Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Брянский государственный инженерно-технологический университет»

Строительный институт

Казалиев Магомед Казимагомедович

Несущая способность буроинъекционных свай при усилении фундаментов зданий и сооружений на горизонтальные и вертикальные нагрузки

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание степени магистра

Направление подготовки – 08.04.01 «Строительство», профиль
«Инновационные технологии возведения, эксплуатации
и реконструкции зданий и сооружений»

Научный
руководитель,
д.т.н., проф.
Т.И. Отлева

Брянск – 2018

Министерство образования и науки Российской Федера
Федеральное государственное бюджетное образовательн
учреждение высшего образования
«Брянский государственный инженерно-технологический уни

Строительный институт
Кафедра « Строительные конструкции»

УТВЕРЖ
Заведующ
профессор
С.Г. Парф
_____

«__»_____

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПОЛНЕНИЕ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИ

Студенту_____

Тема диссертации_____
_____

Цель диссертации_____
_____
_____

Постановка задач диссертационного исследования_____
_____
_____

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Выполняемая работа	Объем работы, %	Рекомен-дуемый объем раздела, стр	Сроки выполнения
1. Обоснование актуальности выбранной темы. Определение объекта и предмета исследования. Постановка цели и задач исследования Подготовка раздела «Введение»	5	5	
2. Поиск и изучение литературы. Подготовка главы «Литературный обзор по проблеме исследований»	10	20	
3. Выбор методов проведения исследований, необходимого оборудования и приборов	5		
4. Подготовка главы «Методы проведения исследований. Приборы и оборудование»	10	15	
5. Изложение сути диссертационного исследования. Подготовка главы «Теоретические исследования».	20	25	
6. Изложение сути диссертационного исследования. Подготовка главы «Экспериментальные исследования».	30	35	
7. Обработка материалов исследований. Формулировка выводов и оценка полученных результатов. Составление библиографического списка. Подготовка статей и патентов по результатам исследований. Подготовка раздела «Заключение».	10	5	
8. Подготовка диссертации к защите; оформление и сдача диссертации на проверку руководителю; кафедральный просмотр и предзащита; получение отзыва от руководителя, сдача диссертации на рецензию; подготовка доклада.	10		

Дата выдачи задания «__»_____ 201___ г.

Срок защиты законченной диссертации «__»_____ 201___ г.

Магистрант_____

Руководитель_____

СОДЕРЖАНИЕ:

ВВЕДЕНИЕ

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Технологические особенности изготовления буроинъекционных свай

1.2 Регламент для проектирования и устройства буроинъекционных свай

1.3 Краткая характеристика инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга

1.4 Цель и задачи исследования

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ И ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ НАГРУЗКИ

2.1 Несущая способность буроинъекционной сваи на вертикальную сжимающую нагрузку

2.2 Несущая способность буроинъекционной сваи на горизонтальную нагрузку

2.3 Несущая способность наклонной буроинъекционной сваи на вертикальную сжимающую нагрузку

2.4 Аналитический расчет буроинъекционной сваи по деформированной схеме

2.5 Выводы по главе

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ И ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ НАГРУЗКИ

3.1 Анализ полевых испытаний свай на вертикальную сжимающую4 нагрузку

3.2 Статистическая обработка теоретических и фактических значений несущей способности буроинъекционных свай с учетом технологии их изготовления
3.3 Анализ полевых испытаний свай на горизонтальную нагрузку и их сопоставление с аналитическими расчетами и численным моделированием
3.4 Анализ полевого испытания наклонной буроинъекционной сваи на вертикальную сжимающую нагрузку
3.5 Выводы по главе
4.ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ
4.1 Оценка напряженно-деформированного состояния системы: «буроинъекционная свая-грунт» при реконструкции кинотеатра «Ленинград» расположенного на ул. Потемкинской, д. 4
4.1.1 Аналитический метод определения внутренних усилий в буроинъекционной свае
4.1.2 Численный метод определения внутренних усилий в буроинъекционной свае с помощью программы SCAD
4.2 Оценка напряженно-деформированного состояния системы: «буроинъекционная свая-грунт» при реконструкции жилого здания расположенного на Литейном, пр., д. 26
4.2.1 Аналитический метод определения внутренних усилий в буроинъекционной свае
4.2.2 Численный метод определения внутренних усилий в буроинъекционной свае с помощью программы Plaxis
4.3 Выводы по главе
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. На отечественном строительном производстве буроинъекционные сваи появились в середине 80-х годов. В основном они использовались для усиления фундаментов зданий. В настоящее время область их применения значительно расширилась, эти сваи используются для защиты от оползней, усиления насыпей, закрепления бортов котлованов, устройства ограждающих стен в грунте, при строительстве в условиях плотной городской застройки, для исправления кренов фундаментов, для вывешивания конструкций при устройстве подземных помещений, а также применяются в качестве фундаментов в районах с повышенной сейсмической активностью и фундаментов, испытывающих вертикальные и горизонтальные нагрузки.

