3.6 – Графики зависимости доли внешней нагрузки, которая передается на инъекционные сваи, от их длины (общее давление на элементы усиляемого фундамента 250 кПа)

В результате анализа графиков (рис. 3.3–3.6) выявлено, что при увеличении длины инъекционных свай  $L_{св}$ , при одном и том же давлении по подошве усиливаемого фундамента, доля внешней нагрузки, которая передается на них, увеличивается; и наоборот, доля внешней нагрузки, которая передается на плитную часть существующего отдельного фундамента, уменьшается.

Анализируя составленные графики следует отметить, что с увеличением длины свай ее влияние на долю нагрузки, приходящейся на инъекционные сваи, снижается. При длине инъекционных свай  $L_{св} = 3,0$  м доля нагрузки, приходящейся на них, составляет (давление по подошве 150 кПа) от 23 до 52%, а при длине  $L_{св} = 9,0$  м – от 59 до 82% (рис. 3.4). При этом необходимо отметить, что этот рост имеет затухающий характер.

Анализ графиков (рис. 3.7–3.10) показывает, что уширение подошвы плитной части отдельного фундамента в диапазоне давлений от 150 до 250 кПа приводит к снижению нагрузки, которая приходится на инъекционные сваи и передается на глинистое основание. Данный факт обусловлен развитием напряженной зоны в основании плитной части существующего фундамента.

Необходимо также отметить, что при последующем увеличении геометрических размеров подошвы фундамента их влияние на распределение внешней нагрузки снижается. Так, при ширине подошвы отдельного фундамента  $b_{ф} = 1,0$  м и длине инъекционных свай  $L_{св} = 6$  м (давление по подошве усиливаемого фундамента 150 кПа) доля нагрузки, передаваемая инъекционными сваями на грунтовое основание, составляет 72–73%, а при ширине  $b_{ф} = 1,5$  м – около 50%.

Таким образом, выполненные численные расчеты и анализ их результатов позволил установить влияние геометрических параметров системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» на распределение нагрузок между ее конструктивными элементами [76, 77].

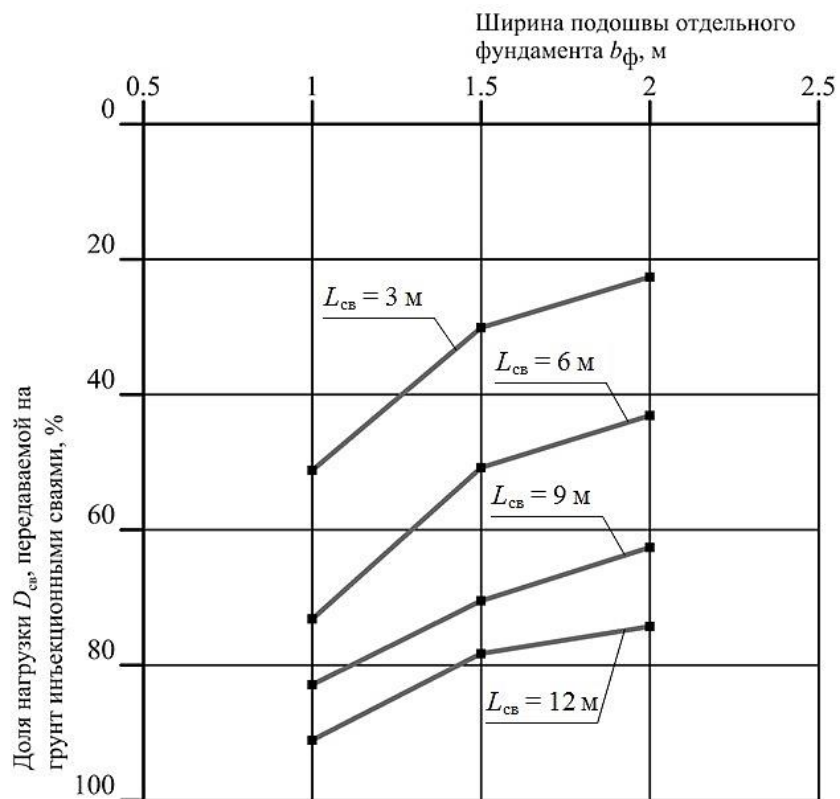


Рисунок 3.7 – Графики зависимости доли внешней нагрузки, которая передается на инъекционные сваи, от ширины подошвы отдельного фундамента (общее давление на элементы усиливаемого фундамента 150 кПа)

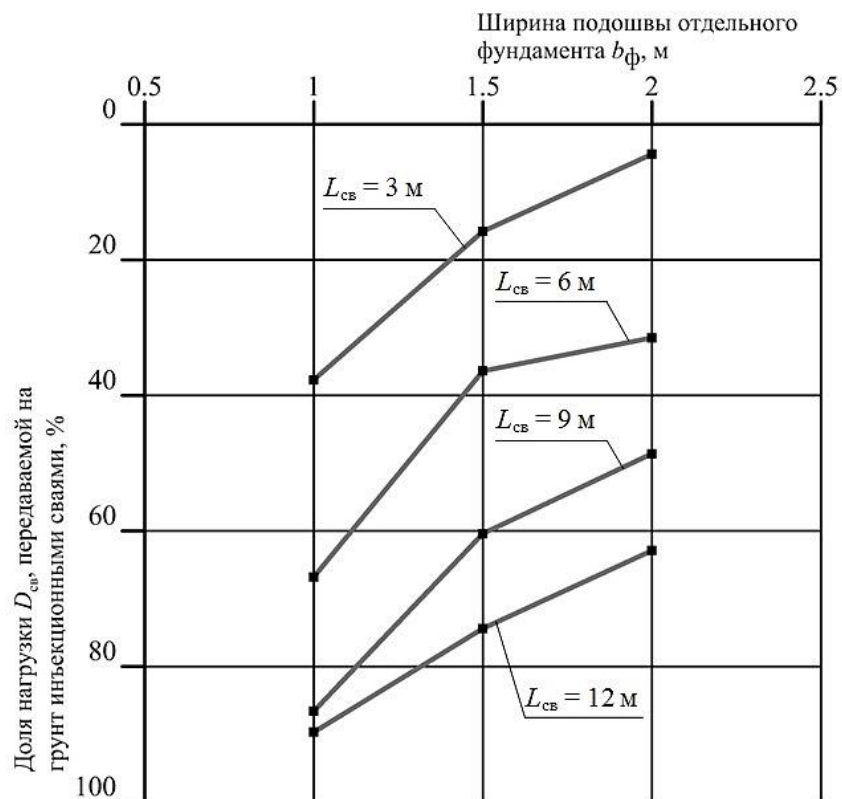


Рисунок 3.8 – Графики зависимости доли внешней нагрузки, которая передается на инъекционные сваи, от ширины подошвы отдельного фундамента (общее давление на элементы усиливаемого фундамента 100 кПа)

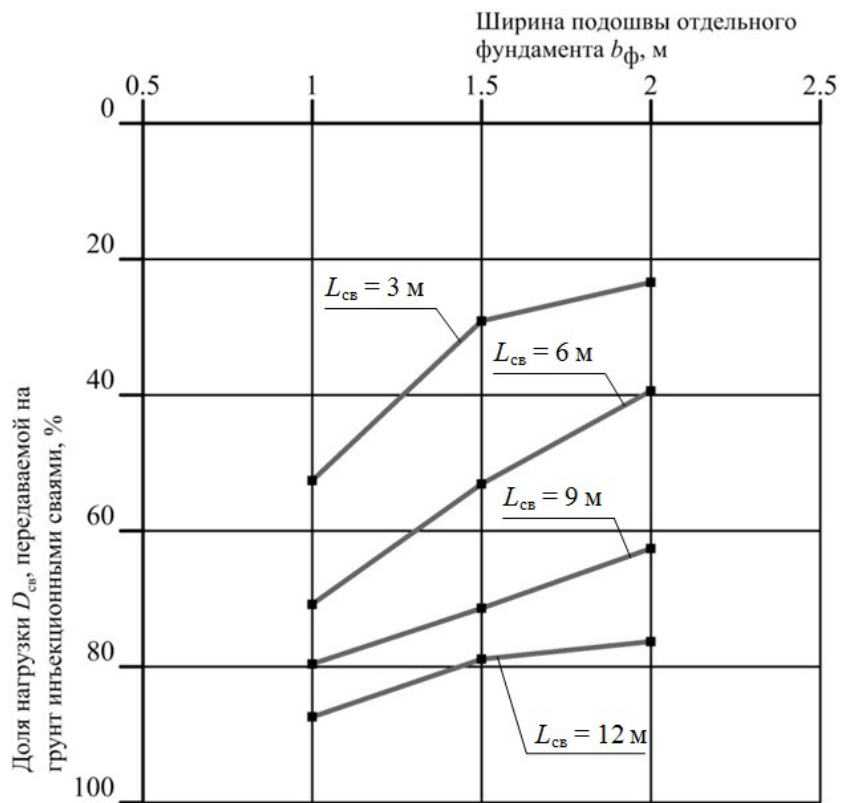


Рисунок 3.9 – Графики зависимости доли внешней нагрузки, которая приходится на инъекционные сваи, от ширины подошвы отдельного фундамента (общее давление на элементы усиливаемого фундамента 200 кПа)

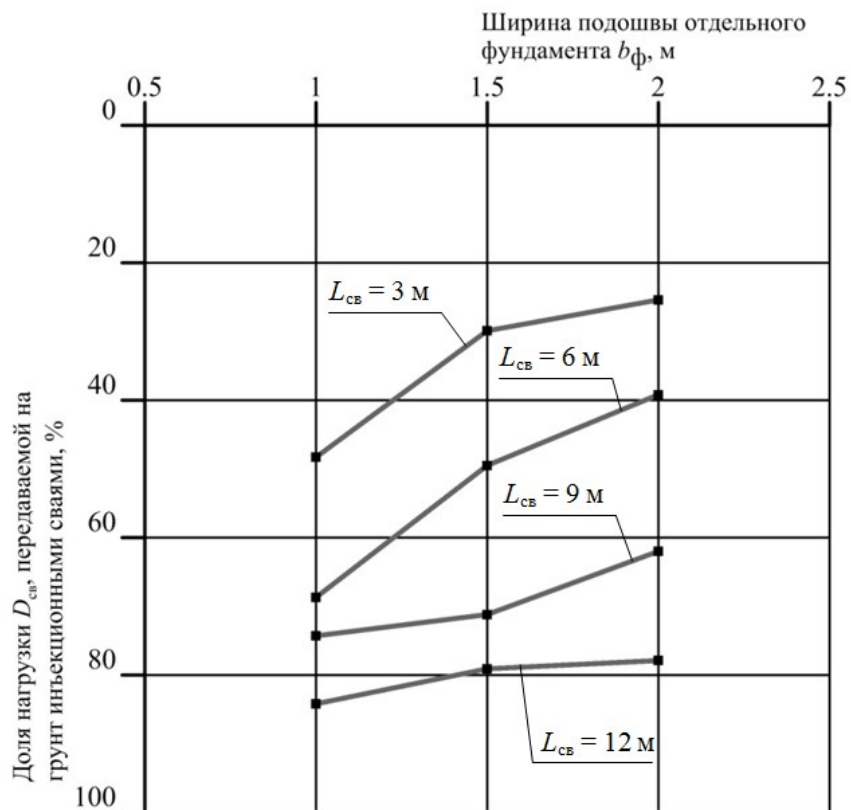


Рисунок 3.10 – Графики зависимости доли внешней нагрузки, которая приходится на инъекционные сваи, от ширины подошвы отдельного фундамента (общее давление на элементы усиливаемого фундамента 250 кПа)

### 3.3. Разработка метода расчета доли нагрузки, передаваемой на грунт основания элементами усиленного фундамента инъекционными сваями

При моделировании отдельных фундаментов, усиливаемых при помощи инъекционных свай в глинистых грунтах, получены численные значения давлений в уровне их подошвы до и после усиления ( $p_{ус}$  и  $p_{ф}$ ) при различных геометрических параметрах усиливаемого фундамента. Соответствующие результаты представлены в таблицах 1–3 Приложения В, а также на графиках сопоставления давлений в уровне подошвы фундамента до и после усиления существующего отдельного фундамента (рис. 3.11–3.13).

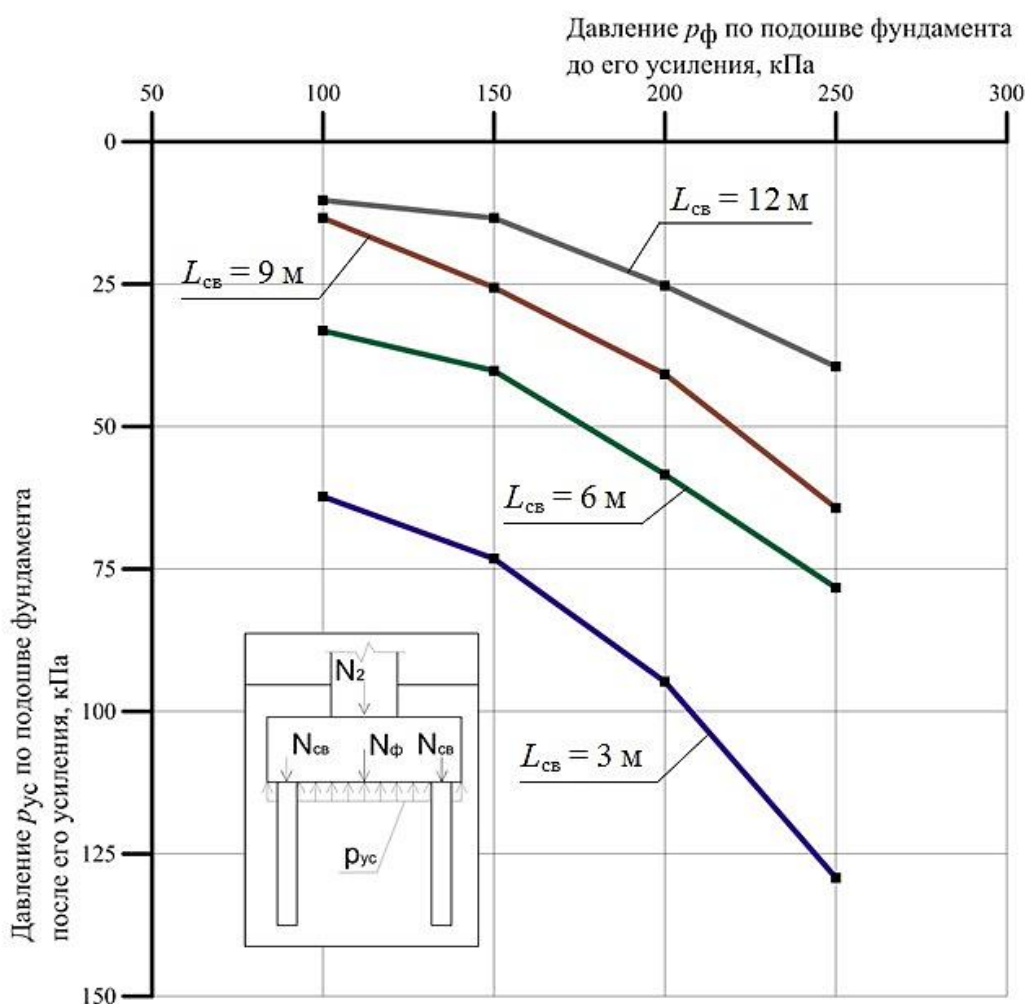


Рисунок 3.11 – Графики сопоставления давлений в уровне подошвы фундамента до и после усиления существующего отдельного фундамента ( $b_{ф} = 1,0$  м)

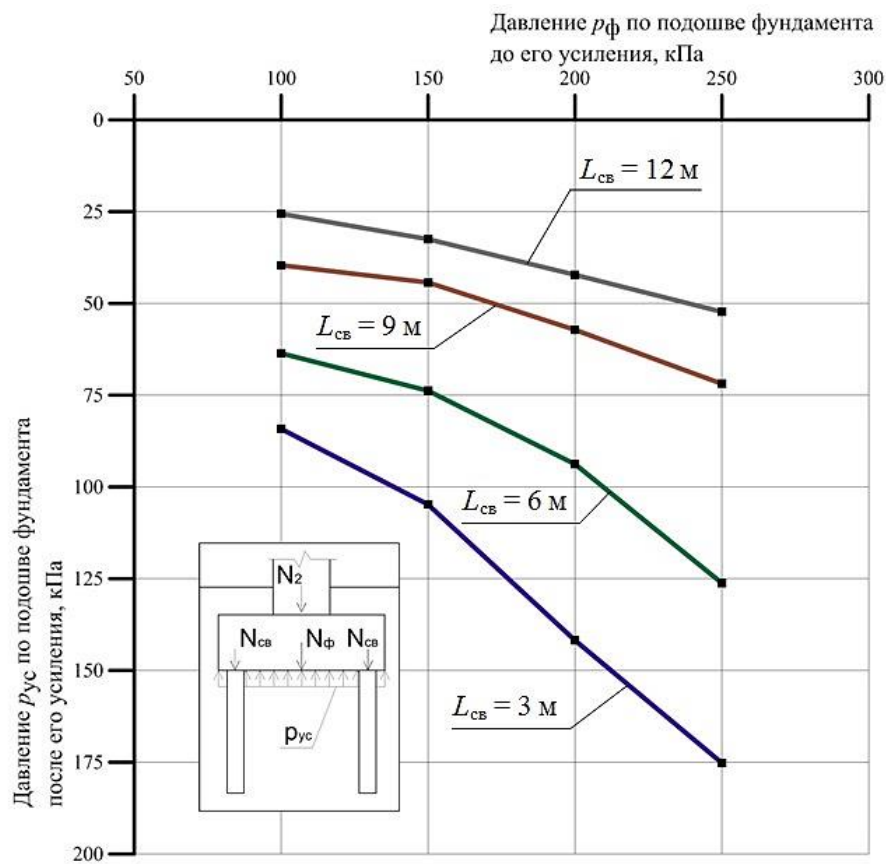


Рисунок 3.12 – Графики сопоставления давлений в уровне подошвы фундамента до и после усиления существующего отдельного фундамента ( $b_{\text{ф}} = 1,5 \text{ м}$ )

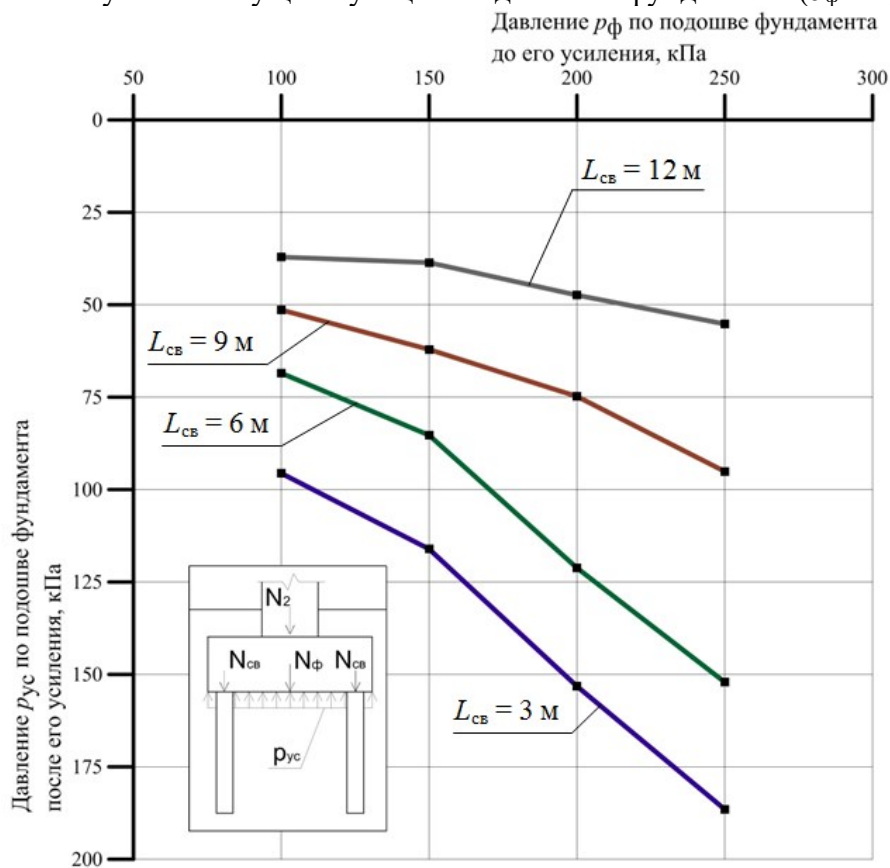


Рисунок 3.13 – Графики сопоставления давлений в уровне подошвы фундамента до и после усиления существующего отдельного фундамента ( $b_{\text{ф}} = 2,0 \text{ м}$ )

Анализируя графики (рис. 3.11–3.13) следует отметить, что при увеличении длины инъекционных свай, применяемых для усиления отдельных фундаментов, наблюдается снижение давления  $p_{yc}$  в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления. Кроме того, при одинаковых геометрических параметрах усиливаемого фундамента, рост давлений  $p_{\phi}$  в уровне его подошвы до усиления оказывает влияние и на увеличение значений давлений  $p_{yc}$  по подошве фундамента после его усиления.

В результате графического анализа полученных данных (рис. 3.11–3.13), установлен возрастающий характер зависимости между величинами давлений  $p_{\phi}$  по подошве фундамента до усиления и давлений  $p_{yc}$  по подошве отдельного фундамента после его усиления. При этом, чем больше длина инъекционных свай, тем ниже влияние давления  $p_{\phi}$  на давление  $p_{yc}$ .

По данным аналитических исследований (табл. 1–3 Приложения В) между двумя величинами  $p_{yc}$  и  $p_{\phi}$  выявлена функциональная зависимость, однако ее аналитический вид неизвестен. Задачей ставилось получить формулу для определения давлений  $p_{yc}$  в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления в следующем виде:

$$y = f(x; a_1, a_2, \dots, a_m), \quad (3.1)$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_m$  – параметры, зависящие от геометрических характеристик конструктивных элементов усиливаемого фундамента.