Широкая область применения буроинъекционных свай, а также характер работы наклонных свай предполагают совместное воздействие вертикальной и горизонтальной нагрузок. Рекомендуемый нормативными документами расчет свай на совместное воздействие вертикальной, горизонтальной нагрузки и момента достаточно сложен и трудоемок, к тому же он был разработан, в основном, для свай, применяемых в мостостроении, обладающих относительно большими диаметрами по сравнению с буроинъекционными сваями.

Многочисленные полевые испытания буроинъекционных свай на вертикальную и горизонтальную нагрузки в различных инженерно-геологических условиях показывают, что их несущая способность по грунту значительно выше рассчитанной по таблицам СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты».

Вопрос о влиянии технологии изготовления буроинъекционных свай на их несущую способность еще недостаточно изучен.

В рамках данной работы выполнено исследование несущей способности одиночных буроинъекционных свай на вертикальную и горизонтальную нагрузки в зависимости от технологии их изготовления без учета влияния длительной совместной работы сваи и грунта.

Целью работы является совершенствование инженерного метода расчета несущей способности буроинъекционных свай на вертикальную и горизонтальную нагрузки.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Проанализирована работа вертикальной сваи на вертикальную и горизонтальную нагрузки, а также наклонной сваи на вертикальную нагрузку.

2. Выполнено сравнение результатов двухсот полевых испытаний буроинъекционных свай на вертикальную нагрузку с несущей способностью, рассчитанной по требованиям норм. Полученные результаты исследованы с помощью статистической обработки теоретических и фактических значений с учетом технологии изготовления свай.

3. Проведены аналитические расчеты вертикальной сваи на горизонтальную нагрузку различными способами. Проанализированы достоинства и недостатки различных методов расчетов. Выполнено сравнение полученных результатов с численным моделированием и полевыми испытаниями свай.

4. Исследована работа наклонной сваи на вертикальную сжимающую нагрузку.

5. На основе аналитического решения Тимошенко С. П. разработан инженерный метод расчета буроинъекционных свай на горизонтальную нагрузку.

Предыдущие исследования. Исследованием несущей способности сваи на вертикальную нагрузку занимались ученые: А. А. Бартоломей, Б. В. Бахолдин, А. И. Егоров, Э. В. Костерин, Ф. К. Лапшин, А. А. Луга, Р. А.

Мангушев, Н. С. Несмелое, Г. Ф. Новожилов, А. И. Осокин, В. Н. Парамонов, Ю. В. Россихин, С. Н. Сотников, А. Б. Фадеев и др.

Вопросом несущей способности свай на горизонтальную нагрузку занимались: Н. М Герсеванов, К. С. Завриев, Э. В. Костерин, Н. К. Снитко, Г. С. Шпиро, В. Г. Федоровский и др.

Исследованием влияния технологии изготовления сваи на ее несущую способность занимались ученые: С. В. Бровин, Х. А. Джантимиров, И. М. Клейнер, А. А. Луга, В. М. Улицкий, и др.

Из зарубежных ученых, занимавшихся исследованием работы сваи в грунте, можно отметить: Брандля, Бергфельта, Ван Импе, Глика, Гранхольма, Гольдера, Куммингса, Каценбаха, Ринкерта, Риза, Стивенса, Терцаги, Ханна Харро, Ходли, Франка, Френсиса, Форэя, Шлоссера, Шарора и др.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан инженерный метод расчета вертикальных буроинъекционных свай на горизонтальную нагрузку, а также наклонных свай на вертикальную нагрузку.
2. Получены поправочные коэффициенты для более точного определения несущей способности буроинъекционных свай по грунту на вертикальную сжимающую нагрузку с учетом технологии изготовления сваи.
3. Произведена оценка влияния ряда технологий изготовления буроинъекционных свай на их несущую способность.

На защиту выносится:

1. Инженерный метод расчета вертикальных буроинъекционных свай на горизонтальную нагрузку и наклонных свай на вертикальную нагрузку.
2. Результаты аналитического исследования влияния угла наклона сваи, жесткостных параметров сваи и деформативных характеристик грунта на напряженно-деформированное состояние системы: «буроинъекционная свая-грунт».

3. Поправочные коэффициенты для определения несущей способности буроинъекционных свай на вертикальную сжимающую нагрузку с учетом технологии их изготовления.