Для решения поставленной задачи необходимо выбрать класс функции (линейные, степенные, показательные и т.п.), после чего определяются наиболее близкие (по характеру распределения зависимых величин) значения искомых параметров функции. В соответствии с методом наименьших квадратов наилучшими в этом плане коэффициентами считаются те, для которых сумма квадратов отклонений определенной функции от заданных значений функции:

$$S(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n [f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m) - y_i]^2, \quad (3.2)$$

будет минимальной.

Таким образом, поиск аналитического вида функциональной зависимости состоит из двух основных этапов: выявление общего вида формулы и определение ее наилучших параметров  $(a_1, a_2, \dots, a_m)$ .

С учетом полученных данных моделирования (рис. 3.11–3.13) полученные зависимости можно аппроксимировать квадратичным уравнением вида:

$$y = a_1 + a_2x + a_3x^2, \quad (3.3)$$

где  $y$  – величина давления  $p_{yc}$  в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления;  $x$  – величина давления  $p_\phi$  в уровне подошвы отдельного фундамента до его усиления;  $a_1, a_2, a_3$  – параметры аппроксимации, зависящие от геометрических характеристик усиливаемого фундамента.

Для определения набора коэффициентов, которые обеспечивают минимум функции  $S$  по формуле (3.2), воспользуемся необходимым условием экстремума функции нескольких переменных – равенство нулю частных производных. В результате получим нормальную систему для определения коэффициентов  $a_i (i = 1, 2, \dots, m)$ :

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0; \quad \dots; \quad \frac{\partial S}{\partial a_m} = 0. \quad (3.4)$$

Нахождение коэффициентов сводится к решению системы (3.4). В соответствии с приведенной выше информацией проведена аппроксимация полученной зависимости  $p_{yc}$  ( $p_\phi$ ). Качество аппроксимации оценивалось средней ошибкой аппроксимации  $\bar{A}$  по формуле:

$$\bar{A} = \frac{\sum(y_i - y_x)/y_i}{n} \cdot 100\%, \quad (3.5)$$

где  $y_i$  – фактическое значение давления  $p_{yc}$  в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления;  $y_x$  – расчетное значение давления  $p_{yc}$  в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления;  $n$  – число полученных в ходе исследования значений давления  $p_{yc}$  в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления.

Результаты определения параметров приведены в таблицах 1–3 Приложения Г. Из полученных результатов видно, что средняя ошибка аппроксимации

$\bar{A}$  не превышает 1%, что свидетельствует о хорошо подобранной модели уравнения зависимости давления  $p_{yc}$  в уровне подошвы фундамента после его усиления от давления  $p_{\phi}$  в уровне подошвы фундамента до усиления.

Формула для определения давления  $p_{yc}$  в уровне подошвы фундамента после его усиления имеет следующий вид [63]:

$$p_{yc} = a_1 p_{\phi}^2 + a_2 p_{\phi} + a_3, \quad (3.6)$$

где  $p_{\phi}$  – давление в уровне подошвы фундамента до его усиления инъекционными сваями;  $a_1, a_2, a_3$  – параметры аппроксимации, определяемые по таблицам 1–3 Приложения Г.

При известной величине давления  $p_{yc}$  в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления, доля внешней нагрузки  $D_{\Pi}$  (%), которая передается подошвой на грунтовое основание, составит:

$$D_{\Pi} = \frac{(p_{yc} \cdot 100\%)}{p_{\phi}}. \quad (3.7)$$

Доля внешней нагрузки  $D_{св}$  (%), которая передается инъекционными сваями на грунтовое основание, составит:

$$D_{св} = 100\% - D_{\Pi}. \quad (3.8)$$

Таким образом, при известных геометрических характеристиках основных конструктивных элементов усиливаемого фундамента (длина инъекционных свай  $L_{св}$ , ширина подошвы фундамента  $b_{\phi}$ ), с использованием данных таблиц 1–3 Приложения Г, можно рассчитать доли внешней нагрузки, которые передаются конструктивными элементами усиливаемого отдельного фундамента на глинистый грунт основания [63, 76, 77]. Представленный метод расчета учитывает геометрические размеры подошвы отдельного фундамента ( $b_{\phi} = 1,0; 1,5; 2,0$  м), длину инъекционных свай, которые используются для его усиления ( $L_{св} = 3,0; 6,0; 9,0; 12,0$  м), диаметр инъекционных свай  $d_{св} = 0,25$  м, а также следующие физико-механические характеристики грунта основания (суглинки мягкопластичной консистенции): модуль упругости грунта  $E = 9-$

11 МПа, угол внутреннего трения грунта  $\varphi = 10\text{--}12^\circ$ ; удельное сцепление грунта  $c = 10\text{--}12$  кПа.

Рассмотрим пример расчета долей внешней нагрузки, которые передаются конструктивными элементами усиливаемого фундамента на глинистый грунт основания, по разработанному методу.

**Исходные данные.** Требуется оценить загрузку отдельного фундамента мелкого заложения под колонну и, в случае необходимости, выполнить расчет его усиления при помощи инъекционных свай. Ширина подошвы плитной части фундамента  $b_\phi = 1,5$  м, глубина заложения  $d = 1$  м; вертикальная внешняя суммарная нагрузка, которая действует в уровне подошвы фундамента, составляет  $\Sigma N = 340$  кН; расчетное сопротивление грунта основания  $R = 110$  кПа.

**Решение.** Давление  $p_\phi$  в уровне подошвы существующего отдельного фундамента до его усиления составляет:

$$p_\phi = \frac{\Sigma N}{A} = \frac{340}{1,5 \cdot 1,5} = 151,1 > R = 110 \text{ кПа.}$$

Давление по подошве превышает расчетное сопротивление грунта основания, следовательно, необходимо выполнить усиление фундамента. Принимаем решение по увеличению его несущей способности путем передачи части нагрузки на инъекционные сваи. Предполагается устроить четыре инъекционные сваи длиной  $L_{св} = 3,0$  м диаметром  $d_{св} = 0,25$  м в углах отдельного фундамента непосредственно через его плитную часть. При заданных параметрах свай, согласно данным таблицы 2 Приложения Г, давление  $p_{yc}$  в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления составит:

$$\begin{aligned} p_{yc} &= a_1 p_\phi^2 + a_2 p_\phi + a_3 = 0,00128 \cdot 151,1^2 + 0,172 \cdot 151,1 + 53,2 = \\ &= 108,4 \text{ кПа} < R = 110 \text{ кПа.} \end{aligned}$$

При известной величине давления  $p_{yc}$  в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления, доля нагрузки  $D_\Pi$  (%), которая передается на грунт основания подошвой отдельного фундамента, составит:

$$D_{\pi} = \frac{(p_{\text{ус}} \cdot 100\%)}{p_{\text{ф}}} = \frac{(108,4 \cdot 100\%)}{151,1} = 71,7 \%$$

Доля нагрузки  $D_{\text{св}}$  (%), которая передается инъекционными сваями на грунт основания, составит:

$$D_{\text{св}} = 100\% - D_{\text{ф}} = 100 - 71,7 = 28,3 \%$$

### 3.4. Выводы по разделу 3

1. Численное моделирование при помощи ПК *Midas GTS* позволило установить влияние геометрических параметров системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» на распределение нагрузок между ее конструктивными элементами.

2. Результаты исследования показывают, что изменение длины устраиваемых свай от 3 до 9 м приводит к повышению доли внешних нагрузок, передаваемой на грунт основания сваями, с 23–52 % до 59–82 % соответственно. При этом необходимо отметить, что этот рост имеет затухающий характер.

3. Увеличение ширины подошвы плитной части отдельного фундамента приводит к снижению нагрузки, которая приходится на инъекционные сваи и передается на глинистое основание. Данный факт обусловлен развитием напряженной зоны в основании плитной части существующего фундамента.

4. Разработан метод определения доли (части) внешней нагрузки, распределяемой в системе реконструируемого здания между элементами усиливаемого фундамента. В основе метода лежит величина давления  $p_{\text{ус}}$  по подошве фундамента после его усиления инъекционными сваями с учетом геометрических параметров рассматриваемого фундамента при заданных параметрах грунта основания.

#### **4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ФУНДАМЕНТОВ С УЧЕТОМ ИХ УСИЛЕНИЯ ИНЪЕКЦИОННЫМИ СВАЯМИ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ ДЛЯ РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ**

##### **4.1. Инженерный метод определения конечной осадки одиночной инъекционной сваи и его обоснование**

При анализе результатов экспериментальных исследований инъекционных свай вертикальной статической нагрузкой установлено, что использование существующих «линейных» решений при определении осадок одиночных инъекционных свай может привести к существенным расхождениям с фактически измеренными осадками. Это объясняется тем, что при росте внешней нагрузки  $N$  зависимость между осадкой и нагрузкой  $S = f(N)$  становится существенно нелинейной. В уровне нижнего конца инъекционной сваи начинают развиваться зоны сдвиговых деформаций (зоны локального нарушения прочности грунта). Поэтому для расчета осадки одиночной инъекционной сваи необходимо применение решений, отражающих реальный (нелинейный) характер ее работы в глинистом грунте.

Внешняя нагрузка  $N$ , действующая на инъекционную сваю, воспринимается окружающим массивом через сопротивление грунта  $f$  на контакте с боковой поверхностью сваи и через сопротивление грунта  $R$  под ее нижним концом. Это дает основание считать, что схема взаимодействия инъекционных свай с глинистым грунтом основания существенно не отличается от схемы работы висячих свай, что позволяет использовать в расчетах известные теоретические положения. Предлагаемый инженерный метод рассматривается как подход к решению комплексной задачи по оценке деформаций отдельных и ленточных фундаментов после их усиления инъекционными сваями в условиях реконструкции зданий, а также для условий нового строительства.

Диаметр инъекционной сваи является переменным вдоль ее длины в зависимости от прочности отдельных слоев грунта строительной площадки. Так,

в слабых глинистых грунтах диаметр инъекционной сваи на отдельных участках по ее длине может быть увеличен в 1,5–2,0 раза и более по сравнению с диаметром скважины, образованной вдавливанием иньектора [84]. При этом боковая поверхность сваи является волнообразной. Однако в качестве расчетной схемы тело инъекционной сваи рассматривается, обычно, в виде гладкого цилиндра с постоянным диаметром для каждого слоя грунта, значение которого принимается как средняя величина от фактических диаметров (рис. 4.1).

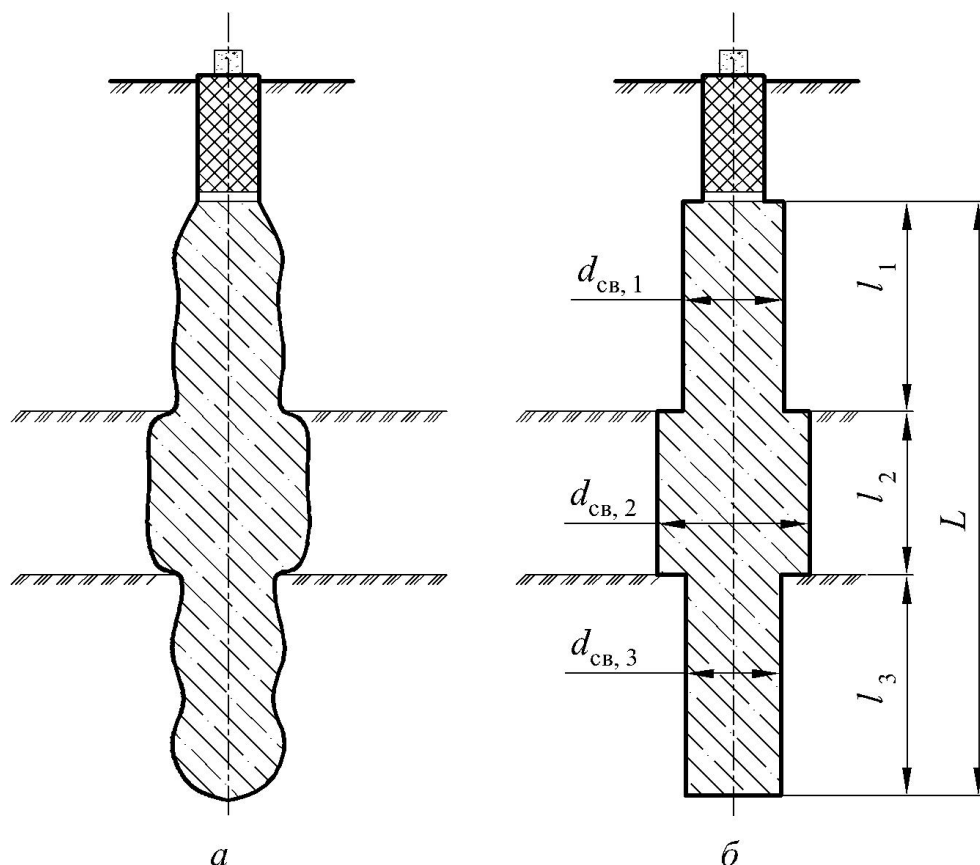


Рисунок 4.1 – Геометрические размеры инъекционной сваи для расчета ее конечной осадки:

**Постановка задачи.** Для определения зависимости  $S = f(N)$  инъекционной сваи воспользуемся предложением Далматова Б. И. и др. [12] о раздельной работе нижнего конца и боковой поверхности висячих свай в глинистом грунте. Принимаем, что на первом этапе нагружения инъекционной сваи (до нагрузки  $N_1$ ) внешняя нагрузка  $N$  перераспределяется между ее боковой поверхностью и нижним концом (рис. 4.2, а). *Первый этап*

нагружения инъекционной сваи характеризуется линейным ростом осадки  $S$  и завершается некоторым значением осадки  $S_1$ , после достижения которого происходит проскальзывание боковой поверхности инъекционной сваи относительно окружающего ее грунта. Осадка сваи  $S_1$ , сформированная в момент полной реализации сопротивления грунта по его боковой поверхности, называется «сдвиговой». Внешняя вертикальная нагрузка  $N_1$ , которая соответствует окончанию линейной зависимости на графике осадок  $S = f(N)$ , составляет:

$$N_1 = N_f + N_R, \quad (4.1)$$

где  $N_f$  – часть внешней нагрузки, передаваемой на околосвайный массив грунта боковой поверхностью инъекционной сваи, кН;  $N_R$  – часть внешней нагрузки, передаваемая на грунт основания нижним концом сваи на этапе окончания линейной зависимости  $S = f(N)$  (в момент полной реализации сопротивления грунта по боковой поверхности сваи), кН.

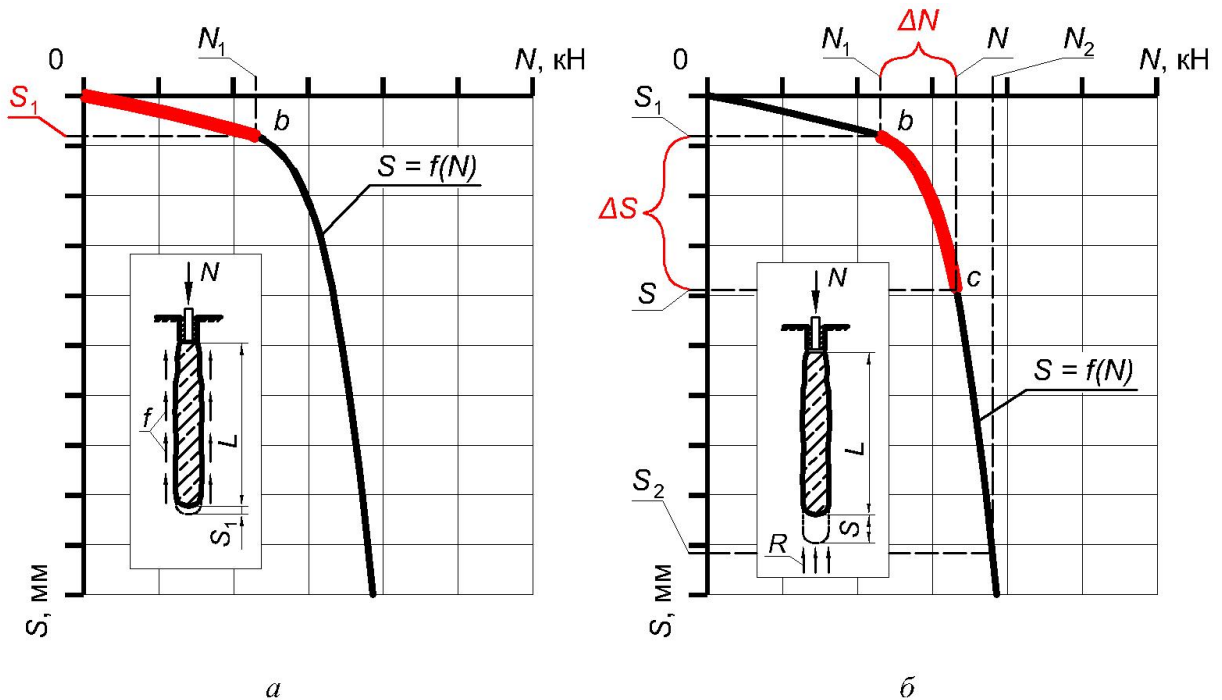


Рисунок 4.2 – Зависимость осадки инъекционной сваи  $S$  от действующей на нее внешней вдавливающей нагрузки  $N$ :

$a$  – первый этап нагружения инъекционной сваи (линейный рост осадки);

$b$  – второй этап нагружения инъекционной сваи (нелинейный рост осадки)

При увеличении внешней нагрузки  $N$  ( $N > N_1$ ) начинает происходить проскальзывание (срез) грунта вдоль боковой поверхности инъекционной

сваи. С этого момента наступает *второй этап* нагружения инъекционной сваи, на котором полностью проявляется работа ее нижнего конца в грунте (рис. 4.2, б). При этом график  $S = f(N)$  приобретает нелинейный характер. Второй этап нагружения завершается при достижении нагрузки  $N_2$ , которая соответствует полному исчерпанию несущей способности сваи по грунту и нестабилизированной (провальной) осадке  $S_2$ . Нагрузка  $N_2$ , в соответствии с условиями работы инъекционной сваи в глинистом грунте:

$$N_2 = N_1 + (N_n - N_R), \quad (4.2)$$

где  $N_n$  – часть внешней нагрузки, передаваемой на грунт нижним концом сваи и соответствующей потере ее несущей способности по грунту, кН.

Нагрузка, находящаяся в диапазоне нелинейной зависимости  $S = f(N)$ :

$$N = N_1 + \Delta N, \quad (4.3)$$

где  $\Delta N$  – приращение нагрузки на инъекционную сваю с момента окончания линейной зависимости  $S = f(N)$  (на участке от  $N_1$  до  $N_2$ ), кН.

Конечная осадка сваи  $S$  при заданной нагрузке  $N$ :

$$S = S_1 + \Delta S, \quad (4.4)$$

где  $S_1$  – осадка, сформированная на первом этапе нагружения (за счет деформаций грунта при сдвиге вокруг боковой поверхности инъекционной сваи и его уплотнения под нижним концом), мм;  $\Delta S$  – приращение осадки на втором этапе нагружения (за счет развития деформаций грунта в основании нижнего конца сваи), мм.

**Результаты исследований.** Определим осадку  $S_1$  инъекционной сваи на первом этапе нагружения (при  $N_1 = N_f + N_R$ ). Воспользуемся аналитическим методом Randolph M. F. и др. [105] для расчета осадки висячей сваи, которая находится в линейно-деформируемой среде. Авторы этого метода считали, что нагружение сваи сопровождалось развитием преимущественно сдвиговых деформаций в околосвайном массиве грунта. Деформации грунта вокруг сваи условно принимали в виде концентрических цилиндров, на гранях которых действуют касательные напряжения ( $\tau, \tau_0, \tau_m$ ). Аналогичное решение, но с учетом реологических свойств глинистых грунтов, было получено Тер-

Мартирисяном З. Г. и др. [89]. Формула для определения линейной осадки ствола сваи  $w$  (по Randolph M. F. и др., 1972), обусловленной действием касательных напряжений ( $\tau$ ,  $\tau_0$ ,  $\tau_m$ ), вдоль ее боковой поверхности по [105] имеет вид (рис. 4.3):

$$w = \frac{\tau_0 \cdot r_0}{G} \cdot \int_{r_0}^{r_m} \frac{dr}{r} = \frac{\tau_0 \cdot r_0}{G} \cdot \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right), \quad (4.5)$$

где  $r$  – горизонтальное расстояние от вертикальной оси сваи  $z$  до любой границы в пределах линейно-деформируемой области околосвайного массива грунта, м;  $r_m$  – горизонтальное расстояние от вертикальной оси сваи  $z$  до границы, где вертикальные перемещения грунта  $w$  равны нулю (радиус влияния), м;  $r_0$  – радиус инъекционной сваи, м;  $\tau_0$  – касательные напряжения, действующие на боковой поверхности инъекционной сваи, кПа;  $G$  – начальный модуль сдвига грунта, кПа.