4. Результаты аналитического исследования различных методов расчета свай на горизонтальную нагрузку и их сравнение с численным моделированием и полевыми испытаниями свай.

5. Результаты анализа полевого испытания наклонной сваи на вертикальную нагрузку.

6. Примеры внедрения инженерного метода расчета наклонных буроинъекционных свай на объектах реконструкции в Санкт-Петербурге.

Практическая ценность работы. Полученные поправочные коэффициенты для определения несущей способности буроинъекционных свай на вертикальную нагрузку позволят значительно снизить затраты на производство работ по устройству свайных фундаментов на проектной стадии строительства.

Реализация результатов исследований. Результаты, полученные в диссертации по исследованию напряженно-деформированного состояния системы: «буроинъекционная свая-грунт» были внедрены на следующих объектах реконструкции в Санкт-Петербурге:

1. Реконструкция бывшего кинотеатра «Ленинград» расположенного на ул. Потемкинская, д. 4;

2. Реконструкция жилого здания, расположенного на Литейном пр., д. 26.

Публикации. Основные положения диссертации изложены и опубликованы в виде статей в научно-технических журналах: «Ростовский научный журнал», «Известия ОрелГТУ» (входит в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из: введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из наименований и приложений. Общий объем диссертации составляет 105 страниц, из которых 19 рисунков, 10 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, обозначены цель и задачи исследования, введены граничные условия, в рамках которых был исследован данный вопрос.

В первой главе выполнен анализ современного состояния исследуемой темы. Приведена последовательность некоторых технологий изготовления буроинъекционных свай, отражены их достоинства и недостатки. Кратко описаны особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. Проанализированы существующие методы расчета свай на вертикальную и горизонтальную нагрузки.

Во второй главе выполнен теоретический анализ работы вертикальной сваи на вертикальную и горизонтальную нагрузки. На основе аналитического решения Тимошенко С. П. разработан инженерный метод расчета буроинъекционных свай на горизонтальную нагрузку. Проведено исследование влияния угла наклона сваи, жесткостных параметров сваи и деформативных характеристик грунта на напряженно-деформированное состояние системы: «буроинъекционная свая-грунт».

В третьей главе выполнено сравнение значений несущей способности буроинъекционных свай на вертикальную нагрузку, полученных при полевых испытаниях в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга, с величинами, рассчитанными по таблицам нормативных документов. Проведена статистическая обработка расчетных и фактических значений с учетом технологии изготовления свай. Проанализированы результаты полевых испытаний буроинъекционных свай на горизонтальную нагрузку и выполнено их сравнение с аналитическими расчетами и численным моделированием. Исследована работа наклонной сваи на вертикальную нагрузку на основе полевого испытания.

В четвертой главе приведены результаты внедрения инженерного метода расчета наклонных буроинъекционных свай на вертикальную нагрузку на примере двух объектов в Санкт-Петербурге. Проведено сравнение фактических перемещений с расчетными, определенными аналитическими методами и численным моделированием с помощью программ Plaxis.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Технологические особенности изготовления буроинъекционных свай

Буроинъекционные сваи - это разновидность буровых свай, отличительными признаками которых в конструкции и технологии изготовления являются:

- малый диаметр (как правило, от 0,12……0,25 м, максимальный - 0,35 м);
- большая гибкость (L/d = 80-200);
- применяемый материал (цементно-песчаная смесь);
- процесс опрессовки бетонной смеси после заполнения скважины под давлением 0,2…..0,6 МПа.

Для устройства буроинъекционных свай используют растворы различного типа в зависимости от условий строительства и характера работы сваи в конструкции. Это могут быть цементно-песчаные, цементно-бентонитовые и цементные растворы. В необходимых случаях возможно также применение растворов других специальных составов.

Современное оборудование для изготовления буроинъекционных свай обладает универсальностью применения, оно малогабаритно, легко монтируется и демонтируется, не создает динамических воздействий, может быть установлено и использовано практически в любых условиях: в подвалах зданий, на строительных лесах, в котлованах, на воде с плавучих платформ и т.д.

В Санкт-Петербурге в гражданском строительстве преимущественно используются следующие отечественные технологии изготовления буроинъекционных свай:

- с помощью проходного шнека;
- под защитой обсадных труб;
- под защитой глинистого раствора.

Основное различие в этих технологиях состоит в способе бурения скважины в грунте. Кратко опишем технологическую последовательность устройства буроинъекционных свай для каждой технологии на основе учебного пособия профессора Мангушева Р. А. в соавторстве с Ершовым А. В. и Осокиным А. И [53].

Технология устройства свай с **помощью проходного шнека** а). Установка бурового станка на точку предполагаемого устройства сваи, б). Погружение шнековой колонны до проектной отметки. в). Постепенное извлечение шнека из скважины с одновременным ее заполнением бетонной смесью, подаваемой через полый шнек бетононасосом.

г). Перемещение станка на следующую точку бурения, д). Погружение в скважину, заполненную бетонной смесью арматурного каркаса, с помощью вибратора, е). Формирование оголовка сваи для связи с ростверком.

При внедрении проходного шнека происходит частичное уплотнение грунта, а также некоторое разупрочнение контактной зоны «свая-грунт» в процессе разрушения грунта бурением.

Технология положительно зарекомендовала себя при использовании в грунтах, имеющих слои, существенно различающиеся по прочности. Особенно эффективна она при проходке большой толщи песков, полутвердых и тугопластичных суглинков, когда применение технологии изготовления свай уплотнения невозможно.

Недоучет тиксотропного разупрочнения водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов возникающего в околосвайном массиве грунта при устройстве свай по данной технологии при последовательном изготовлении свай без «отдыха» приводит к существенному перерасходу бетонной смеси (в 2...7 раз). Повышенный расход бетонной смеси, как правило, имеет место, когда в инженерно-геологическом разрезе площадки присутствуют

значительные по толще слои текучих, текучепластичных суглинков и супесей с низкими прочностными характеристиками.

Преимуществами данной технологии являются высокая производительность и высокое качество заполнения скважины бетонной смесью за счет её подачи под давлением.

На рис. 1.1.1 приведена технологическая схема устройства свай с помощью проходного шнека.

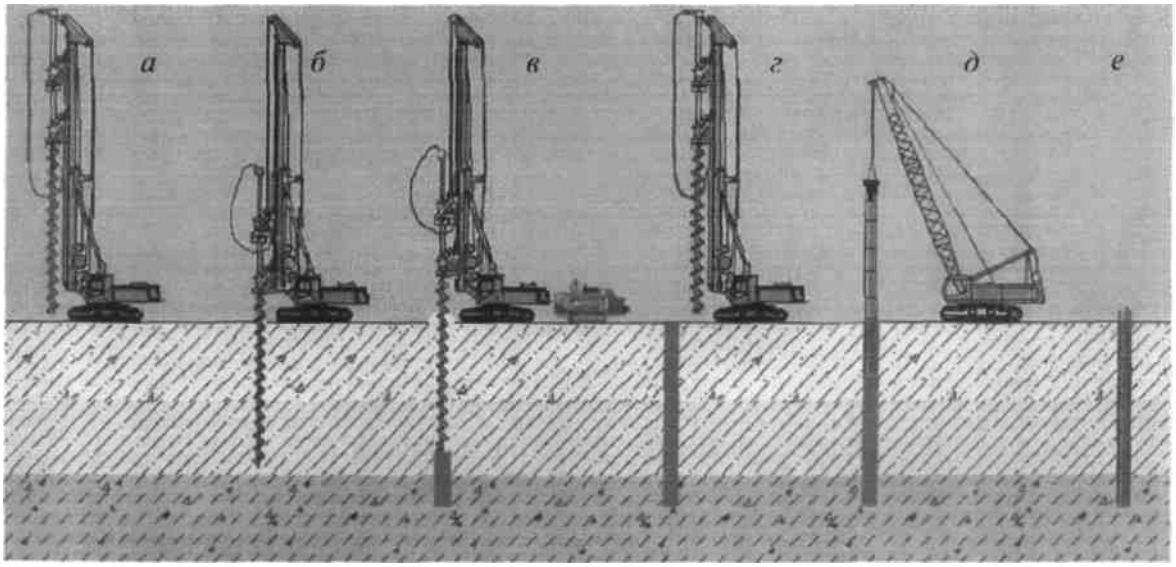


Рис. 1.1.1 . Технологическая схема устройства свай проходным шнеком

Технология устройства свай под защитой обсадной трубы

а). Установка бурового станка на точку предполагаемого устройства сваи.

б). Погружение (посекционно) обсадной трубы на требуемую глубину. Извлечение грунта из обсадной трубы.

в). Извлечение шнека из обсадной трубы. Зачистка забоя скважины от шлама. Установка арматурного каркаса.

г). Бетонирование сваи методом вертикально перемещающейся трубы (ВПТ). Бетонолитная труба собирается из секций и затем устанавливается в обсадную трубу на всю высоту. Бетонная смесь доставляется автобетоносмесителями.

д). Извлечение обсадной трубы.

Изготовление свай под защитой обсадной трубы заключается в погружении инвентарной трубы с помощью вращения через закрепленный на трубе хомут и вдавливания гидравлическим домкратом. Обсадная труба состоит из секций, жестко соединенных между собой. Толщина стенки трубы обычно составляет 4,0 мм. Технология применяется в слабых обводненных грунтах, при наличии которых обсадная труба предотвращает обрушение стенок буровой скважины.