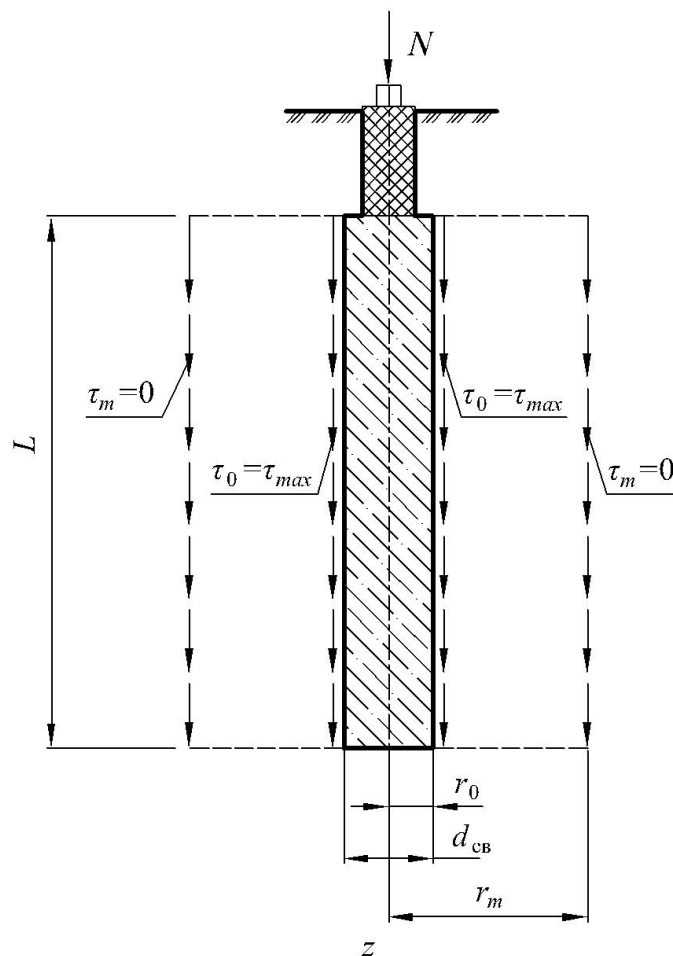


Рисунок 4.3 – Расчетная схема инъекционной сваи для определения линейной осадки  $S_1$  (первый этап нагружения)

Формула (4.5) базируется на положении, что вертикальные перемещения грунта вокруг сваи практически не меняются по глубине, а при удалении от сваи затухают. Следует отметить, что предложенная схема деформирования грунта вокруг одиночной сваи при ее нагружении впервые была описана Барвашовым В. А. [2], который назвал ее «телескопический сдвиг». Он установил, что горизонтальные перемещения грунта вокруг сваи малы по сравнению с вертикальными (не более 2–5% вертикальных перемещений). Уточнение расчетных схем и развитие методов расчета осадок одиночных свай в пылевато-глинистых и других грунтах выполнено Федоровским В. Г., Готманом А. Л., Мангушевым Р. А. [9, 29, 92, 93]. Метод Randolph M. F. и др. [105] в 2016–2017 гг. был использован Максимовым Ф. А. (2017) для разработки метода расчета конечной осадки винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах [26].

Рассмотрим применение метода Randolph M. F. и др. [105] к расчету осадки инъекционной сваи в глинистом грунте на первом этапе ее нагружения. Для этого примем расчетную схему по рис. 4.3. При этом считаем, что осадка  $S_1$ , происходит одновременно от нагрузки  $N_f$  (за счет сдвига грунта по боковой поверхности инъекционной сваи –  $S_f$ ) и частично от нагрузки  $N_R$  (за счет уплотнения грунта под нижним концом сваи –  $S_R$ ). Принимая, что осадки сваи  $S_f$  и  $S_R$  равны между собой (из условия ее неразрывности), запишем:

$$S_1 = S_f = S_R. \quad (4.6)$$

Для определения  $S_f$  заменим действие нагрузки  $N_f$  (части нагрузки от  $N_1$ ) касательными напряжениями  $\tau_0$ , равномерно распределенными по боковой поверхности инъекционной сваи (рис. 4.3):

$$\tau_0 = \frac{N_f}{2\pi r_0 L}, \quad (4.7)$$

где  $r_0$  – радиус инъекционной сваи, м;  $L$  – длина инъекционной сваи (участок инъектирования мелкозернистого бетона), м.

В соответствии с [105] вертикальное перемещение сваи  $w$  в формуле (4.5) формируется за счет касательных напряжений  $\tau$ , действующих вокруг ее боковой поверхности, ограниченной расстоянием  $r_m$  (радиус влияния).

Согласно результатам исследования Тер-Мартirosяна З. Г., Чинь Туан Вьет и др. [89], Полищука А. И., Петухова А. А. и др. [48, 55, 84, 96], а также данным численного моделирования работы буроинъекционных свай в глинистых грунтах, выполненного авторами настоящей статьи в 2012–2014 гг., значение радиуса влияния  $r_m$  предлагается принимать не более 3–5 диаметров (6–10 радиусов) свай:

$$r_m = 6 \dots 10 \cdot r_0. \quad (4.8)$$

Предлагаемые значения радиуса влияния  $r_m$  подтверждаются результатами статического зондирования околосвайного массива грунта при испытании натуральных инъекционных свай длиной 3 и 5 м, диаметром ствола 0,25–0,30 м в глинистом грунте различного состояния [48]. При этом меньшие значения  $r_m$  принимаются для глинистых грунтов менее прочных (слабых).

Подставляя (4.7) в выражение (4.5) и принимая  $w = S_1 = S_f = S_R$ , получим формулу для определения осадки инъекционной свай  $S_1$  в глинистом грунте на первом этапе ее нагружения (окончание линейной зависимости на графике осадки свай):

$$S_1 = \frac{N_f}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot G} \cdot \ln \left( \frac{r_m}{r_0} \right). \quad (4.9)$$

В формулу (4.9) входит начальный модуль сдвига  $G$ , который зависит от касательных напряжений  $\tau_0$ , распределенных по боковой поверхности инъекционной свай. Характеристика начального модуля сдвига грунта  $G$  для линейного участка работы свай может быть установлена по соотношениям теории упругости:

$$G = \frac{E_0}{2 \cdot (1 + \mu)}, \quad (4.10)$$

где  $E_0$  – модуль общей деформации грунта, установленный по результатам штамповых испытаний в диапазоне линейной зависимости  $S = f(p)$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона грунта (коэффициент бокового расширения грунта).

Нагрузка  $N_f$ , соответствующая наступлению предельного состояния грунта на участке его контакта с боковой поверхностью инъекционной сваи, определяется из (4.7) при условии, что  $\tau_0 = \tau_{max}$ :

$$N_f = 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot L \cdot \tau_{max}, \quad (4.11)$$

где  $\tau_{max}$  – максимальные значения касательных напряжений на контакте дренированного глинистого грунта с боковой поверхностью инъекционной сваи, определяемые из условия прочности Кулона-Мора (ГОСТ 12248-2010):

$$\tau_{max} = \sigma \cdot tg\varphi + c. \quad (4.12)$$

Применение закона Кулона-Мора для дренированного глинистого грунта и определения максимальных касательных напряжений  $\tau_{max}$  обусловлено тем, что при инъекции мелкозернистого бетона происходит отжатие поровой воды из околосвайного массива. Это подтверждается натурными испытаниями инъекционных свай в слабых водонасыщенных грунтах (супеси), выполненных Петуховым А. А. и др. [48]. В пределах зоны уплотнения грунта вокруг сваи (расстояние 0,5 м от ствола) наблюдались через 20–24 часа с момента ее устройства изменения влажности и плотности; влажность уменьшалась в 1,10–1,16 раза, а плотность увеличивалась в 1,04–1,08 раза.

Глинистый грунт вокруг ствола инъекционной сваи находится в уплотненном состоянии, которое сформировалось на этапе ее устройства. Поэтому условие (4.12) для определения максимальных значений касательных напряжений  $\tau_{max}$  можно записать в виде:

$$\tau_{max} = \sigma_r^{обж} \cdot tg\varphi_{упл} + c_{упл}, \quad (4.13)$$

где  $\sigma_r^{обж}$  – нормальное радиальное напряжение обжатия инъекционной сваи глинистым грунтом, кПа;  $c_{упл}$  и  $\varphi_{упл}$  – соответственно удельное сцепление (кПа) и угол внутреннего трения (град) уплотненного глинистого грунта основания вокруг ствола инъекционной сваи.

Вопросами оценки параметра  $\sigma_r^{обж}$  занимался Шалгинов Р. В. и др. (2008–2010 гг.) при разработке метода определения несущей способности инъекционных свай. Авторы настоящей статьи считают, что появление

напряжения обжатия  $\sigma_r^{\text{обж}}$  в грунте обусловлено действием давления инъекции  $p_{\text{и}} = 500\text{--}900$  кПа, при котором устраивается инъекционная свая. После завершения инъекции бетона происходит снижение напряжения  $\sigma_r^{\text{обж}}$  в течение определенного промежутка времени до значений примерно  $\sigma_r^{\text{обж}} = 50\text{--}100$  кПа [48]. Радиальное напряжение обжатия  $\sigma_r^{\text{обж}}$  предлагается определять по следующей формуле (рис. 4.4):

$$\sigma_r^{\text{обж}} = \sigma_{\text{ост}} + \sigma_0, \quad (4.14)$$

где  $\sigma_{\text{ост}}$  – остаточное напряжение в грунте;  $\sigma_0$  – горизонтальное напряжение от собственного веса грунта.

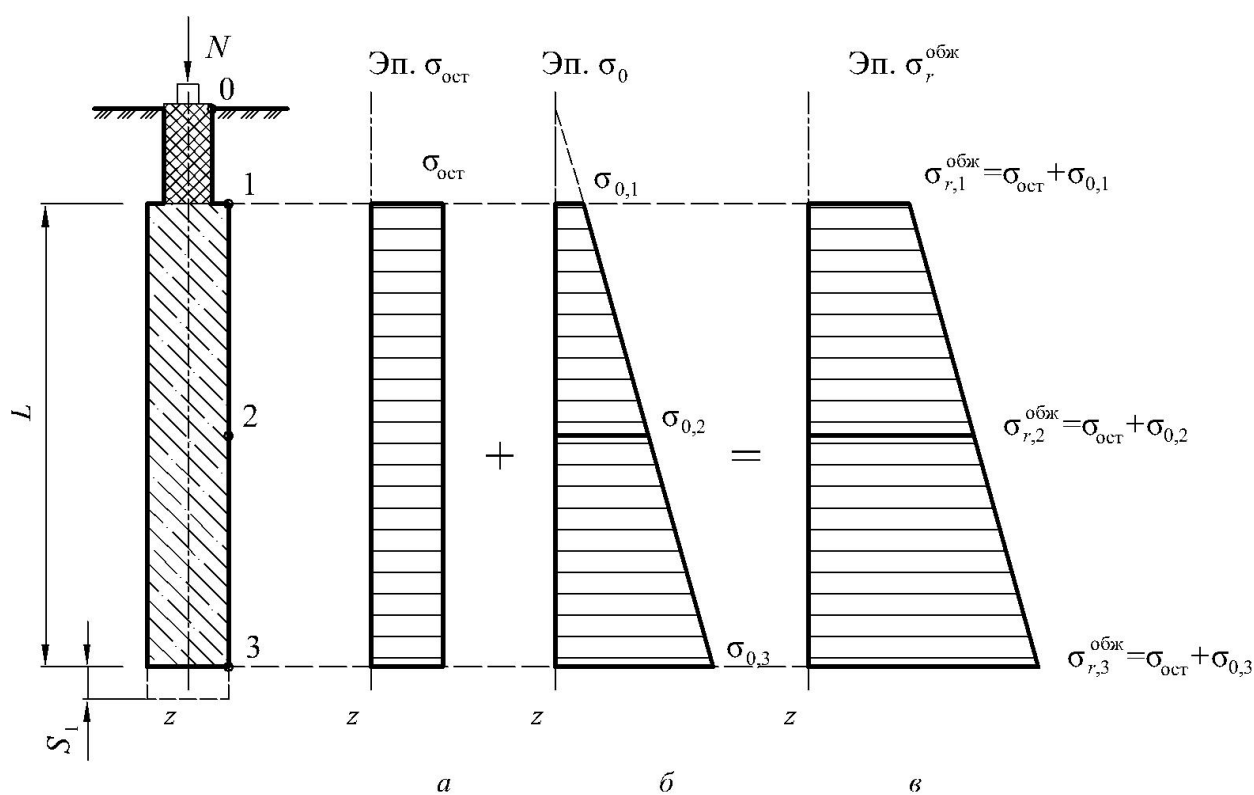


Рисунок 4.4 – Нормальное радиальное напряжение  $\sigma_r^{\text{обж}}$  в грунте вдоль боковой поверхности инъекционной сваи:

*a* – эпюра остаточных напряжений  $\sigma_{\text{ост}}$  вдоль стенки скважины, кПа; *б* – эпюра напряжений  $\sigma_0$  в грунте от его собственного веса, кПа; *в* – эпюра нормальных радиальных напряжений обжатия  $\sigma_r^{\text{обж}}$  инъекционной сваи глинистым грунтом, кПа

Остаточным  $\sigma_{\text{ост}}$  называется такое напряжение в грунте, которое образуется вдоль стенки расширяемой скважины после инъекции мелкозернистого бетона под давлением  $p_{\text{и}} = 500\text{--}900$  МПа и его релаксации. Величина  $\sigma_{\text{ост}}$  в глинистых грунтах, где устраивается инъекционная свая,

изменяется в пределах  $\sigma_{\text{ост}} = 25\text{--}60$  кПа. Величина  $\sigma_{\text{ост}}$  установлена экспериментально [48]. При этом меньшие значения  $\sigma_{\text{ост}}$  принимаются для глинистых грунтов менее прочных.

Горизонтальное напряжение в грунте  $\sigma_0$  – это напряжение от его собственного веса, определяемое по формуле:

$$\sigma_0 = \xi \cdot \sigma_{zg}, \quad (4.15)$$

здесь  $\xi$  – коэффициент бокового давления грунта, принимаемый равным для супесей 0,30–0,50, для глин и суглинков – 0,10–0,50 [95];  $\sigma_{zg}$  – вертикальное напряжение от собственного веса грунта.

При определении максимальных значений касательных напряжений  $\tau_{\text{max}}$  по формуле (4.13) используются характеристики удельного сцепления  $c_{\text{упл}}$  и угла внутреннего трения  $\varphi_{\text{упл}}$  уплотненного глинистого грунта вокруг ствола инъекционной сваи. Прочностные характеристики уплотненных глинистых грунтов при оценке работы инъекционных свай (длиной  $L = 3\text{--}5$  м, диаметром ствола  $d_{\text{св}} = 0,25\text{--}0,30$  м) предлагается определять по формулам [55]:

$$\begin{aligned} c_{\text{упл}} &= K_c \cdot c; \\ \varphi_{\text{упл}} &= K_\varphi \cdot \varphi, \end{aligned} \quad (4.16)$$

где  $c$ ,  $\varphi$  – соответственно удельное сцепление (кПа) и угол внутреннего трения (град) глинистого грунта естественного сложения;  $K_c$ ,  $K_\varphi$  – безразмерные коэффициенты, принимаемые по таблице 2.2.

Значения коэффициентов  $K_c$ ,  $K_\varphi$  установлены экспериментально на основе сопоставления результатов испытаний прочности и деформируемости естественных и уплотненных глинистых грунтов, а также использования других опубликованных данных [50, 55, 96 и др.].

Нагрузка  $N_R$  в условии (4.1) может быть определена по следующей формуле для жесткого круглого штампа [3, 4, 5]:

$$S_R = \frac{N_R \cdot (1 - \mu)}{4 \cdot G \cdot r_0}, \quad (4.17)$$

откуда:

$$N_R = \frac{4 \cdot G \cdot r_0 \cdot S_R}{(1 - \mu)}. \quad (4.18)$$

Таким образом, получены формулы (4.1) и (4.9) для расчета нагрузки  $N_1$  и осадки  $S_1$  инъекционной сваи на первом этапе ее нагружения.

На втором этапе нагружения инъекционной сваи, при котором нагрузка  $N$  превышает значение  $N_1$ , происходит проскальзывание ее боковой поверхности относительно околосвайного массива грунта. Дальнейшее приращение осадки инъекционной сваи  $\Delta S$  от действия нагрузки  $\Delta N = N - N_1$  осуществляется за счет активного включения в работу нижнего конца инъекционной сваи. При этом, зависимость осадки инъекционной сваи  $S$  от нагрузки  $N$  после достижения нагрузки  $N_1$  ( $N > N_1$ ) приобретает нелинейный характер (рис. 4.2).

Для расчета приращения осадки  $\Delta S$  от действия нагрузки  $\Delta N$  (рис. 4.2, б) воспользуемся методом Малышева–Никитиной [28]. Метод разработан для определения осадок фундаментов на естественном основании с учетом нелинейной работы грунта основания и гиперболической зависимости между осадкой фундамента и давлением по его подошве. В соответствии с методом Малышева–Никитиной расчетная осадка  $S$  при давлении  $p$  составит:

$$S = \bar{S} \cdot \frac{p \cdot (p_2 - p_1) - p_1 \cdot (p - p_1)}{p_1 \cdot (p_2 - p)}, \quad (4.19)$$

где  $p_1$  – начальное давление на грунт основания, при котором возникают области локального разрушения грунта (зоны сдвигов), кПа;  $p_2$  – давление, при котором происходит исчерпание несущей способности основания фундамента, кПа;  $\bar{S}$  – осадка фундамента при давлении  $p_1$ , м;  $p$  – давление на грунт основания, при значении которого рассчитывается осадка  $S$ , кПа.

В формуле (4.19) заменим  $p_1$  и  $p_2$  на нагрузки, которые передаются через нижний конец инъекционной сваи соответственно в конце первого (нагрузка  $N_R$ ) и второго (нагрузка  $N_n$ ) этапов ее нагружения. Давление  $p$  заменяем нагрузкой  $\Delta N$ . Значение нагрузки  $N_R$  устанавливается в соответствии с

условием (4.18),  $N_n$  – согласно алгоритму п. 5.7.11 СП 22.13330.2016. Такое преобразование было впервые выполнено Максимовым Ф. А. при расчете осадки винтовой двухлопастной сваи (2017) [26]. В результате замены составляющих формулы (4.19) получаем формулу для определения приращения осадки  $\Delta S$  от действия нагрузки  $\Delta N = N - N_1$  в диапазоне значений  $N_1 < N < N_2$  (рис. 4.2):

$$\Delta S = S_1 \cdot \frac{\Delta N \cdot (N_n - N_R) - N_R \cdot (\Delta N - N_R)}{N_R \cdot (N_n - \Delta N)}. \quad (4.20)$$

Конечная осадка  $S_o$  инъекционной сваи от действия внешней нагрузки  $N$  с учетом (4.4) составит:

$$S_o = S_1 + \Delta S = S_1 + S_1 \cdot \frac{\Delta N \cdot (N_n - N_R) - N_R \cdot (\Delta N - N_R)}{N_R \cdot (N_n - \Delta N)}. \quad (4.21)$$

Таким образом, полученное уравнение (4.21) позволяет прогнозировать конечные осадки  $S$  инъекционных свай в глинистых грунтах. Оно учитывает линейную и нелинейную зависимость перемещения (осадки) сваи от прикладываемой внешней нагрузки  $N$  и позволяет оценить их работу в широком диапазоне нагружения [51, 59, 104].

Для обоснования разработанного метода определим расчетную осадку  $S_o$  одиночной инъекционной сваи в соответствии с представленным выше алгоритмом и сопоставим полученный результат с данными натурных испытаний, проведенных Петуховым А. А. [48].

**Исходные данные.** Дно котлована относительно уровня планировки строительной площадки расположено на глубине 2,6 м. Инъекционная свая выполнена длиной  $L = 4$  м; диаметр металлического наконечника инъектора составляет 190 мм, диаметр сваи  $d_{св} = 250$  мм. Нагружение инъекционной сваи осуществлялось вертикальной статической вдавливающей нагрузкой. По результатам испытаний установлена зависимость осадки сваи от прикладываемой нагрузки (рис. 4.5). Строительная площадка сложена слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами – насыпной грунт (мощность 1,8 м), супесь пластичная ИГЭ-1 (мощность 1,5 м), супесь текучая

ИГЭ-2 (мощность 8,6 м). Физико-механические характеристики грунтов строительной площадки следующие. Удельный вес насыпного грунта  $\gamma_0 = 19,5 \text{ кН/м}^3$ . Супесь пластичная ИГЭ-1: удельный вес грунта  $\gamma_1 = 20,3 \text{ кН/м}^3$ ; удельное сцепление грунта  $c = 27 \text{ кПа}$ ; угол внутреннего трения грунта  $\varphi = 23^\circ$ ; модуль деформации грунта, полученные по результатам компрессионных испытаний  $E_k = 6,0 \text{ МПа}$ . Супесь текучая ИГЭ-2: удельный вес грунта  $\gamma_2 = 20,2 \text{ кН/м}^3$ ; удельное сцепление грунта  $c = 6 \text{ кПа}$ ; угол внутреннего трения грунта  $\varphi = 22^\circ$ ; модуль деформации грунта, полученные по результатам компрессионных испытаний  $E_k = 4,5 \text{ МПа}$ .