Скорость проходки скважины в значительной степени зависит от вида снаряда, выбранного для разработки грунта.

Достоинства технологии:

1. Отсутствие динамических и вибрационных воздействий на грунт позволяет выполнять сваи вблизи существующих зданий и сооружений.
2. Высокая надежность позволяет безошибочно контролировать процесс бурения с достижением несущего слоя.
3. Позволяет разбуривать или извлекать валуны.
4. Заполнение скважины производится через бетонолитную трубу, что исключает образование шеек при наличии в скважине арматурного каркаса.
5. В процессе бурения осуществляется прямой контроль соответствия фактических инженерно-геологических условий проектным.
6. Возможность устройства уширения позволяет наиболее полно использовать несущую способность сваи.

Недостатки технологии:

1. Низкая производительность заставляет искать проектные решения, обеспечивающие полное использование несущей способности свай по грунту.
2. При прохождении водонасыщенных грунтов во избежание выпора грунта в скважину необходимо создавать грунтовую пробку большой длины или избыточное давление в скважине с помощью воды или глинистого раствора.

На рис. 1.1.2 приведена технологическая схема устройства свай под защитой обсадной трубы.

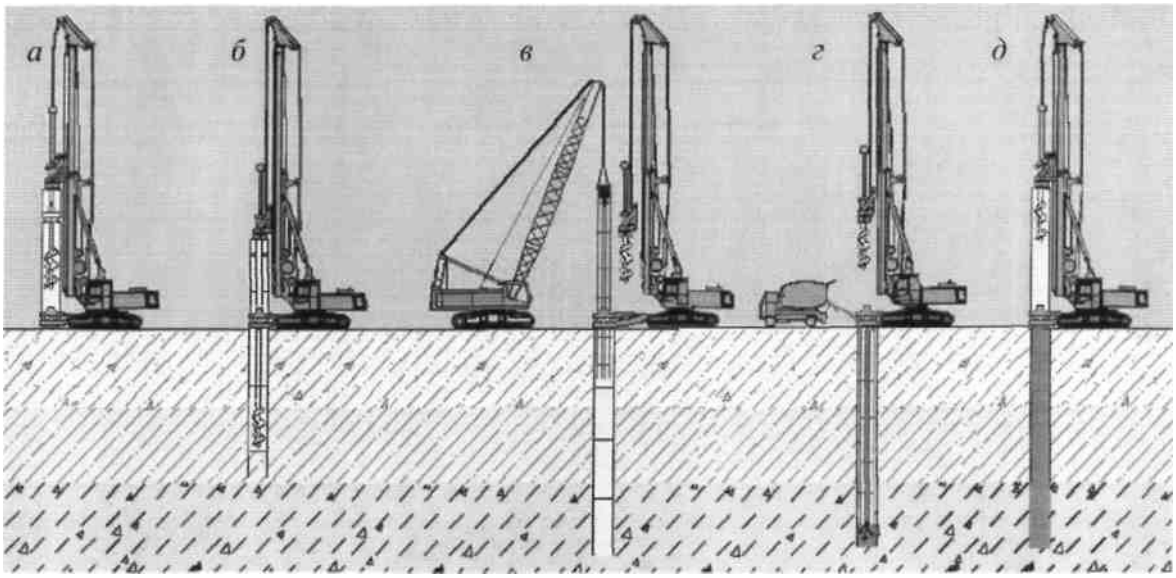


Рис. 1.1.2. Технологическая схема устройства свай под защитой обсадной трубы

Технология устройства свай под защитой глинистого раствора

Технология изготовления свай под защитой глинистого раствора применяется в неустойчивых и водонасыщенных грунтах. В буровую скважину постоянно подается глинистый раствор, который удерживает стенки скважины от обрушения. Глинистый раствор обычно готовят из специальных тонкодисперсных бентонитовых глин, могут применяться и местные глины. Раствор должен иметь плотность от 1,05 до 1,25 г/см .

Глинистый раствор, имея объемный вес, больший, чем у воды, на любой глубине создает избыточное давление и тем самым удерживает частицы грунта на поверхности стенок скважины. Кроме того, частицы раствора закрепляют стенки, образуя небольшую, но устойчивую корку. Благодаря этим свойствам глинистый раствор удерживает стенки скважин от обрушения. При циркуляции раствор выносит на поверхность разрыхленные породы из скважины.

Бетонирование свай ведется методом вертикально перемещающейся трубы (ВПТ). По мере заполнения скважины раствор вытесняется.