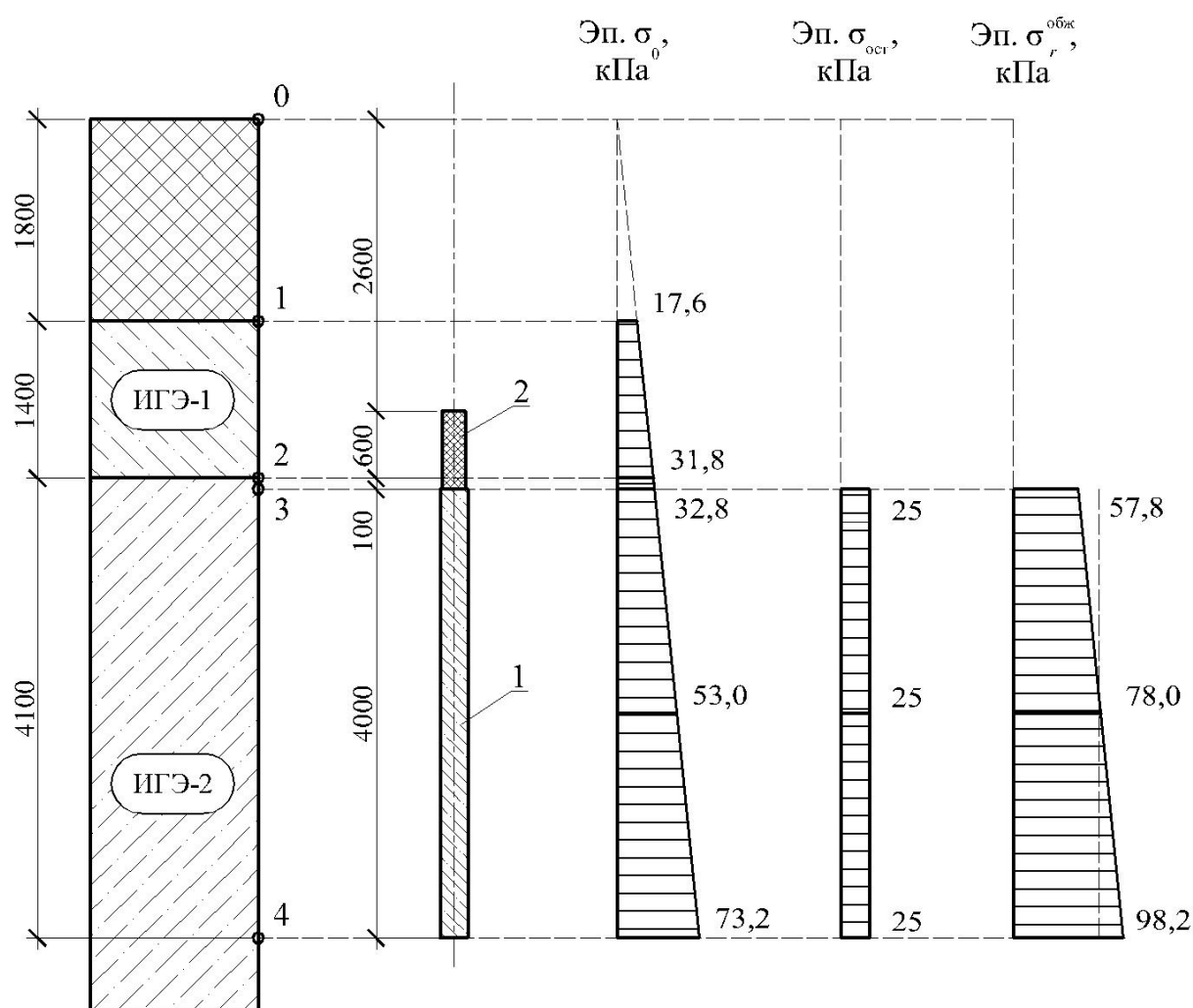


Рисунок 4.5 – Эпюры напряжений в грунте вдоль инъекционной сваи на рассматриваемой строительной площадке:  
1 – тело инъекционной сваи; 2 – тампонаж из цементно-песчаного раствора

**Решение.** Расчет осадки одиночной инъекционной сваи в глинистом грунте ведем в следующей последовательности:

1. В соответствии с данными инженерно-геологических изысканий на рассматриваемой строительной площадке, инъекционная свая устраивается в инженерно-геологическом элементе №2 (ИГЭ-2) – супесь текучая (рис. 4.5).

2. Определяем по формуле (4.9) осадку инъекционной сваи  $S_1$  на первом этапе ее нагружения. Для этого:

2.1. Определяем нормальное радиальное напряжение обжатия  $\sigma_r^{\text{обж}}$  инъекционной сваи глинистым грунтом. Для этого находим вертикальные напряжения в грунте  $\sigma_{zg}$  от его собственного веса, используя исходные данные (см. выше):

$$\sigma_{zg1} = \gamma_0 \cdot h_1 = 19,5 \cdot 1,8 = 35,1 \text{ кПа.}$$

По аналогии устанавливаем:  $\sigma_{zg2} = 63,5$  кПа;  $\sigma_{zg3} = 65,5$  кПа;  $\sigma_{zg4} = 146,3$  кПа.

Определяем горизонтальные напряжения в грунте  $\sigma_0$  от его собственного веса, используя формулу (4.15) и данные о значениях коэффициента бокового давления [95]:

$$\sigma_{01} = \xi_1 \cdot \sigma_{zg1} = 0,5 \cdot 35,1 = 17,6 \text{ кПа.}$$

По аналогии устанавливаем:  $\sigma_{02} = 31,8$  кПа;  $\sigma_{03} = 32,8$  кПа;  $\sigma_{04} = 73,2$  кПа.

Горизонтальное напряжение в грунте  $\sigma_{0,\text{ср}}$  от его собственного веса в середине рассматриваемого участка вдоль ствола инъекционной сваи длиной  $L = 4$  м составит (рис. 4.5):  $\sigma_{0,\text{ср}} = 53$  кПа.

Остаточное напряжение  $\sigma_{\text{ост}}$  вдоль боковой поверхности инъекционной сваи в соответствии с приведенными выше рекомендациями принимаем равным  $\sigma_{\text{ост}} = 25$  кПа. Тогда нормальное радиальное напряжение обжатия  $\sigma_r^{\text{обж}}$  инъекционной сваи глинистым грунтом по (4.14) составит:

$$\sigma_r^{\text{обж}} = \sigma_{\text{ост}} + \sigma_{0,\text{ср}} = 25 + 53 = 78 \text{ кПа.}$$

Результаты расчетов представлены в виде эпюр напряжений в грунте (рис. 4.5).

2.2. Определяем касательное напряжение  $\tau_{max}$  на контакте грунта с боковой поверхностью инъекционной сваи. Для этого устанавливаем значения прочностных характеристик, используя формулу (4.16) и данные таблицы 2.2:  $c_{упл} = 6,3$  кПа;  $\phi_{упл} = 22,9$  кПа. Значение касательного напряжения  $\tau_{max}$  на контакте грунта с боковой поверхностью инъекционной сваи, согласно формуле (4.13), составляет  $\tau_{max} = 39,2$  кПа.

2.3. Определяем по формуле (4.11) часть внешней нагрузки  $N_f$ , воспринимаемой боковой поверхностью инъекционной сваи:  $N_f = 123,1$  кН.

2.4. Определяем осадку инъекционной сваи  $S_1$  на первом этапе ее нагружения. Для этого предварительно, используя формулу (4.8), устанавливаем значение радиуса влияния  $r_m$ . В рассматриваемом случае для слабого глинистого грунта принимаем расстояние от оси сваи до границы, где вертикальные перемещения грунта равны нулю, равное 7 радиусов сваи. Тогда значение  $r_m$  составит  $r_m = 0,875$  м. Далее определяем по формуле (4.10) значение модуля сдвига грунта  $G$  для линейного участка работы инъекционной сваи:  $G = 2,37$  МПа. По формуле (4.9) осадка  $S_1$  составит:  $S_1 = 4,0$  мм.

3. Определяем приращение осадки инъекционной сваи  $\Delta S$  на втором этапе ее нагружения. Для этого:

3.1. Рассчитываем по формуле (4.18) часть внешней нагрузки  $N_R$ , передаваемой на грунт основания нижним концом сваи на этапе окончания линейной зависимости  $S = f(N)$ :  $N_R = 7,1$  кН.

3.2. Определяем предельную нагрузку  $N_n$ , передаваемую на грунт нижним концом инъекционной сваи и соответствующей потере ее несущей способности по грунту, используя п. 5.7.11 СП 22.13330.2016:  $N_u = 159,2$  кН.

3.3. Рассчитываем приращение осадки  $\Delta S$  по формуле (4.20):

$$\Delta S = S_1 \cdot \frac{\Delta N \cdot (N_n - N_R) - N_R \cdot (\Delta N - N_R)}{N_R \cdot (N_n - \Delta N)} =$$

$$= 0,004 \cdot \frac{9,8 \cdot (159,2 - 7,1) - 7,1 \cdot (9,8 - 7,1)}{7,1 \cdot (159,2 - 9,8)} = 0,0056 \text{ м} = 5,6 \text{ мм},$$

где  $\Delta N = N - N_1 = N - (N_f + N_R) = 140 - (123,1 + 7,1) = 9,8 \text{ кН}$ ;

4. Определяем конечную осадку  $S_o$  инъекционной сваи от действия внешней нагрузки  $N$  по формуле (4.21):

$$S_o = S_1 + \Delta S = 4,0 + 5,6 = 9,6 \text{ мм}.$$

Таким образом, осадка одиночной инъекционной сваи при нагрузке  $N = 140 \text{ кН}$  составляет  $S_o = 9,6 \text{ мм}$ . Полученные данные по осадке сваи на первом и втором этапах нагружения сопоставляем с результатами натуральных испытаний (рис. 4.6). Сравнение осадок показывает удовлетворительную сходимость (порядка 25–40%) данных натуральных испытаний сваи и расчетных по предлагаемому методу.

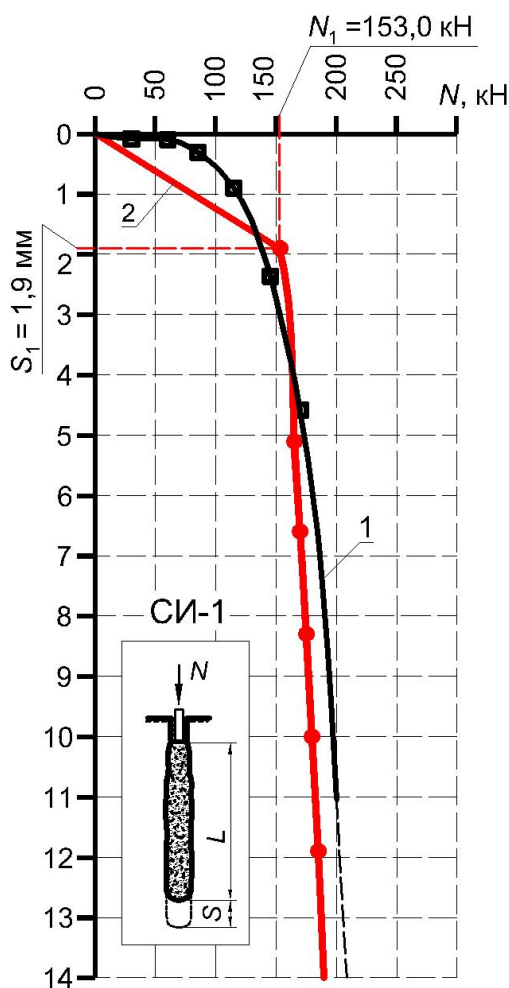


Рисунок 4.6 – Графики зависимости осадки одиночной инъекционной сваи от прикладываемой вертикальной вдавливающей статической нагрузки: 1 – по данным натуральных испытаний [48]; 2 – по результатам инженерного расчета

#### 4.2. Обоснование инженерного метода определения конечной осадки фундаментов мелкого заложения при их усилении инъекционными сваями в условиях реконструкции зданий

При определении расчетной осадки фундамента  $S_{\text{рек}}$  реконструируемого здания (после его усиления инъекционными сваями) необходимо учитывать следующие составляющие:

– конечные осадки  $S_o$  одиночных инъекционных свай (от действующей доли внешней нагрузки), которые можно оценить в соответствии с п. 4.1;

– дополнительные перемещения (осадки) грунта под подошвой существующего фундамента мелкого заложения в связи с уменьшением его опорной площади за счет устройства отверстий в плитной части для инъекционных свай;

– изменение напряженного-деформированного состояния основания под подошвой фундамента и улучшение его свойств в пределах глубины  $(0,5-1,0)b$  ( $b$  – ширина подошвы фундамента).

Тогда, с учетом вышеизложенного, осадку  $S_{\text{рек}}$  можно установить из условия:

$$S_{\text{рек}} = S_o \cdot k_n + S_{\text{ф}} \cdot (k_d - 1), \quad (4.22)$$

где  $S_o$  – конечная осадка одиночной инъекционной сваи, определяемая по условию (4.21), мм;  $S_{\text{ф}}$  – расчетная осадка существующего фундамента мелкого заложения до реконструкции здания, мм;  $k_d$  – безразмерный коэффициент, учитывающий дополнительные перемещения (осадки) грунта под подошвой существующего фундамента мелкого заложения в связи с уменьшением его опорной площади за счет устройства отверстий в плитной части для инъекционных свай;  $k_n$  – безразмерный коэффициент, учитывающий изменение напряженного-деформированного состояния основания под подошвой фундамента и улучшение его свойств в пределах глубины  $(0,5-1,0)b$  ( $b$  – ширина подошвы фундамента).

Расчетную осадку фундамента  $S_{\text{ф}}$  мелкого заложения реконструируемого здания рекомендуется определять методом послойного суммирования

(СП 22.13330.2016) в предположении начала его строительства (до реконструкции). Могут использоваться и другие методы расчета осадок при их соответствующем обосновании [55, 84, 95, 97].

Значения коэффициента  $k_d$ , учитывающего дополнительные перемещения (осадки) грунта при устройстве инъекционных свай, устанавливались по результатам аналитических исследований. На этапе усиления фундамента происходит повышение давления  $p$  по подошве (от  $p_1$  до  $p_2$ ) и изменение напряженного состояния основания за счет уменьшения ее площади  $A$  при образовании скважин под инъекционные сваи. Уменьшение площади опирания фундамента  $A$  на основание при возрастающем давлении  $p$  по подошве являются основной причиной развития дополнительных перемещений (осадок) грунта. При этом наибольшие их значения проявляются в слабых водонасыщенных глинистых грунтах (текучей и текучепластичной консистенции) [48, 55, 84 и др.] (рис. 4.7, 4.8).

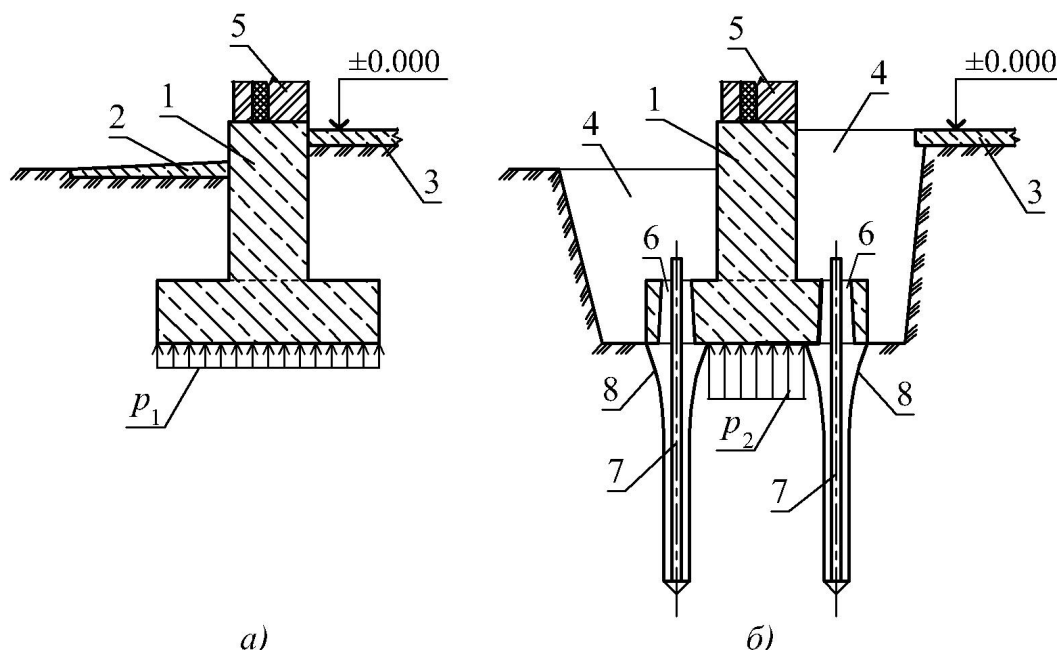


Рисунок 4.7 – Изменение схемы работы фундамента мелкого заложения при устройстве скважин под инъекционные сваи непосредственно под его подошвой:  
*a* – схема работы фундамента до его усиления; *б* – то же на этапе его усиления;  
 1 – фундамент мелкого заложения; 2 – водонепроницаемая отмостка; 3 – бетонный пол по грунту; 4 – шурф для выполнения работ по усилению фундамента; 5 – надземные строительные конструкции; 6 – коническое отверстие в плитной части фундамента для устройства инъекционной сваи; 7 – перфорированный инъектор; 8 – оплывание, потеря устойчивости стенок скважины;  $p_1$  – давление в уровне подошвы существующего фундамента до его усиления;  $p_2$  – то же на этапе его усиления

Для определения значений коэффициента  $k_d$  вначале были выполнены аналитические расчеты конечных осадок отдельного фундамента до его усиления методом послойного суммирования (по СП 22.13330.2016). Расчеты проводились для фундамента с заданными размерами в плане, устроенного на однородном мягкопластичном суглинке при давлении по подошве 150 и 200 кПа. Затем выполнялись аналогичные расчеты, но для меньшей площади подошвы  $A$  фундамента, которая сформировалась за счет устройства инъекционных свай. Результаты сопоставления осадок и их анализ позволили получить значения коэффициентов  $k_d$ , которые изменяются в пределах  $k_d = 1,01–1,13$  (табл. 4.1).

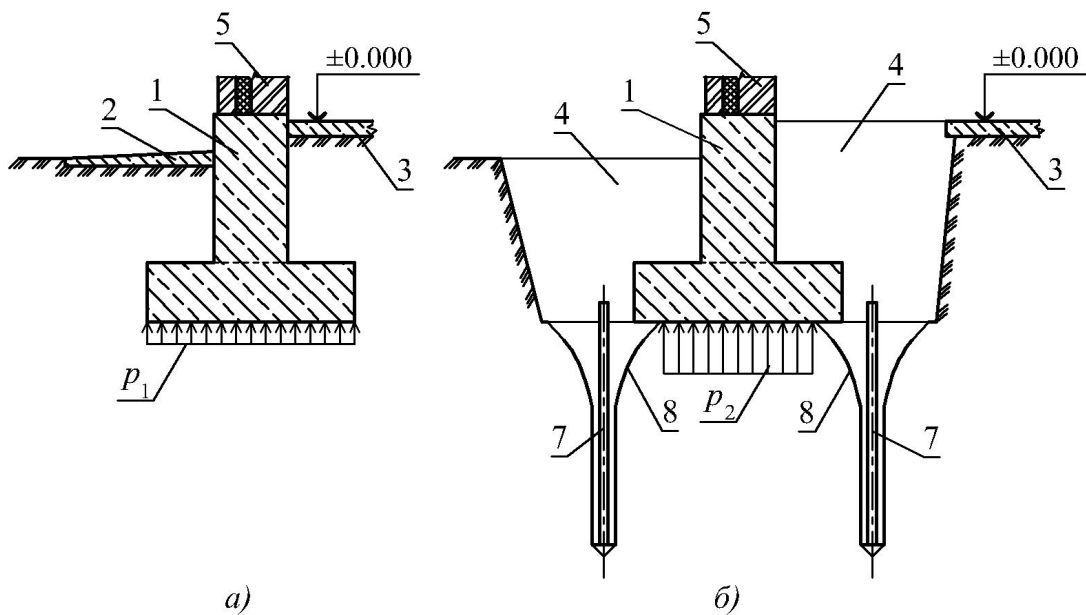


Рисунок 4.8 – Изменение схемы работы фундамента мелкого заложения при устройстве скважин под инъекционные сваи по периметру (контуру) его подошвы:  
*a* – схема работы фундамента до его усиления; *б* – то же на этапе его усиления;  
 1 – фундамент мелкого заложения; 2 – водонепроницаемая отмостка; 3 – бетонный пол по грунту; 4 – шурф для выполнения работ по усилению фундамента; 5 – надземные строительные конструкции; 6 – перфорированный иньектор; 7 – оплывание, потеря устойчивости стенок скважины;  $p_1$  – давление в уровне подошвы существующего фундамента до его усиления;  $p_2$  – то же на этапе его усиления

Коэффициент  $k_n$  показывает изменение напряженного (деформированного) состояния основания под подошвой усиливаемого фундамента и улучшение его свойств в пределах глубины  $(0,5–1,0)b$  ( $b$  – ширина фундамента) в массиве грунта между стволами устроенных инъекционных свай от действия внешней вертикальной нагрузки (рис. 4.9). Значения коэффициента  $k_n$ , уста-

навливались на основе аналитических (тестовых) расчетов и архивных экспериментальных данных [55, 65 и др.]. Для определения  $k_n$  выполнялись тестовые расчеты (в соответствии с п. 4.1) в предположении действия на них внешней нагрузки двух типов:

- при обжатии сваи давлением грунта основания естественного сложения от его собственного веса (до начала строительства здания);
- при обжатии давлением уплотненного грунта основания от его собственного веса и давлением грунта основания от подошвы существующего фундамента (после завершения строительства здания).

Таблица 4.1 – Коэффициенты  $k_d$  для оценки технологических перемещений грунта при устройстве инъекционных свай

Площадь подошвы фундамента, м <sup>2</sup>	Значения коэффициента $k_d$ при модуле деформации грунта $E$ в основании подошвы фундамента реконструируемого здания, МПа			
	6	9	12	15
2,25	1,13	1,11	1,09	1,07
4,0	1,08	1,06	1,04	1,03
6,25	1,06	1,04	1,03	1,02
9,0	1,05	1,03	1,02	1,01

По результатам тестовых расчетов осадок инъекционных свай было установлено, что значения коэффициентов  $k_n$  для рассматриваемых фундаментов изменяются в пределах  $k_n = 0,93–0,98$ . Для слабых глинистых грунтов (текучей и текучепластичной консистенции) коэффициент  $k_n$  имеет большие значения.

Таким образом, разработанный метод позволяет определить конечную осадку фундамента мелкого заложения (отдельного, ленточного), усиливаемого инъекционными сваями, по формуле (4.22), учитывая при этом влияние конструктивных факторов устройства инъекционных свай, а также изменение физико-механических свойств глинистых грунтов [52].

Для обоснования инженерного метода расчета осадок усиливаемых фундаментов в глинистом грунте были использованы данные геотехнического мониторинга, который проводился в 2016 г. (ООО «ГЕОФОНД+», г. Тюмень)

[20]. Мониторинг был организован на объекте «Третья городская больница горздравоотдела» (г. Тюмень, ул. Даудельная, 1, литера А). Рассматриваемое здание (рис. 4.10) является двухэтажным, кирпичным, с несущими продольными и поперечными стенами. Ленточные фундаменты здания усиливались буроинъекционными сваями длиной 5 м и диаметром 250 мм. Основание фундаментов сложено глинистыми грунтами (суглинки тугопластичные, мягкопластичные, текучепластичные). Наблюдение за осадками фундаментов осуществлялось при помощи 29 геодезических марок, которые были установлены в уровне отметок верха цоколя здания.

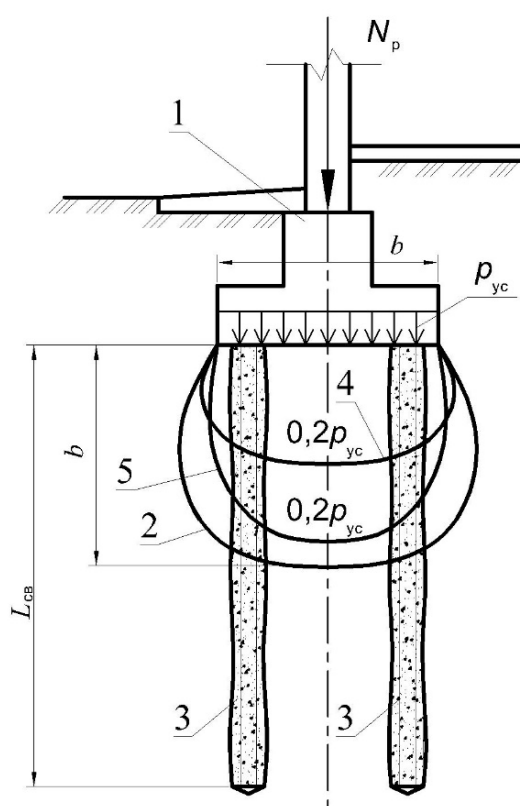


Рисунок 4.9 – Схема изобар в глинистом грунте под подошвой усиленного фундамента:  
 1 – существующий отдельный фундамент; 2 – контур зоны уплотненного грунта под плитной частью фундамента длительно эксплуатируемого здания; 3 – инъекционная свая; 4, 5 – соответственно, изобары в суглинке туго- и текучепластичном;  
 $p_{yc}$  – давление под подошвой усиленного фундамента

Сопоставление расчетных данных осадок (в соответствии с разработанным методом) с результатами мониторинга за осадками здания выполнялось в следующей последовательности:

1. На основе данных испытаний статическими вдавливающими нагрузками

контрольных буринъекционных свай [42] выполнялись расчеты осадки инъекционных свай по (4.21) с аналогичными геометрическими параметрами (длина, диаметр) в заданных инженерно-геологических условиях площадки [40].

2. По результатам сопоставления данных натуральных испытаний с расчетными значениями осадок инъекционных свай выводился корректирующий коэффициент, учитывающий технологию устройства свай.

3. Рассчитывались осадки усиленного ленточного фундамента по (4.22) с учетом его конструктивных решений [42] и инженерно-геологических условий площадки строительства [40].

4. Сопоставление результатов расчета конечных осадок усиленного фундамента по (4.22) с данными геотехнического мониторинга [20].



а)



б)

Рисунок 4.10 – Общий вид объекта «3-я городская больница горздравотдела», расположенного по адресу: г. Тюмень, ул. Даудельная, 1 литера А (по данным ООО «ГЕОФОНД+», г. Тюмень):  
1 – до реконструкции; 2 – после реконструкции

В результате сравнения расчетных осадок ленточного фундамента на участке по оси 4, А-Д после его усиления буринъекционными сваями с данными геодезических наблюдений за их вертикальным перемещением установлена сходимость порядка 20–27 % (рис. 4.11, табл. 4.2). Полученные результаты позволяют говорить о применимости инженерного метода расчета осадок фундаментов в практике проектирования фундаментов реконструируемых зданий и сооружений.

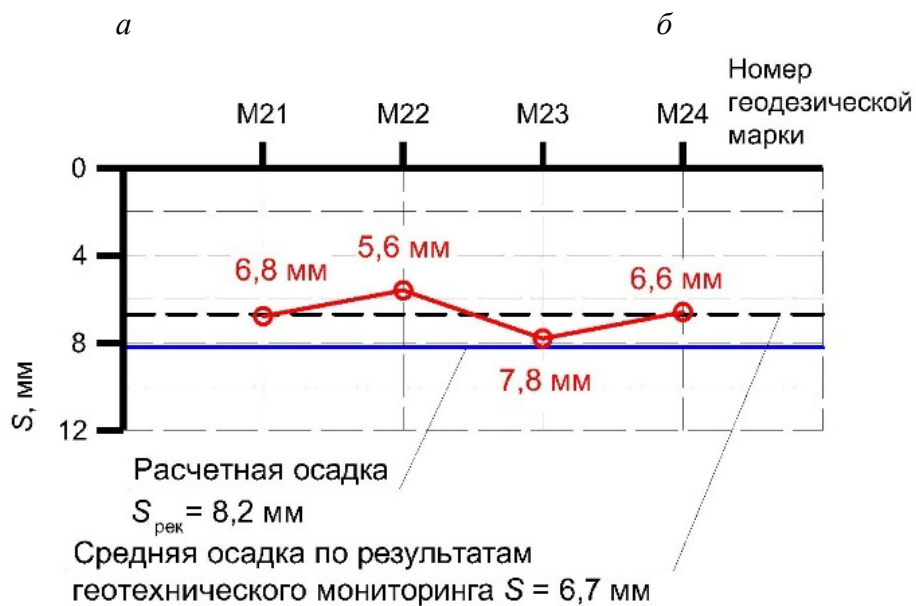
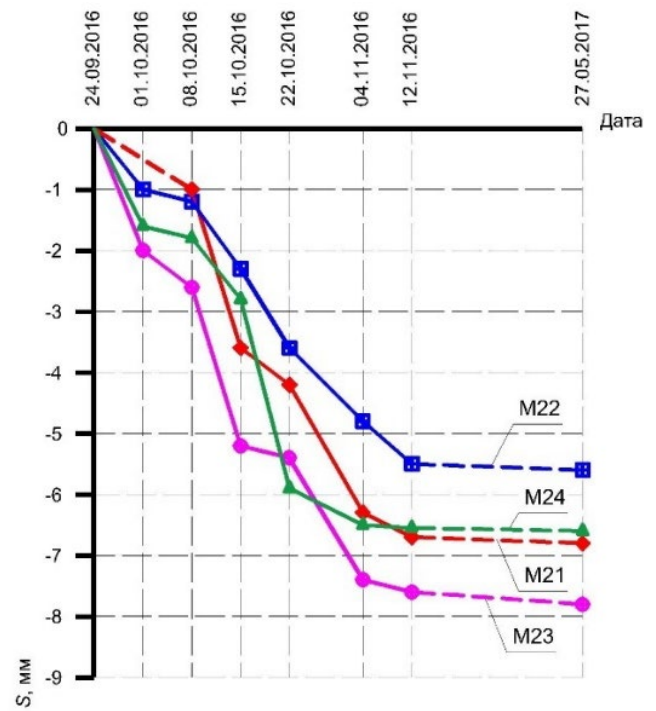
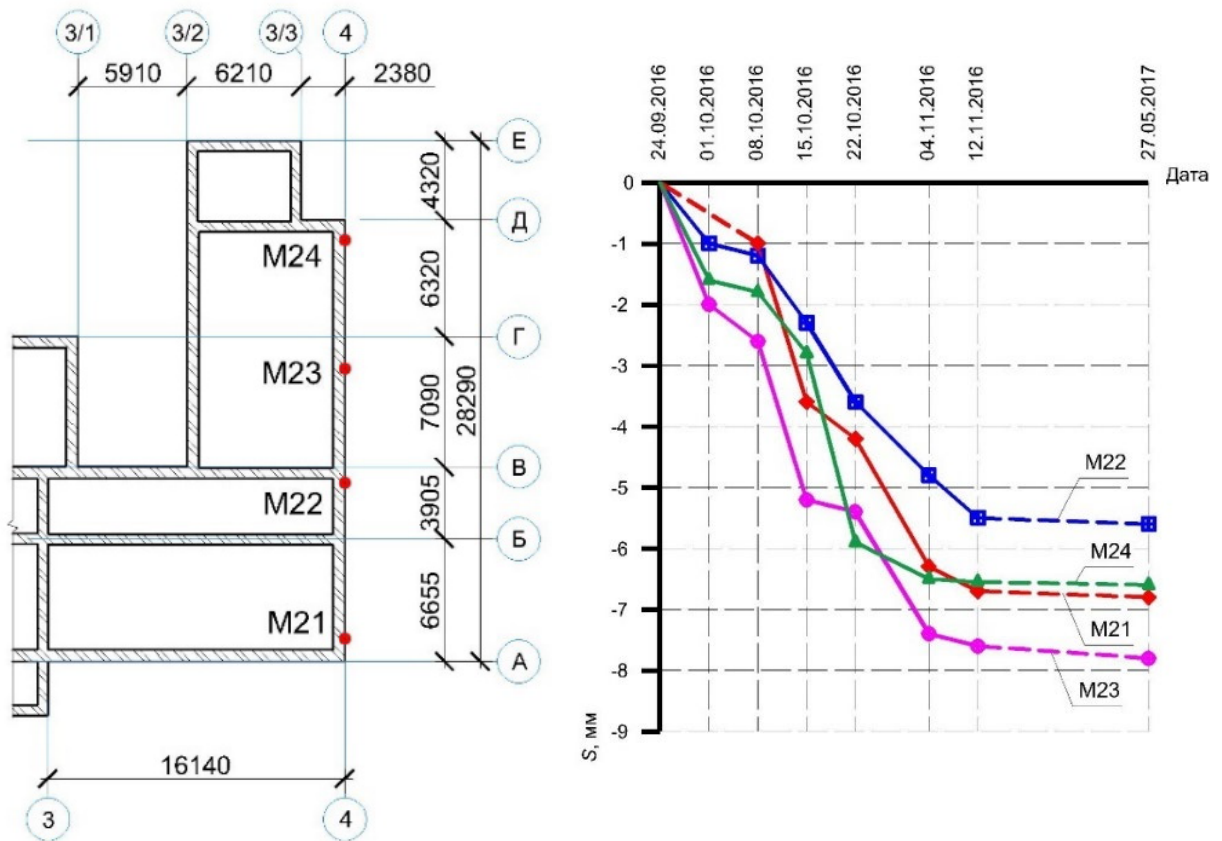


Рисунок 4.11 – Сопоставление данных инструментального наблюдения за осадками фундамента ( $S$ , мм) по оси 4, А-Д объекта «3-я городская больница горздравоотдела», г. Тюмень, ул. Даудельная, 1, литера А (27.05.2017 г.; ООО «ГЕОФОНД+», г. Тюмень) с результатами расчета ( $S_{рек}$ , мм) по предлагаемому методу:  
*а* – схема расположения геодезических марок на плане здания; *б* – графики наблюдения за вертикальными перемещениями (осадками) геодезических марок М21, М22, М23, М24;  
*в* – результаты сопоставления расчетной осадки с данными инструментального наблюдения

Таблица 4.2 – Сопоставление результатов расчета осадок фундамента после его усиления сваями с данными мониторинга на участке по оси 4, А-Д

Но- мер марки	Вертикальные перемещения фундамента, усиленного буроинъекционными сваями, по данным мониторинга (данные на 27.05.2017)		Результаты расчета по предлагаемому инженерному методу, мм
	осадка на участках расположения марок, мм	средняя осадка на участке 4, А-Д, мм	
М21	6,8	6,7	8,2
М22	5,6		
М23	7,8		
М24	6,6		

**Пример расчета осадки усиливаемого отдельного фундамента.** Необходимо определить осадку  $S_{рек}$  усиливаемого отдельного фундамента. Конструктивная схема здания – каркасная. Реконструируемое гражданское здание эксплуатируется 20 лет.

**Исходные данные.** Ширина подошвы существующего отдельного железобетонного квадратного в плане фундамента  $a_{\phi} = b_{\phi} = 1,5$  м, глубина заложения  $d = 1$  м; вертикальная внешняя нагрузка, действующая в уровне подошвы фундамента до реконструкции, составляет  $N_{\phi} = 390$  кН, после реконструкции –  $N_p = 850$  кН. Строительная площадка сложена глинистыми грунтами (рис. 4.12):

- насыпной грунт, преимущественно глинистый (мощность 0,4 м);
- супесь текучая ИГЭ-1 (мощность 0,9 м);
- суглинок мягкопластичный ИГЭ-2 (мощность 12,6 м).

Физико-механические характеристики грунтов строительной площадки следующие. Для слоя супеси текучей (ИГЭ-1): удельный вес грунта составляет  $\gamma_1 = 19,5$  кН/м<sup>3</sup>, удельное сцепление грунта  $c = 10$  кПа; угол внутреннего трения грунта  $\varphi = 8$  град; модуль деформации грунта, установленный по результатам компрессионных испытаний  $E_k = 6,5$  МПа. Для слоя суглинка мягкопластичного (ИГЭ-2): удельный вес грунта  $\gamma_2 = 20,3$  кН/м<sup>3</sup>; удельное сцепление грунта  $c = 14$  кПа; угол внутреннего трения грунта  $\varphi = 14$  град; коэф-

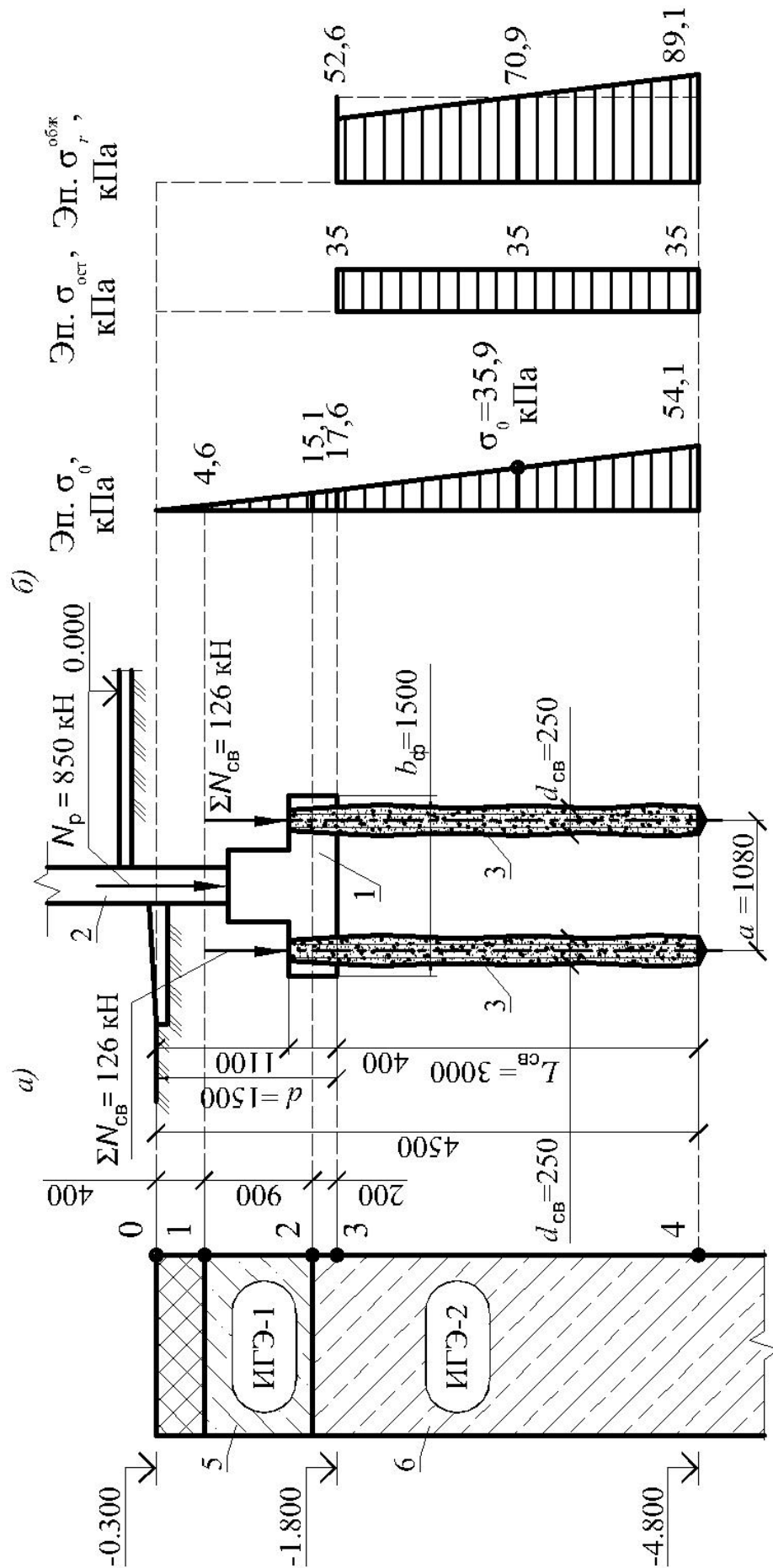


Рисунок 4.12 – Расчетная схема усиленного отдельного фундамента реконструируемого здания (а) и эпюры напряжений в грунте основания (б):

- 1 – существующий отдельный фундамент (до его усиления) с размерами в плане  $1500 \times 1500$  мм;
- 2 – колонна реконструируемого здания; 3 – инъекционная свая длиной  $L_{св} = 3000$  мм, диаметром  $d_{св} = 250$  мм; 4 – насыпной грунт мощностью 0,4 м; 5 – суспензия текущая ИГЭ-1 мощностью 0,9 м; 6 – суглинок мягкопластичный ИГЭ-2 мощностью 12,6 м

коэффициент пористости грунта  $e = 0,85$ ; модуль деформации грунта, установленный по результатам компрессионных испытаний  $E_k = 7,0$  МПа. Несущим слоем грунта основания для устройства инъекционных свай является ИГЭ-2 – суглинок мягкопластичный. Расчетное сопротивление естественного (неуплотненного) грунта основания (суглинок мягкопластичный)  $R = 138$  кПа.

**Решение.**

1. Согласно п. 3.3 диссертации определяем доли внешней нагрузки на плитную часть  $D_{\text{п}}$  (%) и инъекционные сваи  $D_{\text{св}}$  (%) комбинированного фундамента. Для этого установим давление  $p_{\text{ф}}$  по подошве существующего отдельного фундамента до его усиления (но с учетом дополнительных нагрузок, которые будут действовать после реконструкции здания):

$$p_{\text{ф}} = \frac{N_{\text{р}}}{A} = \frac{850}{1,5 \cdot 1,5} = 377,8 > R = 138 \text{ кПа.}$$

Давление по подошве  $p_{\text{ф}}$  превышает расчетное сопротивление грунта основания  $R$  ( $p_{\text{ф}} > R$ ), следовательно, требуется усиление фундамента. Принимаем решение по его усилению инъекционными сваями. Предполагается устроить 4 инъекционных сваи длиной  $L_{\text{св}} = 3$  м, диаметром  $d_{\text{св}} = 0,25$  м в углах отдельного фундамента через его плитную часть. Согласно принятым грунтовыми условиям строительной площадки и конструктивным решениям инъекционных свай, устанавливаем их несущую способность  $F_d = 170$  кН. Параметр  $F_d$  определяется расчетом или по результатам испытаний натуральных свай (СП 24.13330.2021).

При заданных параметрах свай вычисляем по формуле (3.6) давление по подошве фундамента после его усиления  $p_{\text{ус}}$  (с учетом данных табл. 2 Приложения Г), которое является предварительным [49, 63]:

$$p_{\text{ус}} = a_1 \cdot p_{\text{ф}}^2 + a_2 \cdot p_{\text{ф}} + a_3 = 0,00128 \cdot 377,8^2 + 0,172 \cdot 377,8 + 53,2 = 300,9 \text{ кПа} \approx 301 \text{ кПа.}$$

Условие  $p_{yc} < R$  не выполняется ( $301 \text{ кПа} > 138 \text{ кПа}$ ), поэтому устанавливаем разницу давления  $\Delta p_{yc}$  (приращение давления  $\Delta p_{yc}$ ) по подошве усиленного фундамента  $p_{yc}$  и расчетным сопротивлением  $R$  грунта основания:  $\Delta p_{yc} = p_{yc} - R = 301 - 138 = 163 \text{ кПа}$ . Эту разницу ( $\Delta p_{yc} = 163 \text{ кПа}$ ) распределяем на инъекционные сваи, которые будут использоваться для усиления фундамента.

Переведем значение приращения давления  $\Delta p_{yc}$  (кПа) в значение, соответствующее приращению сосредоточенной нагрузки на фундамент  $\Delta N_{yc}$  (кН). При этом учитываем, что площадь подошвы существующего фундамента  $A$  составляет  $A = 1,5 \cdot 1,5 = 2,25 \text{ м}^2$ , а ее площадь после размещения свай равна  $A_p = 2,25 - 4 \cdot 0,05 = 2,05 \text{ м}^2$ . Тогда  $\Delta N_{yc}$  на фундамент:

$$\Delta N_{yc} = \Delta p_{yc} \cdot A_p = 163 \cdot 2,05 = 334,2 \text{ кН},$$

а приращение нагрузки  $\Delta N_{cb}$  на каждую из четырех свай составит:

$$\Delta N_{cb} = \frac{\Delta N_{yc}}{4} = \frac{334,2}{4} = 83,6 \text{ кН}.$$

При известном значении предварительного давления  $p_{yc} = 301 \text{ кПа}$  по подошве фундамента после его усиления, доля нагрузки  $D_n$  (%), передаваемая на грунт основания подошвой отдельного фундамента, устанавливается по формуле (3.7):

$$D_{под} = \frac{p_{yc} \cdot 100 \%}{p_{ф}} = \frac{301 \cdot 100 \%}{377,8} = 79,7 \% \approx 80 \%,$$

что соответствует нагрузке  $N_{ф} = 850 \cdot 0,8 = 680 \text{ кН}$ .