В процессе бетонирования глинистый раствор вытесняется бетонной смесью по затрубному пространству к устью скважины, откуда отводится по лоткам в отстойник для очистки и повторного использования. При насыщении раствора цементом его сливают в отвал. Скорость восходящего потока глинистого раствора, равная 0,6..0,7 м/сек, обеспечивает вынос разбуренного грунта на поверхность.

На рис. 1.1.3 представлена технологическая схема устройства свай под защитой глинистого раствора.

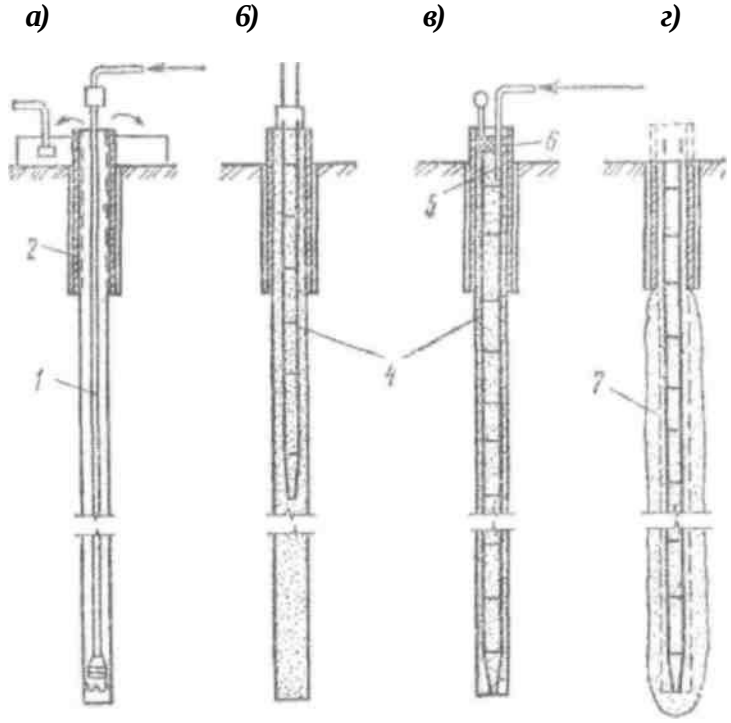


Рис. 1.1.3. Технологическая схема устройства свай под защитой глинистого раствора

а - бурение скважины; б - заполнение скважины раствором, установка арматурного каркаса; в - опрессовка; г - готовая свая; 1 - инъектор; 2 - кондуктор; 3 - цементный раствор; 4 - арматурный каркас; 5 - труба для опрессовки; 6 - тампон; 7 - цементный камень

Буроинъекционные сваи выполняются непосредственно на площадке, поэтому при их изготовлении могут образоваться различного рода дефекты. Основными дефектами буроинъекционных свай являются:

- включения грунта в тело сваи;
- уменьшение диаметра по длине сваи (шейка);
- отсутствие бетона по длине ствола сваи, оголение арматуры.

Все эти дефекты приводят к снижению несущей способности буроинъекционных свай, поэтому при производстве работ необходимо выполнять контроль их качества с помощью специализированного оборудования.

За рубежом сваи с малым диаметром появились впервые в Италии в 50-е годы прошлого века. Идея конструкции и технологии устройства этих свай принадлежит доктору F.Lizzi. Свое изобретение он назвал микросваи вследствие их малого диаметра от 0,1 до 0,25 м. Второе название этих свай -«корневидные» произошло из-за внешнего сходства по условиям работы с корневой системой у деревьев. Как известно, за счет своей корневой системы, сцепленной с грунтовым массивом, дерево противостоит ветру, снегу, землетрясениям и другим внешним воздействиям. Если изучить строение и работу корневой системы дерева, можно поразиться, как надежно тонкие корни, связанные с массивом грунта, воспринимают статические, динамические, вдавливающие и выдергивающие нагрузки, а также горизонтальные усилия и моменты.

Основной целью применения микросвай было усиление фундаментов зданий и сооружений, разрушенных во время II Мировой войны в Италии, а также сохранение и восстановление известных исторических памятников архитектуры.

Широкое распространение в Европе микросваи получили в начале 70-х годов благодаря своей универсальности применения. Микросваи стали использоваться при закреплении откосов у котлованов, стабилизации оползней, укрепления насыпей и подпорных стен, противостоянию конструкций при сейсмических воздействиях и просто как свайные фундаменты под различные сооружения в новом строительстве и при

реконструкции.

В Европе и Америке микросваи в зависимости от технологии изготовления распределяются на четыре типа: A, B, C и D.

Микросваи типа A устраиваются путем подачи бетонной смеси в пробуренную скважину. Затем устанавливается арматурный каркас.