Доля нагрузки  $D_{cb}$  (%), передаваемая на грунт основания инъекционными сваями, определяем по формуле (3.8):

$$D_{cb} = 100 \% - D_{под} = 100 - 80 = 20 \%,$$

что соответствует нагрузке на четыре сваи  $4N_{cb} = 850 \cdot 0,2 = 170 \text{ кН}$ . При этом нагрузка на одну сваю  $N_{cb} = 170 / 4 = 42,5 \text{ кН}$ . Определяем суммарную нагрузку на каждую инъекционную сваю  $\Sigma N_{cb}$ , которая образуется за счет приращения сосредоточенной нагрузки  $\Delta N_{cb} = 83,6 \text{ кН}$  и нагрузки  $N_{cb} = 42,5 \text{ кН}$ :

$$\Sigma N_{\text{св}} = 83,6 + 42,5 = 126,1 \text{ кН} \approx 126 \text{ кН}.$$

Таким образом, установлено давление  $p_{\text{yc}}$  по подошве фундамента после его усиления, равное  $p_{\text{yc}} = N_{\text{ф}} / A_p = 680 / 2,05 = 331,7 \text{ кПа}$  и суммарная нагрузка  $\Sigma N_{\text{св}}$ , передаваемая на одну инъекционную сваю  $\Sigma N_{\text{св}} = 126 \text{ кН}$ . При этом условие  $\Sigma N_{\text{св}} < F_d$  выполняется ( $126 \text{ кН} < 170 \text{ кН}$ ).

2. Рассчитаем осадку  $S_{\text{рек}}$  усиливаемого отдельного фундамента по формуле (4.22). Расчетная осадка  $S_{\text{ф}}$  отдельного фундамента реконструируемого здания до его усиления, установленная по методу послойного суммирования согласно СП 22.13330.2016, составляет  $S_{\text{ф}} = 3,5 \text{ см}$ .

2.1. Значения коэффициента  $k_d$ , учитывающего дополнительные перемещения (осадки) грунта под подошвой существующего фундамента мелкого заложения в связи с уменьшением его опорной площади за счет устройства отверстий в плитной части для инъекционных свай, принимаем по таблице 4.1. Площадь подошвы существующего фундамента  $A$  составляет  $A = 2,25 \text{ м}^2$ , а ее площадь после размещения свай  $A_p = 2,05 \text{ м}^2$  (см. выше). Модуль деформации грунта основания составляет  $E = 7 \text{ МПа}$  (ИГЭ-2). Тогда, значение  $k_d = 1,12$ .

2.2. Определяем осадку  $S_o$  одиночной инъекционной сваи, используя формулу (4.21) в соответствии с указаниями п. 4.1 диссертации. Согласно данным инженерно-геологических изысканий на рассматриваемой строительной площадке, инъекционная свая устраивается в ИГЭ-2 – суглинке мягкопластичном (рис. 4.12). Для определения  $S_o$  устанавливаем осадки сваи  $S_1 = 0,14 \text{ см}$  и  $\Delta S = 2 \text{ см}$  на первом (линейном) и втором (нелинейном) этапах ее нагружения (рис. 4.2) по формулам (4.9) и (4.20) соответственно. Определяем конечную осадку  $S_o$  инъекционной сваи от действия внешней нагрузки  $N$ :

$$S_o = S_1 + \Delta S = 0,14 + 2 = 2,14 \text{ см}.$$

2.3. Для вычисления осадки  $S_{\text{рек}}$  установим значение коэффициента  $k_n$  для рассматриваемого фундамента. С учетом грунтовых условий (суглинок мягкопластичный, ИГЭ-2) коэффициент  $k_n = 0,95$ . Тогда при коэффициентах  $k_d = 1,12$  и  $k_n = 0,95$  устанавливаем расчетную осадку  $S_{\text{рек}}$ , используя формулу (4.22):

$$S_{\text{рек}} = S_o \cdot k_n + S_{\text{ф}}(k_{\text{тех}} - 1) = 2,14 \cdot 0,95 + \\ + 3,5(1,12 - 1) = 2,45 \text{ см} = 2,5 \text{ см}.$$

Таким образом, расчетом установлено, что конечная осадка  $S_{\text{рек}}$  отдельно стоящего фундамента, усиленного инъекционнымиися сваями, для реконструированного здания составляет 6,0 см.

### **4.3. Рекомендации по проектированию усиления отдельных и ленточных фундаментов инъекционными сваями для реконструируемых зданий**

Обобщение полученных в работе данных позволило разработать рекомендации по проектированию усиливаемых инъекционными сваями фундаментов (отдельных, ленточных) для реконструируемых зданий [54, 61, 66, 67, 78, 80]. Проектирование выполняется в последовательности, состоящей из ряда этапов [100]:

1. По результатам обследования [8] и использования архивной документации устанавливают **конструктивное решение существующих фундаментов**, конструктивную схему здания (сооружения), а также нагрузки, передаваемые на строительные конструкции до и после реконструкции (восстановления) здания.

2. **Оценка грунтовых условий** строительной площадки реконструируемого здания предусматривает обобщение результатов исследований свойств грунтов, состава подземных вод, полученных на стадии инженерно-геологических изысканий, и выявление возможности их использования в качестве оснований фундаментов [18, 62, 97].

3. **Выбор способа передачи дополнительной нагрузки на сваи.** Использование инъекционных свай для усиления фундаментов в условиях реконструкции зданий является эффективным способом передачи части нагрузки от надземных строительных конструкций на грунты основания [103]. Такие сваи могут устраиваться непосредственно под подошвой существующего фундамента (первый способ) или примыкающими по ее периметру (второй способ). При первом способе инъекционные сваи, устраиваемые непосредственно под

подошвой фундамента, передают часть внешней нагрузки на несущий слой грунта основания в пределах контура (периметра) подошвы существующего фундамента. По второму способу сваи устраиваются с наружной стороны контура (или периметра) подошвы существующего фундамента (ленточного и отдельного). Часть внешней нагрузки на несущий слой грунта основания при этом передается на примыкающие к фундаменту инъекционные сваи. Стык свай с телом фундамента (подошвы фундамента) устраивается обычно жестким и равнопрочным.

**4. Методика устройства и оценки несущей способности инъекционных свай.** При оценке работы свай в составе усиливаемого фундамента необходимо установить их вид по способу взаимодействия с грунтом (висячая свая, свая-стойка), учесть технологические особенности устройства и используемые при этом материалы [48, 62]. Для определения несущей способности инъекционных свай  $F_d$  по результатам их статических испытаний выбирается по инженерно-геологическому разрезу несущий слой грунта основания, в котором устраиваются их нижние концы. Выбор делается в пользу слоя грунта наиболее прочного, менее сжимаемого по сравнению с другими вышерасположенными инженерно-геологическими элементами. Слабые грунты (разновидности глинистых грунтов текучепластичной и текучей консистенции, рыхлые пески, торфы и др.) не рекомендуется использовать в качестве несущего слоя основания комбинированных фундаментов [53]. Несущая способность  $F_d$  висячей инъекционной сваи предварительно может быть установлена аналитически по физико-механическим характеристикам грунтов основания (СП 24.13330.2021). В работах Петухова А. А. [48], Шалгинова Р. В. [96], Тарасова А. А. [57, 87, 88] представлен аналитический метод определения  $F_d$ , который в настоящее время проходит апробацию и также может использоваться для предварительной оценки несущей способности инъекционных свай.

**5. Распределение долей внешней нагрузки на плитную часть и инъекционные сваи усиливаемого фундамента.** Внешние нагрузки от реконструируемого здания  $N_p$ , передаваемые на грунты основания, в случае превышения

их допустимых пределов (значений) вызывают необходимость усиления фундаментов с использованием инъекционных свай. При этом часть внешней нагрузки на грунты основания передается подошвой существующего фундамента  $N_{\text{п}}$ , а другая часть – инъекционными сваями  $N_{\text{св}}$ . Доли нагрузок на основание от подошвы  $D_{\text{п}}$  (%) и свай  $D_{\text{св}}$  (%) усиленного фундамента существенно зависят от геометрических, технологических и силовых параметров используемых свай. Для определения нагрузок (доли нагрузок) в расчетах осадок отдельных фундаментов с инъекционными сваями используются условия (3.6)–(3.8) п. 3.3 диссертации. При расчетах осадок ленточных фундаментов, усиленных инъекционными сваями, нагрузки на сваи определяются с учетом данных Филиппович А. А. (2014) [94].

**6. Расчет осадок усиленного фундамента.** Расчеты конечных осадок фундамента  $S$ , усиленного инъекционными сваями, выполняются с учетом требований СП 22.13330.2016. Может быть использован также инженерный метод расчета, согласно которому осадка фундамента  $S_{\text{рек}}$  (мм) реконструируемого здания определяется с учетом нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями в грунте [26, 28, 64, 106] по формуле (4.22) в соответствии с данными п. 4.2 диссертации.

**7. Подготовка рабочей документации.** Проектирование усиления фундаментов реконструируемых зданий инъекционными сваями предусматривает подготовку рабочей документации. В состав документации входят детальные чертежи для выполнения работ, спецификации на используемые материалы, проект производства работ и др. В рабочей документации указываются также мероприятия по разгрузке строительных конструкций надземной части здания, а также мероприятия по технике безопасности при производстве работ по усилению фундаментов.

#### **4.4. Практическое использование результатов исследований**

Практическое применение результатов проведенных исследований было осуществлено на объекте: «Обследование зданий при разработке проектно-

сметной документации на реконструкцию объектов биофабрики федерального казенного предприятия «Армавирская биологическая фабрика». Здание клиники №5» (авторы: Семёнов И. В. и др.; г. Краснодар, ООО «БауПроект», 2023) [17]. Обследуемое здание (рис. 4.13) является производственным двухэтажным, без подвала, в плане имеет прямоугольную форму с размерами между крайними цифровыми осями 72,7 м, буквенными – 18 м.



Рисунок 4.13 – Общий вид обследуемого здания клиники №5 предприятия «Армавирская биологическая фабрика»

Конструктивная схема здания смешанная. В/о «1-13» конструктивная схема – сборный железобетонный каркас рамно-связевого типа с поперечными рамами в виде колонн и ригелей с рамными узлами сопряжения и жесткими узлами опирания колонн каркаса на фундаменты, а также системой вертикальных связей в продольном направлении. В/о «13-14» основными несущими конструкциями являются кирпичные стены толщиной 380 и 510 мм из красного полнотелого кирпича. По результатам устройства шурфов установлено, что фундаменты под колонны здания выполнены отдельно стоящими монолитными железобетонными 2500х2500 мм (рис. 4.14, 4.15), под стены в/о «13-14, А-Г» – ленточные из сборных бетонных блоков ФБС шириной 500 мм и плит шириной 800 мм.

План фундаментов

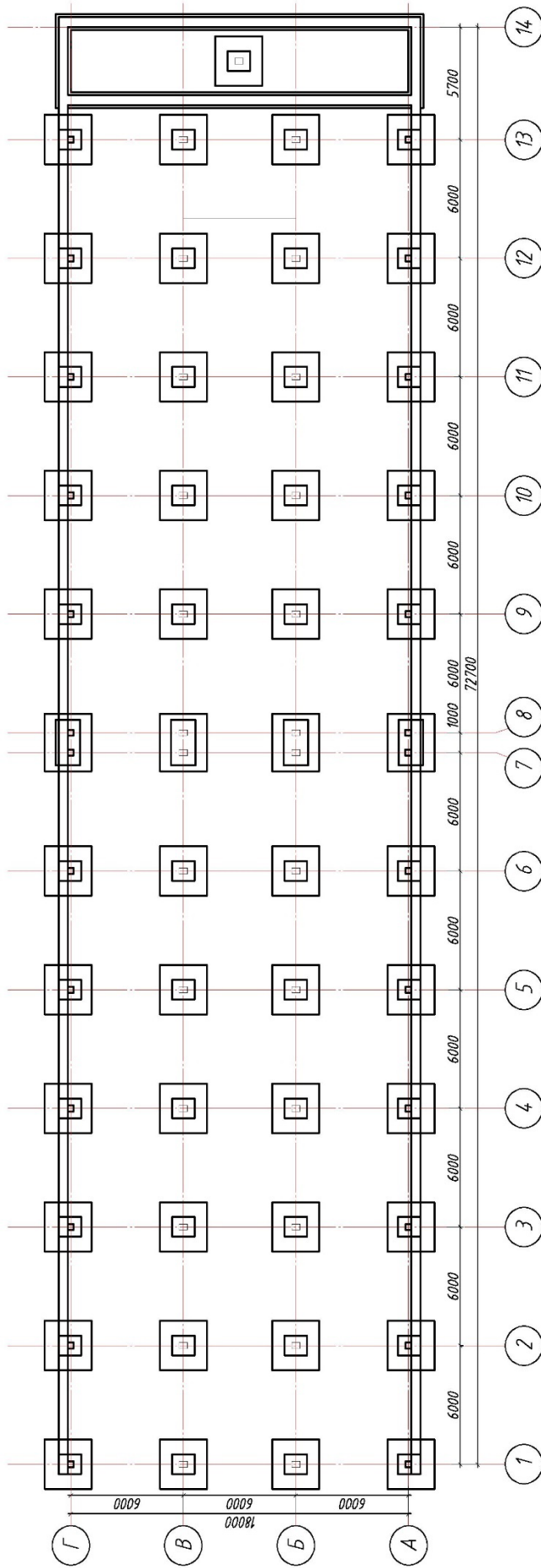


Рисунок 4.14 – План фундаментов обследуемого здания клиники №5

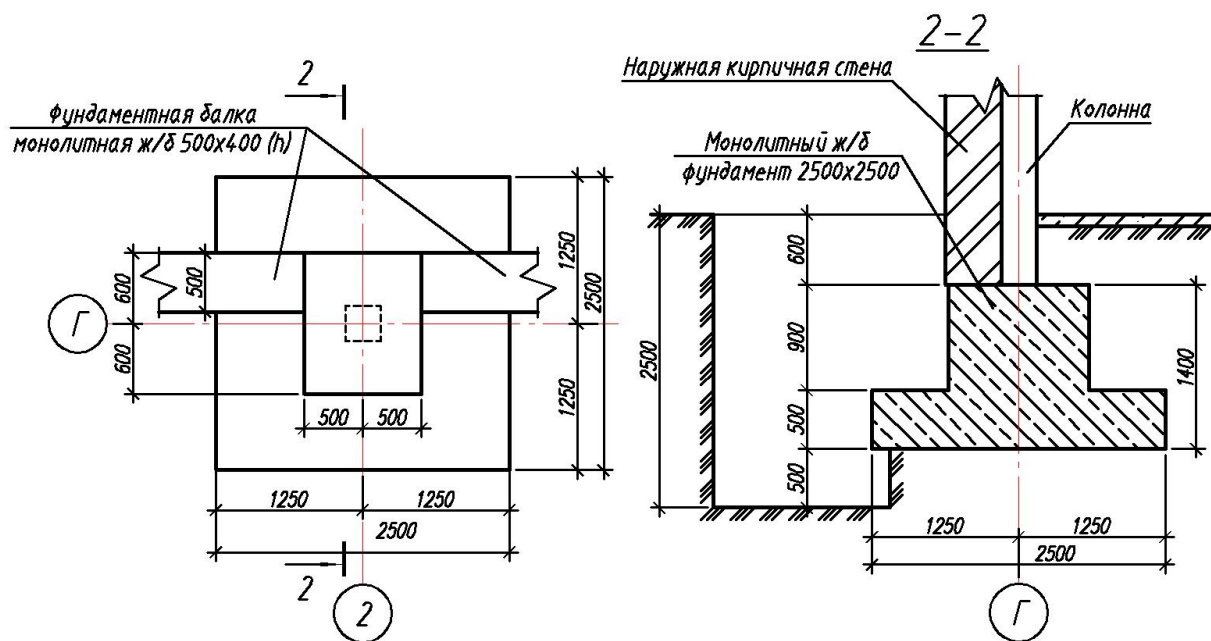


Рисунок 4.15 – Конструктивное решение фундаментов обследуемого здания клиники №5

Строительная площадка сложена глинистыми грунтами: насыпной грунт, преимущественно глинистый (мощность 0,3–0,7 м); супесь твердая ИГЭ-1 (мощность 0,9–1,1 м); суглинок мягкопластичный ИГЭ-2 (мощность 12,5 м). Физико-механические характеристики грунтов строительной площадки следующие. Для слоя супеси твердой (ИГЭ-1): удельный вес грунта составляет  $\gamma_1 = 19,7 \text{ кН/м}^3$ , удельное сцепление грунта  $c = 16 \text{ кПа}$ ; угол внутреннего трения грунта  $\varphi = 17 \text{ град}$ ; модуль деформации грунта, установленный по результатам компрессионных испытаний  $E_k = 6,7 \text{ МПа}$ . Для слоя суглинка мягкопластичного (ИГЭ-2): удельный вес грунта  $\gamma_2 = 20,3 \text{ кН/м}^3$ ; удельное сцепление грунта  $c = 10 \text{ кПа}$ ; угол внутреннего трения грунта  $\varphi = 11 \text{ град}$ ; модуль деформации грунта, установленный по результатам компрессионных испытаний  $E_k = 5,3 \text{ МПа}$ .

Вертикальная нагрузка на обрешку фундамента до реконструкции составила  $N_\phi = 731 \text{ кН}$ . В рамках реконструкции здания планировалось размещение дополнительного технологического оборудования, в связи с чем нагрузка на обрешку фундамента после реконструкции составила  $N_p = 1256 \text{ кН}$ . С целью увеличения

несущей способности существующих фундаментов были разработаны технические решения по их усилению при помощи инъекционных свай в соответствии с рекомендациями, представленными в п. 4.3 диссертации. Усиление предусматривалось 4 инъекционными сваями длиной  $L_{св} = 3,5$  м, диаметром  $d_{св} = 0,25$  м в углах отдельных фундаментов через их плитную часть. При этом был использован разработанный инженерный метод расчета конечных осадок усиливаемых фундаментов.

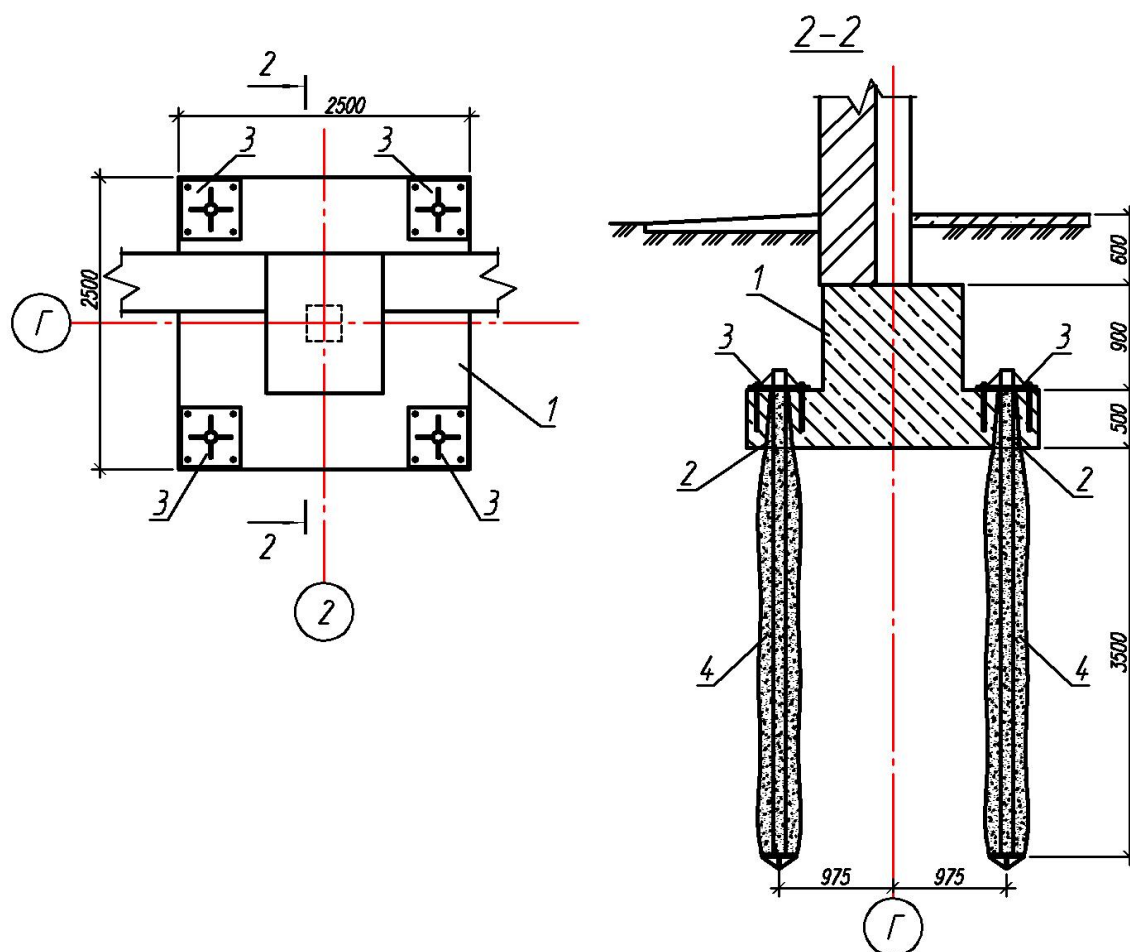


Рисунок 4.16 – Технические решения по усилению отдельных фундаментов обследуемого здания клиники №5 при помощи инъекционных свай:

- 1 – существующий отдельный фундамент мелкого заложения; 2 – отверстия в плитной части фундамента для устройства инъекционных свай; 3 – анкерная пластина с ребрами жесткости; 4 – инъекционные сваи

#### **4.5. Направления дальнейшего развития полученных результатов**

На основе анализа полученных в настоящей работе результатов установлены следующие основные направления дальнейших исследований по совершенствованию способов усиления фундаментов сваями, устраиваемых при помощи инъекции (подачи под давлением) мелкозернистого бетона (инъекционных, буроинъекционных):

1. Расширение базы данных параметров аппроксимации для определения долей внешней нагрузки, которые передаются на конструктивные элементы усиливаемых инъекционными сваями отдельных фундаментов, при различных геометрических параметрах и в различных грунтовых условиях.

2. Исследование устройств буроинъекционных конических свай (патенты РФ № 2672698 и № 2672699) [46, 47, 60, 68, 79], позволяющие снизить трудоемкость производства работ при строительстве и увеличить их несущую способность на этапе эксплуатации здания.

#### **4.5. Выводы по разделу 4**

1. Разработан инженерный метод расчета конечной осадки одиночной инъекционной сваи в глинистом грунте, который позволяет прогнозировать конечные осадки  $S$  инъекционных свай в глинистых грунтах. Он учитывает линейную и нелинейную зависимость перемещения (осадки) сваи от прикладываемой внешней нагрузки  $N$  и позволяет оценить их работу в широком диапазоне нагружения.

2. Обоснован инженерный метод определения конечной осадки фундаментов мелкого заложения при их усилении инъекционными сваями в условиях реконструкции зданий. Установлена сходимость порядка 20–27 % результатов расчета с данными геодезических наблюдений за вертикальным перемещением усиленных фундаментов. Полученные результаты позволяют говорить о применимости инженерного метода расчета осадок фундаментов в практике проектирования фундаментов реконструируемых зданий.

3. Обобщение полученных в работе данных позволило разработать рекомендации по проектированию усиливаемых инъекционными сваями фундаментов (отдельных, ленточных) для реконструируемых зданий. Область применения распространяется на инъекционные сваи длиной 3–12 м, диаметром 200–350 мм, в глинистых грунтах различной консистенции, которые используются для усиления фундаментов мелкого заложения с опорной площадью до 6,5 м<sup>2</sup> в условиях реконструкции здания.

4. Определены основные направления дальнейших исследований по совершенствованию способов усиления фундаментов сваями, устраиваемых при помощи инъекции (подачи под давлением) мелкозернистого бетона (инъекционных, буроинъекционных).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Выполнено обоснование методики расчета системы «инъекционные сваи – глинистый грунт» в составе усиливаемых фундаментов с применением программного комплекса *Midas GTS*. В результате сопоставления численных исследований работы инъекционных свай с данными полевых испытаний установлено, что максимальная разница между осадками при одной и той же внешней нагрузке в рассматриваемом диапазоне нагружения составляет не более 3–5 мм (10–15 %).

2. В результате численных исследований работы одиночных инъекционных свай и свай в составе усиливаемых фундаментов мелкого заложения выявлено, что для квадратных в плане отдельных фундаментов (например, с размерами 1x1 м, 2x2 м и др.) изменение длины устраиваемых свай от 3 до 9 м приводит к повышению доли внешних нагрузок, передаваемой на грунт основания сваями, с 23–52 % до 59–82 % соответственно.

3. Разработан метод определения доли (части) внешней нагрузки, распределяемой в системе реконструируемого здания между элементами усиливаемого фундамента. В основе метода лежит величина давления по подошве фундамента после его усиления инъекционными сваями с учетом

геометрических параметров рассматриваемого фундамента при заданных параметрах грунтов основания.

4. Обоснован инженерный метод расчета конечных осадок одиночных инъекционных свай и фундаментов мелкого заложения (отдельных, ленточных), усиливаемых инъекционными сваями в глинистом грунте. Установлена сходимость порядка 20–27 % результатов расчета с данными геодезических наблюдений за вертикальным перемещением усиленных фундаментов, что позволяет говорить о применимости инженерного метода расчета осадок фундаментов в практике проектирования фундаментов реконструируемых зданий. Метод учитывает влияние конструктивных параметров свай и физико-механических свойств основания в околосвайном пространстве на их работу в условиях эксплуатации реконструируемого здания. В работе инъекционных свай также учитывается линейная и нелинейная зависимость их перемещения (осадки)  $S$  от прикладываемой внешней нагрузки  $N$ .

5. Составлены рекомендации по проектированию усиления фундаментов мелкого заложения (отдельных, ленточных) инъекционными сваями в глинистых грунтах. Область применения распространяется на инъекционные сваи длиной 3–12 м, диаметром 200–350 мм, в глинистых грунтах различной консистенции, которые используются для усиления фундаментов мелкого заложения с опорной площадью до 6,5 м<sup>2</sup> в условиях реконструкции здания.

6. Определены основные направления дальнейших исследований по совершенствованию способов усиления фундаментов сваями, устраиваемых при помощи инъекции (подачи под давлением) мелкозернистого бетона (инъекционных, буроинъекционных). Предложен способ усиления фундамента мелкого заложения буроинъекционными коническими сваями, который подтвержден патентами РФ на изобретения (№ 2672698, № 2672699, 2017 г.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, А. А. Реконструкция жилых зданий : учебное пособие / А. А. Афанасьев, Е. П. Матвеев. – М. : ОАО «ЦПП», 2008 – Ч.1: Технологии восстановления эксплуатационной надежности жилых зданий. – 234 с.
2. Барвашов, В. А. Метод расчета жесткого свайного ростверка с учетом взаимного влияния свай / В. А. Барвашов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1968. – № 3. – С. 35–37.
3. Бахолдин, Б. В. Особенности расчета осадок фундаментов из буронабивных свай / Б. В. Бахолдин, П. И. Ястребов, Е. А. Парфенов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – №6. – С. 12–16.
4. Бахолдин, Б. В. Расчет осадок свай с учетом развития зон предельного равновесия / Б. В. Бахолдин // Численные методы решения задач механики грунтов и расчеты фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях: труды ин-та НИИОСП. – М : НИИОСП, 1985. – № 84. – С. 3–11.
5. Бахолдин, Б. В. Анализ результатов комплексных экспериментальных исследований взаимодействия грунта с забивными сваями / Б. В. Бахолдин, П. И. Ястребов // НИИОСП им. Н. М. Герсеванова — 70 лет : Труды института. – М. : Издательский дом «Экономика, строительство, транспорт», 2001. – С. 100–110.
6. Блащук, Н. В. Разница в работе ростверка свайного фундамента и усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения / Н. В. Блащук, И. В. Маевская // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 229–240.
7. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – Введен в действие 01.01.2021. – М. : Стандартинформ, 2020. – 41 с.
8. ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинг технического состояния. – Введен в действие 01.05.2024. – М. : Российский институт стандартизации, 2024. – 70 с.
9. Готман, А. Л. Сваи и свайные фундаменты. Избранные труды: монография / А. Л. Готман. – Уфа : ИДПО УГНТУ, 2015. – 384 с.

10. Гусев, Г. Н. Приложение модели двухслойной пластинки с неполной системой связей к расчету плитно-свайных фундаментов / Г. Н. Гусев, А. А. Ташкинов, В. В. Коркодинов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4–5. – С. 2123–2125.

11. Далматов, Б. И. Особенности устройства фундаментов на пылевато-глинистых грунтах в условиях реконструкции / Б. И. Далматов, В. М. Улицкий, Л. К. Пронев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1986. – № 5. – С. 4–6.

12. Далматов, Б. И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов (под ред. Б. И. Далматова) / Б. И. Далматов, Ф. К. Лапшин, Ю. В. Россихин. – Л. : Стройиздат, 1975. – 240 с.

13. Дмитриев, Н. В. Опыт устройства корневидных свай / Н. В. Дмитриев, Н. Г. Селиванов // Гидротехническое строительство. – 1978. – № 3. – С. 51–53.

14. Егоров, А. И. Методические рекомендации по применению буроинъекционных свай / А. И. Егоров, В. Я. Юдина, Муштай И. А., В. М. Улицкий. – М.: НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, 1997. – 59 с.

15. Егоров, А. И. Методические рекомендации по проектированию и производству работ при усилении оснований и фундаментов памятников истории и культуры / А. И. Егоров – Текст : электронный. – 3-е изд. – М.: «Восстановление», 1997. – URL: <http://rusarch.ru/egorov1.htm> (дата обращения: 17.08.2019).

16. Ещенко, О. Ю. Исследование влияния краевых условий модели на перемещения буроинъекционной сваи при действии статических нагрузок / О. Ю. Ещенко, Д. А. Чернявский // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 94. – С. 325–335.

17. Заключение «Обследование зданий при разработке проектно-сметной документации на реконструкцию объектов биофабрики федерального казенного предприятия «Армавирская биологическая фабрика». Здание клиники №5». – Краснодар : ООО «БауПроект», 2023. – 170 с.

18. Захаров, М. С. Инженерно-геологические и инженерно-геотехнические изыскания в строительстве: учеб. пособие / М. С. Захаров, Р. А. Мангушев; под ред. Р. А. Мангушева. – М.; СПб. : Изд-во АСВ, 2014. – 176 с.
19. Зотова, Е. В. Определение влияния вспомогательного ростверка на несущую способность свай усиления цокольного здания с учетом неравномерной осадки в г. Белово Кемеровской области / Е. В. Зотова, Ч. Хо, В. Ф. Акопян // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2(25). – С. 131.
20. Исполнительная документация «Устройство инъекционных свай на объекте культурного наследия регионального значения: «3-я городская больница горздравотдела», расположенного по адресу: г. Тюмень, ул. Даудельная, 1 литера А». – Тюмень : ООО «ГЕОФОНД +», 2016. – 3 с.
21. Коновалов, П. А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий / П. А. Коновалов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ВНИИ НТПИ, 2000. – 318 с.
22. Коновалов, П. А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий: монография / П. А. Коновалов, В. П. Коновалов – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во АСВ, 2011. – 384 с.
23. Лapidус, Л. С. К расчету одиночных свай по деформациям / Л. С. Лapidус, Ф. К. Лапшин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – Новосибирск : НИСИСибстрин, 1972. – № 11. – С. 51–54.
24. Лапшин, Ф. К. Расчет свай по предельным состояниям / Ф. К. Лапшин. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 152 с.
25. Луга, А. А. К нормам расчетных сопротивлений свай по грунту / А. А. Луга. – М. : Транспорт, 1965. – С. 52–57.
26. Максимов, Ф. А. Совершенствование конструкции и методов расчета винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Максимов Федор Александрович, 2018. – 161 с.

27. Мальганов, А. И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий / А. И. Мальганов, В. С. Плевков, А. И. Полищук. – Томск : Изд-во Томск, 1992. – 456 с.

28. Малышев, М. В. Расчет осадок фундаментов при нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями в грунтах / М. В. Малышев, Н. С. Никитина // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1982. – №2. – С. 21–24.

29. Мангушев, Р. А. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии / Р. А. Мангушев, А. Л. Готман, В. В. Знаменский, А. Б. Пономарев. – М. : Изд-во АСВ, 2018. – 320 с.

30. Мангушев, Р. А. Современные свайные технологии: Учебное пособие / Р. А. Мангушев, А. В. Ершов, А. И. Осокин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во АСВ, 2010. – 240 с.

31. Маслов, Л. Б. Численные методы механики: курс лекций / Л. Б. Маслов. – Иваново : Изд-во ИГЭУ, 2006. – 128 с.

32. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский [и др.]. – М. : Изд-во АСВ, 1994. – 527 с.

33. Мирошниченко, Р. В. Несущая способность основания, усиленного выштампованными микросваями : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мирошниченко Роман Васильевич, 2010. – 165 с.

34. Никитенко, М. И. Буроинъекционные анкеры и сваи при возведении и реконструкции зданий и сооружений / М. И. Никитенко. – Минск : БНТУ, 2007. – 580 с.

35. Новые пути в анкерной технике. Проектирование и расчет. – Германия : Анкерные сваи Ischebeck Titan, 2006. – 32 с.

36. Нуждин, Л. В. Экспериментальное подтверждение возможности создания в грунтовом массиве инъекционных тел установленной формы /

Л. В. Нуждин, М. Л. Нуждин // Известия вузов. Строительство. – 2019. – № 10. – С. 101–112.

37. Опыт и перспективы применения буроинъекционных свай / Я. А. Пронзин, И. С. Сальный, Р. В. Мельников [и др.] // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2025. – № 1. – С. 29–34.

38. Плитно-свайные фундаменты как способ решения сложных геотехнических проблем / Ю. Р. Оржеховский, В. В. Лушников, Р. Я. Оржеховская, А. С. Ярдяков // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2013. – № 4. – С. 83–86.

39. Осокин, А. И. Передача на сваи дополнительной нагрузки в условиях реконструкции : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Осокин Анатолий Иванович. – Санкт-Петербург, 1995. – 19 с.

40. Отчет «Инженерно-геологические изыскания на земельном участке объекта культурного наследия регионального значения «3-я городская больница горздравотдела (3 объекта), г. Тюмень, ул. Даудельная, 1, литера А; В (корпус 9); В (корпус 11), выявленного объекта – «Романовское училище», г. Тюмень, ул. Даудельная, 1, литера Г»». – Тюмень : ГОУ ВПО ТюмГАСУ, 2008. – 102 с.

41. Отчет о результатах контрольного испытания грунтов буроинъекционной ж/б сваей статической вдавливающей нагрузкой на строительстве разделительного ограждения по адресу: кв. 83-84, между корп. 65 и 75 по ул. Ленсовета, Московский район (инв. №5153). – СПб. : ЗАО «ПКТИ», 2005. – 7 с.

42. Отчет об исследовании буроинъекционных свай типа «Атлант» на объекте культурного наследия «3-я городская больница горздравотдела», расположенном по адресу: г. Тюмень, ул. Даудельная, 1, литера А». – Тюмень : ООО «ГЕОФОНД +», 2016. – 29 с.

43. Патент № 2514261 С1 Российская Федерация, МПК E02D 5/54. Буроинъекционная свая с локальными уширениями : № 2012148645/03 : заявл.

15.11.2012 : опубл. 27.04.2014 / Д. А. Чернявский, И. В. Семенов, О. Ю. Ещенко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет».

44. Патент № 2524077 С1 Российская Федерация, МПК E02D 5/46. Буринъекционная свая с наклонными локальными уширениями : № 2013101331/03 : заявл. 10.01.2013 : опубл. 27.07.2014 / Д. А. Чернявский, И. В. Семенов, О. Ю. Ещенко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет».

45. Патент на полезную модель № 87718 U1 Российская Федерация, МПК E02D 5/34. инъекционная свая : № 2009100371/22 : заявл. 11.01.2009 : опубл. 20.10.2009 / А. И. Полищук, А. А. Тарасов, Р. В. Шалгинов ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (ГОУВПО «ТГАСУ»).

46. Патент № 2672698 С1 Российская Федерация, МПК E02D 27/08. Устройство для изготовления буринъекционной конической сваи : № 2017140017 : заявл. 16.11.2017 : опубл. 19.11.2018 / А. И. Полищук, И. В. Семенов, Д. А. Чернявский ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

47. Патент № 2672699 С1 Российская Федерация, МПК E02D 27/08. Способ усиления фундамента мелкого заложения : № 2017140161 : заявл. 17.11.2017 : опубл. 19.11.2018 / И. В. Семенов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

48. Петухов, А. А. Совершенствование способа устройства инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для условий реконструкции зданий : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» :

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петухов Аркадий Александрович. – Томск, 2006. – 192 с.

49. Полищук, А. И. Взаимодействие комбинированного фундамента с глинистым грунтом основания в условиях реконструкции зданий / А. И. Полищук, Д. Г. Самарин, С. П. Осипов, А. А. Филиппович // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 52–59.

50. Полищук, А. И. Изменение свойств грунтов в основании фундаментов длительно эксплуатируемых зданий. Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство / А. И. Полищук, В. В. Фурсов, М. В. Балюра // Тр. Международной конференции по геотехнике, посвященной 300-летию Санкт-Петербурга. В 2-х томах, Т.2; под ред. В. А. Ильичева, В. М. Улицкого. – СПб–М : Изд-во АСВ, 2003. – С. 179–183.

51. Полищук, А. И. Инженерный метод расчета осадки инъекционной сваи в глинистом грунте / А. И. Полищук, И. В. Семёнов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2019. – №5. – С. 23–28.

52. Полищук, А. И. Инженерный метод расчета осадки комбинированного фундамента в глинистом грунте / А. И. Полищук, И. В. Семёнов // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : Материалы научно-технической конференции, Новочеркасск, 28–30 сентября 2022 года. – Новочеркасск : ООО «Лик», 2022. – С. 120–124.

53. Полищук, А. И. Основания и фундаменты, подземные сооружения : учебник / А. И. Полищук. – 2-е изд., доп. – М. : Изд-во АСВ, 2020. – 498 с.

54. Полищук, А. И. Основные этапы проектирования усиления фундаментов зданий инъекционными сваями / А. И. Полищук, И. В. Семёнов // Современное оборудование, методы инструментального обследования и усиления зданий и сооружений : сборник статей по материалам конференции архитектурно-строительного факультета, Краснодар, 26 мая 2023 года. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2023. – С. 87–92.

55. Полищук, А. И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий. – 3-е изд., доп. – Нортхэмптон : STT; Томск : STT, 2007. – 476 с.

56. Полищук, А. И. Оценка загрузки ленточных фундаментов в однородных глинистых грунтах при их усилении инъекционными сваями / А. И. Полищук, Д. Г. Самарин, А. А. Филиппович // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 4(41). – С. 253–262.

57. Полищук, А. И. Оценка несущей способности инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для фундаментов реконструируемых зданий / А. И. Полищук, А. А. Тарасов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М. : 2017. – № 1. – С. 21–26.

58. Полищук, А. И. Оценка несущей способности свай в глинистых грунтах с помощью ПК PLAXIS 3D Foundation / А. И. Полищук, Д. Г. Самарин, А. А. Филиппович // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 3. – С. 351–359.

59. Полищук, А. И. Подход к расчету осадки одиночной инъекционной сваи в глинистых грунтах / А. И. Полищук, И. В. Семёнов // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: Материалы международной научно-технической конференции, Новочеркасск, 29–31 мая 2018 года. – Новочеркасск : ООО «Лик», 2018. – С. 227–229.

60. Полищук, А. И. Применение буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах для усиления фундаментов реконструируемых зданий / А. И. Полищук, И. В. Семёнов // Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении : материалы научно-технической конференции с иностранным участием, Воронеж, 06–08 ноября 2019 года. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2019. – С. 130–134.

61. Полищук, А. И. Проектирование комбинированных фундаментов с инъекционными сваями при реконструкции зданий / А. И. Полищук, И. В. Се-

мёнов // *Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий* : Материалы III Всероссийской конференции с международным участием, Пермь, 29–31 мая 2024 года. – Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2024. – С. 509–517.

62. Полищук, А. И. Проектирование усиления фундаментов реконструируемых, восстанавливаемых зданий с использованием свай / А. И. Полищук, И. В. Семёнов // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – Т. 11, № 4. – С. 33–45.

63. Полищук А. И. Развитие метода оценки загрузки отдельных фундаментов для их усиления в глинистых грунтах с использованием инъекционных свай / А. И. Полищук, А. А. Филиппович, И. В. Семёнов // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 116–123.

64. Полищук, А. И. Расчет осадки комбинированного фундамента для реконструируемого здания в глинистых грунтах / А. И. Полищук, И. В. Семёнов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2022. – №6. – С.7–11.

65. Полищук, А. И. Совершенствование методов проектирования фундаментов реконструируемых зданий на пылевато-глинистых и искусственных грунтах : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Полищук Анатолий Иванович. – Томск, 1996. – 405 с.

66. Полищук, А. И. Усиление фундаментов инъекционными сваями в условиях реконструкции зданий : монография / А. И. Полищук, А. А. Петухов, И. В. Семёнов; под ред. А. И. Полищука. – Краснодар : КубГАУ, 2022. – 240 с. – ISBN 978-5-907597-32-7.

67. Полищук, А. И. Усиление фундаментов инъекционными сваями при реконструкции зданий : монография / А. И. Полищук, А. А. Петухов, И. В. Семёнов; под ред. д-ра техн. наук, профессора А. И. Полищука // 2-е изд., доп. – М.: Изд-во АСВ, 2023. – 212 с. – ISBN 978-5-4323-0490-2.

68. Полищук, А. И. Устройство буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах при усилении фундаментов мелкого заложения / А. И. Полищук, И. В. Семёнов // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2019. – № 6. – С. 30–36.

69. Применение метода конечных элементов в механике грунтов: учебное пособие / Л. А. Строкова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 142 с.

70. Прозозин, Я. А. Расчет взаимодействия буроинъекционных свай с грунтовым основанием / Я. А. Прозозин, М. А. Самохвалов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2018. – № 2. – С. 14–17.

71. Пьянков, С. А. Свайные фундаменты: учебное пособие / С. А. Пьянков. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 105 с.

72. Рекомендации по применению буроинъекционных свай / Х. А. Джантимиров, Бахолдин Б. В., Вронский А. В. [и др.]. – М. : НИИОСП им. Н. М. Герсеванова Госстроя СССР, 1984. – 48 с.

73. Рытов, С. А. Эффективные современные технологии устройства буроинъекционных свай и грунтовых инъекционных анкеров / С. А. Рытов // Информационный вестник. – 2007. – № 1 (16). – С. 38–45.

74. Самарин, Д. Г. Совершенствование способа устройства буроинъекционных свай в маловлажных грунтах с использованием электрических разрядов : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Самарин Дмитрий Геннадьевич. – Томск, 2005. – 167 с.

75. Семёнов, И. В. Исследование работы отдельных фундаментов реконструируемых зданий при их усилении инъекционными сваями в глинистых грунтах / И. В. Семёнов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2016 г., Краснодар, 29 марта 2017 года. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2017. – С. 68–69.

76. Семёнов, И. В. Результаты исследований работы фундаментов при усилении их инъекционными сваями в глинистых грунтах / И. В. Семёнов // Современные вопросы геотехники : Сборник научных статей по материалам конференции, посвященной 75-летию профессора А. И. Полищука, Краснодар, 28 июля 2024 года. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2024. – С. 204–210.