Микросваи типа B изготавливаются путем подачи бетонной смеси в пробуренную скважину под низким давлением в пределах 0,5-1,0 МПа. Затем устанавливается арматурный каркас.

Микросваи типа C устраиваются путем подачи бетонной смеси в пробуренную скважину под действием силы тяжести, как и микросваи типа A. Затем устанавливается арматурный каркас. После монтажа арматурного каркаса в течение 15-25 минут осуществляется принудительная опрессовка бетонной смеси под давлением 1,0 МПа.

Микросваи типа D изготавливаются путем подачи бетонной смеси в пробуренную скважину под давлением 0,5-1,0 МПа. Затем устанавливается арматурный каркас. После монтажа арматурного каркаса осуществляется вторичная принудительная опрессовка бетонной смеси под давлением 2-8 МПа.

Таким образом, различные технологии устройства буроинъекционных свай могут определить и их несущую способность. Достаточная для конкретной геотехнической ситуации несущая способность обеспечивает эффективность и экономическую целесообразность реализации самой идеи устройства буроинъекционных свай. Несомненно, несущая способность связана с конкретными инженерно-геологическими условиями напластований грунтов площадки. Все эти факты должны учитываться при определении несущей способности буроинъекционных свай.

На рис. 1.1.4 представлен схематичный вид свай, выполненных по четырем технологиям европейского стандарта.

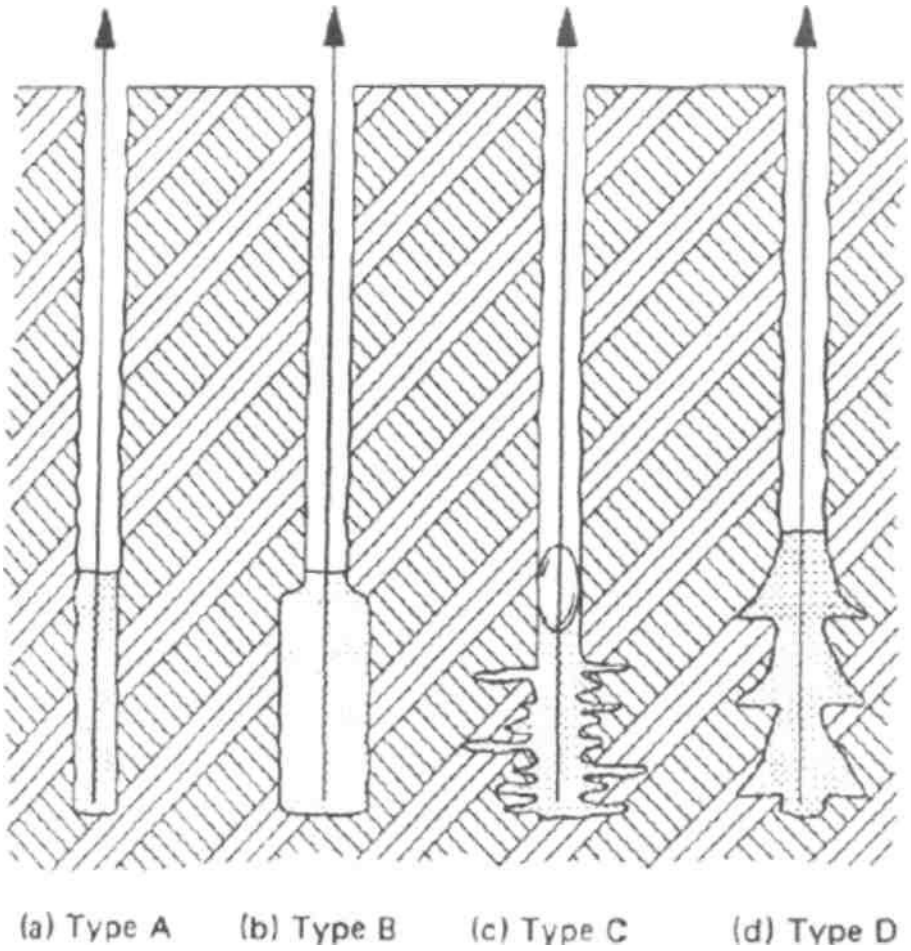


Рис. 1.1.4. Схематичный вид свай, выполненных по четырем технологиям европейского стандарта.

Из свай малого диаметра (или микросвай по Европейскому стандарту) можно отметить: сваи Soileks, сваи Franki и сваи Titan.

Технология устройства свай Soileks.