77. Семёнов, И. В. Результаты исследования работы комбинированных фундаментов в глинистых грунтах / И. В. Семёнов // Современные векторы развития архитектуры и строительства : Сборник статей по материалам конференции, посвященной 50-летию архитектурно-строительного факультета, посвященной 50-летию архитектурно-строительного факультета, Краснодар, 28 марта 2024 года. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. – С. 114–116.

78. Семёнов, И. В. Рекомендации по проектированию комбинированных отдельных фундаментов в глинистых грунтах при реконструкции зданий / Современные векторы развития науки : Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год, Краснодар, 06 февраля 2024 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. – С. 135–137.

79. Семёнов, И. В. Усиление фундаментов мелкого заложения буроналивными коническими сваями в глинистых грунтах / Современное оборудование, методы инструментального обследования и усиления зданий и сооружений: Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции, Краснодар, 19 апреля 2019 года. – Краснодар : Общество с ограниченной ответственностью «Эпомен», 2019. – С. 70–74.

80. Семёнов, И. В. Этапы проектирования усиления отдельного фундамента при помощи инъекционных свай / И. В. Семёнов // Актуальные вопросы строительства: конструкции, технологии, экономика : Сборник статей по материалам конференции архитектурно-строительного факультета, Краснодар,

17 февраля 2021 года. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. – С. 94–97.

81. Сернов, В. А. Исследование напряженно-деформированного состояния грунта в межсвайном пространстве / В. А. Сернов // Геотехника Беларуси : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20-22 мая 2008 г. – 2008. – С. 239–246.

82. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений: Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. – Введен в действие 17.06.2017. – М. : Минстрой России, 2016. – 228 с.

83. СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты: Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – Введен в действие 15.01.2022. – М. : Минстрой России, 2021. – 121 с.

84. Справочник геотехника: основания, фундаменты и подземные сооружения. / под общ. ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева. Гл. 16. Усиление оснований и фундаментов зданий и сооружений (авторы А. И. Полищук, А. А. Тарасов). – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Изд-во АСВ, 2016. – С. 807–850.

85. СТП 02494791–001–2012. Плитно-свайные фундаменты (расчет и конструирование). – Екатеринбург : УралНИИпроект РААСН РФ, 2012.

86. Струнин, П. В. Напряженно деформированное состояние грунтоцементных свай, взаимодействующих с грунтовым основанием и межсвайным пространством : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Струнин Павел Владимирович. – Москва, 2013. – 168 с.

87. Тарасов, А. А. О применении результатов статического зондирования для расчета несущей способности инъекционных свай в слабых глинистых грунтах. / А. А. Тарасов // Вестник гражданских инженеров. – СПб : СПбГАСУ. – 2015. – С. 68–71.

88. Тарасов, А. А. Развитие методов расчёта инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для фундаментов реконструируемых зданий : специаль-

ность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тарасов Александр Александрович, 2015. – 139 с.

89. Тер-Мартirosян З. Г. Осадка и несущая способность длинной сваи / З. Г. Тер-Мартirosян, А. З. Тер-Мартirosян, Чинь Туан Вьет, И. Н. Лузин. – М.: Вестник МГСУ, 2015. – №4. – С. 52–60.

90. Улицкий, В. М. Геотехническое сопровождение реконструкции городов (обследование, расчеты, ведение работ, мониторинг) / В. М. Улицкий, А. Г. Шашкин. – М. : Изд-во АСВ, 1999. – 327 с.

91. Улицкий, В. М. Использование современных технологий при реконструкции городских инженерных сетей / В. М. Улицкий, С. И. Алексеев, С. В. Ломбас. – СПб. : СПбООИ «Нева-Визит», 2001. – 41 с.

92. Федоровский, В. Г. Расчет предельного сопротивления грунта под нижним концом забивной сваи / А. А. Гревцев, В. Г. Федоровский // Вестник НИЦ Строительство. – 2018. – № 2(17). – С. 15-22.

93. Федоровский, В. Г. Сваи в гидротехническом строительстве / В. Г. Федоровский, С. Н. Левачев, С. В. Курилло, Ю. М. Колесников. – М. : Изд-во АСВ, 2003. – 235 с.

94. Филиппович, А. А. Взаимодействие ленточных фундаментов реконструируемых зданий с глинистым грунтом основания при их усилении инъекционными сваями : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Филиппович Анна Александровна, 2014. – 179 с.

95. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Госстройиздат, 1963. – 638 с.

96. Шалгинов, Р. В. Совершенствование метода расчёта инъекционных свай в глинистых грунтах для условий реконструкции зданий : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шалгинов Роман Валерьевич. – Томск, 2010. – 236 с.

97. Шмидт, О. А. Развитие метода расчета осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах : специальность 2.1.2 «Основания и фундаменты, подземные сооружения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шмидт Олег Александрович, 2022. – 131 с.

98. Bruce, D. A., and Juran, I. «Drilled and Grouted Micropiles: State-of-Practice Review, volume 1: background, classifications, cost» Report No. FHWA-RD-96-016, July 1997.

99. Bruce, D. A., Bruce, M. E. C., and Traylor, R. P. (1999). «High Capacity Micropiles – Basic Principals and Case Histories» GeoEngineering for Underground Facilities. Proc. of the 3rd National Conference of the Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers. Geotechnical Special Publication No. 90, Urbana-Champaign, IL, June 13-17, P. 188–199.

100. Design of foundation strengthening with piles for the reconstruction of buildings on clay soils / A. I. Polishchuk, N. S. Nikitina, A. A. Petukhov, I. V. Semyonov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2025. – Vol. 21, No. 1. – P. 222–232.

101. Jeon, S., and Kulhawy, F. H. (2002). «Evaluation of axial compression behavior of micropiles» Proceeding of a Specialty Conference – Foundation and ground improvement, Blacksburg VI, ASCE, P. 460-471.

102. Lizzi, F., (1985). «Paliradice (root piles and reticulated paliradice)» Glasgow [Lanark]: Surrey University Press, P. 84-151.

103. Polishchuk, A. I. Main reasons for strengthening foundations and base soil stabilizations of used buildings / A. I. Polishchuk, I. V. Semyonov, V. A. Demchenko // Journal of Physics: Conference Series : 2, Perm, 26–28 мая 2021 года. – Perm, 2021. – P. 012029.

104. Polishchuk, A. I. Method justification for calculating the final setting of injection pile in clay soil / A. I. Polishchuk, I. V. Semenov, F. A. Maksimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 698. – P. 022011.

105. Randolph M.F. and Wroth C.P. Analysis of vertical deformation of vertically loaded piles / Geotechn. Eng. – 1978. – №104(12). – P. 1465–1488.

106. Strengthening of the Foundations of Renovated Buildings With Injection Piles / A. I. Polishchuk, N. S. Nikitina, A. A. Petukhov, I. V. Semyonov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Vol. 17, № 1. – P. 75–86.

107. Workpackage 3. Innovative design methods in geotechnical engineering / Monika De Vos & Valerie Whenham, Belgian Building Research Inst., Belgium, 2005. – 90 pp.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**Инженерно-геологические условия площадок  
натурных испытаний инъекционных свай**

Таблица 1 – Физико-механические характеристики грунтов площадки №1 (г. Томск, ул. Белинского, 32)

№ ИГЭ	Наименование грунта	Мощность, м	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>			Естественная влажность грунта $W$ , д. ед.	Коэффициент пористости $e$ , д. ед.	Степень водонасыщения $S_r$ , д. ед.	Число пластичности $I_p$ , %	Показатель текучести $I_L$ , д. ед.	Удельное сцепление $c$ , кПа	Угол внутреннего трения грунта $\varphi$ , град.	Модуль деформации $E_k$ , МПа
			$\rho_s$	$\rho$	$\rho_d$								
–	Насыпной грунт	1,8	–	1,95	–	0,25	–	–	–	–	–	–	–
1	Супесь пластичная	1,5	2,69	2,03	1,69	0,21	0,59	0,94	6,17	0,53	27	23	6,0
2	Супесь текучая	8,6	2,67	2,02	1,62	0,22	0,62	0,96	4,19	1,50	6	22	4,5

Таблица 2 – Физико-механические характеристики грунтов площадки №2 (г. Томск, ул. Соляная)

№ ИГЭ	Наименование грунта	Мощность, м	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>			Естественная влажность грунта $W$ , д. ед.	Коэффициент пористости $e$ , д. ед.	Степень водонасыщения $S_r$ , д. ед.	Число пластичности $I_p$ , %	Показатель текучести $I_L$ , д. ед.	Удельное сцепление $c$ , кПа	Угол внутреннего трения грунта $\varphi$ , град.	Модуль деформации $E_k$ , МПа
			$\rho_s$	$\rho$	$\rho_d$								
–	Насыпной грунт	2,6	2,63	1,76	1,25	0,24	0,72	0,87	6,3	0,53	–	–	–
1	Супесь пластичная	1,6	2,66	1,99	1,65	0,17	0,58	0,75	4,8	0,42	21,6	28,7	6,9
2	Супесь текучая	2,3	2,67	1,98	1,58	0,23	0,67	0,92	4,7	1,00	13,7	27,3	5,6
3	Суглинок текучий	3,1	2,69	1,99	1,56	0,28	0,73	0,96	7,9	1,10	13,7	27,0	3,1
4	Суглинок тугопластичный	1,4	2,62	1,97	1,54	0,26	0,68	0,96	9,1	0,38	30,4	19,3	3,2

Таблица 3 – Физико-механические характеристики грунтов площадки №3  
(г. Кемерово, КГСХИ)

№ ИГЭ	Наименование грунта	Мощность, м	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>			Естественная влажность грунта $W$ , д. ед.	Коэффициент пористости $e$ , д. ед.	Степень водонасыщения $S_r$ , д. ед.	Число пластичности $I_p$ , %	Показатель текучести $I_L$ , д. ед.	Удельное сцепление $c$ , кПа	Угол внутреннего трения грунта $\varphi$ , град.	Модуль деформации $E_k$ , МПа
			$\rho_s$	$\rho$	$\rho_d$								
–	Насыпной грунт	0,4	–	1,95	–	–	–	–	–	–	–	–	
1	Суглинок мягко-текуче-пластичный	6,0	2,71	1,86	1,43	0,30	0,90	0,91	–	0,91	14	16	2,0
2	Суглинок полутвердый	4,0	2,72	1,96	1,56	0,26	0,74	0,95	–	0,23	32	20	3,5

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

Результаты расчета доли внешней нагрузки, передаваемой конструктивными элементами усиленного фундамента на грунтовое основание, в ПК Midas GTS

Таблица 1 – Результаты расчета доли внешней нагрузки, передаваемой конструктивными элементами усиленного фундамента на грунтовое основание ( $b_{\text{ф}} = 1,0 \text{ м}$ )

$L_{\text{св}}, \text{ м}$	3,0		6,0		9,0		12,0	
	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$
$N_{\text{I}} = 100 \text{ кН}$	62,3	37,7	33,2	66,8	13,4	86,6	10,3	89,7
$N_{\text{II}} = 150 \text{ кН}$	48,8	51,2	26,8	73,2	17,1	82,9	8,9	91,1
$N_{\text{III}} = 200 \text{ кН}$	47,4	52,6	29,2	70,8	20,4	79,6	12,7	87,4
$N_{\text{IV}} = 250 \text{ кН}$	51,7	48,3	31,3	68,7	25,7	74,3	15,8	84,2

Примечание:  $L_{\text{св}}$  – длина инъекционной сваи, м;  $b_{\text{ф}}$  – ширина подошвы отдельного фундамента, м;  $N_{\text{I}} \dots N_{\text{IV}}$  – внешняя нагрузка на усиленный фундамент, кН;  $D_{\text{п}}$  – доля нагрузки, передаваемая на плитную часть фундамента, %;  $D_{\text{св}}$  – доля нагрузки, передаваемая на инъекционные сваи, %.

Таблица 2 – Результаты расчета доли внешней нагрузки, передаваемой конструктивными элементами усиленного фундамента на грунтовое основание ( $b_{\text{ф}} = 1,5 \text{ м}$ )

$L_{\text{св}}, \text{ м}$	3,0		6,0		9,0		12,0	
	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$
$N_{\text{I}} = 150 \text{ кН}$	84,2	15,8	63,6	36,4	39,6	60,4	25,6	74,4
$N_{\text{II}} = 225 \text{ кН}$	69,9	30,1	49,2	50,8	29,5	70,5	21,7	78,3
$N_{\text{III}} = 300 \text{ кН}$	70,9	29,1	46,9	53,1	28,6	71,4	21,1	78,9
$N_{\text{IV}} = 375 \text{ кН}$	70,1	29,9	50,5	49,5	28,8	71,2	20,9	79,1

Примечание:  $L_{\text{св}}$  – длина инъекционной сваи, м;  $b_{\text{ф}}$  – ширина подошвы отдельного фундамента, м;  $N_{\text{I}} \dots N_{\text{IV}}$  – внешняя нагрузка на усиленный фундамент, кН;  $D_{\text{п}}$  – доля нагрузки, передаваемая на плитную часть фундамента, %;  $D_{\text{св}}$  – доля нагрузки, передаваемая на инъекционные сваи, %.

Таблица 3 – Результаты расчета доли внешней нагрузки, передаваемой конструктивными элементами усиленного фундамента на грунтовое основание ( $b_{\text{ф}} = 2,0 \text{ м}$ )

$L_{\text{св}}, \text{ м}$	3,0		6,0		9,0		12,0	
	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$	$D_{\text{п}}, \%$	$D_{\text{св}}, \%$
$N_{\text{I}} = 200 \text{ кН}$	95,6	4,4	68,5	31,5	51,4	48,6	37,1	62,9
$N_{\text{II}} = 300 \text{ кН}$	77,4	22,6	56,9	43,1	41,4	58,6	25,7	74,3
$N_{\text{III}} = 400 \text{ кН}$	76,6	23,4	60,6	39,4	37,4	62,6	23,7	76,3
$N_{\text{IV}} = 500 \text{ кН}$	74,6	25,4	60,8	39,2	38,0	62,0	22,1	77,9

Примечание:  $L_{\text{св}}$  – длина инъекционной сваи, м;  $b_{\text{ф}}$  – ширина подошвы отдельного фундамента, м;  $N_{\text{I}} \dots N_{\text{IV}}$  – внешняя нагрузка на усиленный фундамент, кН;  $D_{\text{п}}$  – доля нагрузки, передаваемая на плитную часть фундамента, %;  $D_{\text{св}}$  – доля нагрузки, передаваемая на инъекционные сваи, %.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ В**

Значения давлений в уровне подошвы отдельного фундамента  
после его усиления инъекционными сваями, рассчитанные в ПК Midas GTS  
при различной ширине плитной части фундамента

Таблица 1 – Значения давлений в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления инъекционными сваями (ширина плитной части отдельного фундамента  $b_{\phi} = 1,0$  м)

$L_{св}, \text{ м}$	3,0	6,0	9,0	12,0
$N_I = 100 \text{ кН}$	62,3	33,2	13,4	10,3
$N_{II} = 150 \text{ кН}$	73,2	40,2	25,6	13,4
$N_{III} = 200 \text{ кН}$	94,8	58,4	40,8	25,3
$N_{IV} = 250 \text{ кН}$	129,2	78,3	64,3	39,5

Таблица 2 – Значения давлений в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления инъекционными сваями (ширина плитной части отдельного фундамента  $b_{\phi} = 1,5$  м)

$L_{св}, \text{ м}$	3,0	6,0	9,0	12,0
$N_I = 150 \text{ кН}$	84,2	63,6	39,6	25,6
$N_{II} = 225 \text{ кН}$	104,8	73,8	44,3	32,5
$N_{III} = 300 \text{ кН}$	141,8	93,8	57,2	42,2
$N_{IV} = 375 \text{ кН}$	175,2	126,2	71,9	52,3

Таблица 3 – Значения давлений в уровне подошвы отдельного фундамента после его усиления инъекционными сваями (ширина плитной части отдельного фундамента  $b_{\phi} = 2,0$  м)

$L_{св}, \text{ м}$	3,0	6,0	9,0	12,0
$N_I = 200 \text{ кН}$	95,6	68,5	51,4	37,1
$N_{II} = 300 \text{ кН}$	116,1	85,3	62,1	38,6
$N_{III} = 400 \text{ кН}$	153,2	121,2	74,8	47,4
$N_{IV} = 500 \text{ кН}$	186,5	152,1	95,1	55,2

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Г**

Параметры аппроксимации для определения давления  $p_{yc}$  при заданной ширине подошвы отдельного фундамента

Таблица 1. Параметры аппроксимации для определения давления  $p_{ус}$  при ширине подошвы отдельного фундамента  $b_{\phi} = 1,0$  м

Параметры аппроксимации	Длина инъекционных свай $L_{св}$ , м			
	3,0	6,0	9,0	12,0
$a_1$	0,00235	0,00129	0,00113	0,00111
$a_2$	-0,3779	-0,1445	-0,0597	-0,1895
$a_3$	76,695	34,275	8,335	17,825
$\bar{A}$ , %	0,003	0,07	0,102	0,272

Примечание:  $L_{св}$  – длина инъекционной сваи, м;  $b_{\phi}$  – ширина плитной части отдельного фундамента, м;  $a_1, a_2, a_3$  – параметры аппроксимации, кН;  $\bar{A}$  – средняя ошибка аппроксимации, %.

Таблица 2. Параметры аппроксимации для определения давления  $p_{ус}$  при ширине подошвы отдельного фундамента  $b_{\phi} = 1,5$  м

Параметры аппроксимации	Длина инъекционных свай $L_{св}$ , м			
	3,0	6,0	9,0	12,0
$a_1$	0,00128	0,00222	0,001	0,00032
$a_2$	0,172	-0,3614	-0,1304	0,0676
$a_3$	53,2	77,67	42,32	15,52
$\bar{A}$ , %	0,033	0,003	0,031	0,004

Примечание:  $L_{св}$  – длина инъекционной сваи, м;  $b_{\phi}$  – ширина плитной части отдельного фундамента, м;  $a_1, a_2, a_3$  – параметры аппроксимации, кН;  $\bar{A}$  – средняя ошибка аппроксимации, %.

Таблица 3. Параметры аппроксимации для определения давления  $p_{ус}$  при ширине подошвы отдельного фундамента  $b_{\phi} = 2,0$  м

Параметры аппроксимации	Длина инъекционных свай $L_{св}$ , м			
	3,0	6,0	9,0	12,0
$a_1$	0,00128	0,00141	0,00096	0,00063
$a_2$	0,1716	0,0799	-0,0484	-0,0943
$a_3$	64,62	45,205	46,92	39,815
$\bar{A}$ , %	0,030	0,072	0,005	0,058

Примечание:  $L_{св}$  – длина инъекционной сваи, м;  $b_{\phi}$  – ширина плитной части отдельного фундамента, м;  $a_1, a_2, a_3$  – параметры аппроксимации, кН;  $\bar{A}$  – средняя ошибка аппроксимации, %.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Д**

Справки о внедрении результатов исследований



350089, г. Краснодар, ул. Бабушкина, д.52  
107076, г. Москва, ул. Стромьнка, д. 21, кор. 2, офис 23  
Тел.: +7 (800) 333 21 02  
bau-project@mail.ru  
www.project-bau.ru

ОГРН 1182375119189, ОКПО 35100241, ИНН 2308261680; КПП 230801001

Исх. №132/25 от 02.06.2025 г.

**СПРАВКА**  
**о внедрении результатов научных исследований**  
**соискателя кафедры оснований и фундаментов**  
**ФГБОУ ВО Кубанского ГАУ**  
**Семёнова Ивана Владимировича**

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертационной работы Семёнова Ивана Владимировича на тему: «Обоснование методов расчета осадок фундаментов при их усилении инъекционными сваями для реконструируемых зданий в глинистых грунтах», представленные на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в производственной деятельности предприятия ООО «БауПроект» при выполнении работ по теме «Обследование зданий при разработке проектно-сметной документации на реконструкцию объектов биофабрики федерального казенного предприятия «Армавирская биологическая фабрика» (пос. Прогресс, Новокубанский р-н, Краснодарский край). Здание клиники №5».

Семёнов И. В. принимал участие в разработке технических решений по усилению отдельных фундаментов здания. Разработанные решения позволили разгрузить существующие фундаменты и передать часть нагрузки на инъекционные сваи. Использованный Семёновым И. В. инженерный метод расчета конечных осадок фундаментов мелкого заложения, усиливаемых инъекционными сваями в глинистом грунте, позволил подобрать рациональные геометрические размеры инъекционных свай и их количество с целью обеспечения безопасной эксплуатации объекта.

Генеральный директор



О.А. Шмидт

**УТВЕРЖДАЮ:**

Проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО «Кубанский  
государственный  
аграрный университет  
имени И.Т. Трубилина»



А. В. Петух

» 06 2025 г.

### **СПРАВКА**

**об использовании результатов исследований старшего преподавателя  
кафедры «Основания и фундаменты» Кубанского ГАУ  
Семёнова Ивана Владимировича в учебном процессе**

Настоящей справкой подтверждаем, что в диссертационной работе Семёнова И.В. были решены вопросы развития методов проектирования усиления отдельных фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах, что вносит существенный вклад в развитие теории и практики устройства фундаментов реконструируемых зданий. Полученные диссертантом результаты используются с 2018-2025 гг. в учебном процессе Кубанского государственного аграрного университета им. И. Т. Трубилина специалистами кафедры оснований и фундаментов при выполнении выпускных квалификационных работ студентами-магистрантами, обучающихся по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство», а также чтении лекций по дисциплине «Проектирование оснований и фундаментов реконструируемых зданий» для студентов специальности 08.04.01 «Строительство» и дисциплине «Основания и фундаменты сооружений» для студентов специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

Декан архитектурно-строительного  
факультета, к.т.н., доцент

Д. Г. Серый

И.о. заведующий кафедрой  
«Основания и фундаменты», к.т.н., доцент

Д. В. Лейер