Сваи Soileks были разработаны в 80-х годах прошлого века в Швеции. Особенность этих свай заключается в формировании «расширяющегося тела», которое образуется при инъекции бетонной смеси или раствора в пакет свернутого листового металла, помещенный в забой скважины, при этом неважно, каким способом образована скважина. После завершения инъекции образуется «луковица» - уширенная пята сваи, диаметр которой превышает диаметр ствола сваи в 5…10 раз. Давление инъекции изменяется обычно от 0,5 до 3,0 МПа и зависит главным образом от глубины скважины и вида

грунта. При формировании «луковицы» происходит обжатие (уплотнение) грунта вокруг пяты сваи.

Поскольку «расширяющееся тело» может работать не только на сжимающие, но и на растягивающие усилия, сваи «Сойлекс» могут использоваться как грунтовые анкеры.

Сваи Soileks объединили в себе принцип «расширяющегося тела» и традиционные методы свайного фундаментостроения - забивку, вдавливание, вибропогружение и забуривание свай.

Технология «расширяющегося тела» может быть совмещена с CFA-сваей. В отличие от традиционных CFA-свай, свая Soileks не требует погружения в плотные слои грунта. «Расширяющееся тело» обжимает грунт вокруг основания сваи и придает ему высокую несущую способность. Это означает, что диаметр сваи может быть уменьшен, что, в свою очередь, позволяет использовать малое буровое оборудование. Диаметр свай варьируется от 200 до 500 мм.

Устройство свай Soileks с использованием вибраторов наиболее эффективно в песчаных грунтах. Этот метод быстр и не повреждает «расширяющееся тело» в процессе погружения. Современные высокочастотные вибраторы снижают риск повреждения окружающих зданий. Процесс вибропогружения обсадной трубы длиной 13 м в песок средней плотности обычно занимает несколько минут.

В плотных грунтах и грунтах, содержащих валуны, целесообразно использовать оборудование для вращательного бурения, чтобы избежать повреждения «расширяющегося тела».

Вибрированные сваи Soileks обычно состоят из стальной трубы длиной 15 м, диаметром 0,15...0,25 м и «тела расширителя», приваренного к ее концу. Для погружения обсадной трубы таких размеров достаточны небольшие вибраторы, использование которых позволяет повысить производительность.

К достоинствам свай Soileks можно отнести:

1. Отсутствие перемещений грунта, шума и вибрации позволяет безопасно применять технологии в стесненных условиях.

2. Технология «расширяющегося тела» может быть совмещена с традиционными методами погружения свай вдавливанием, вибропогружением, забивкой и забуриванием.

3. Уширенная пята сваи Soileks позволяет сократить длину сваи.

4. Несущая способность свай Soileks проверяется путем измерения объема нагнетаемого бетона и давления нагнетания.

На рис. 1.1.5 приведена технологическая схема устройства свай Soileks.

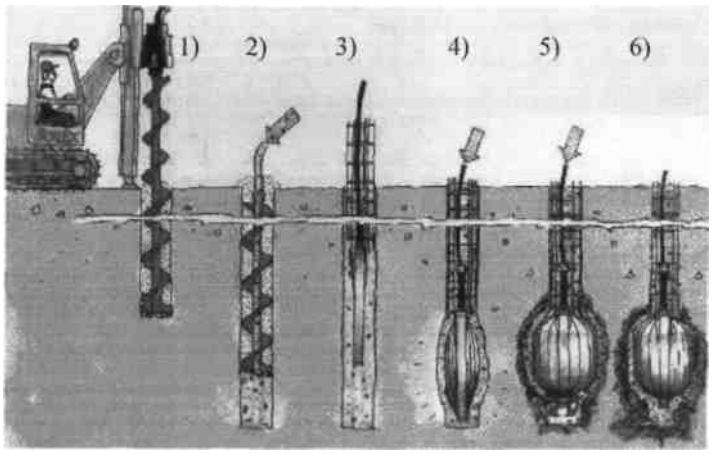


Рис. 1.1.5. Технологическая схема устройства свай Soileks 1 - образование скважины проходным шнеком; 2- постепенное извлечение шнека с заполнением скважины бетонной смесью; 3 - погружение пакета из металлических пластин в забой скважины, погружение армокаркаса; 4 и 5 -нагнетание бетонной смеси в пакет из металлических пластин; 6 - готовая свая.

Технология устройства свай Franki

1. Установка трубы, нижний конец которой закрыт башмаком, на точку предполагаемого устройства сваи.

2. Ввинчивание с промывкой в грунт по часовой стрелке трубы, закрытой снизу башмаком под действием крутящего момента и вдавливающего усилия.

3. Заполнение (под давлением) скважины инъекционным раствором через трубу, которая одновременно выполняет роль арматуры.

Сваи изготавливаются диаметром 150...350 мм.

На рис. 1.1.6 представлена технологическая схема устройства свай Franki.

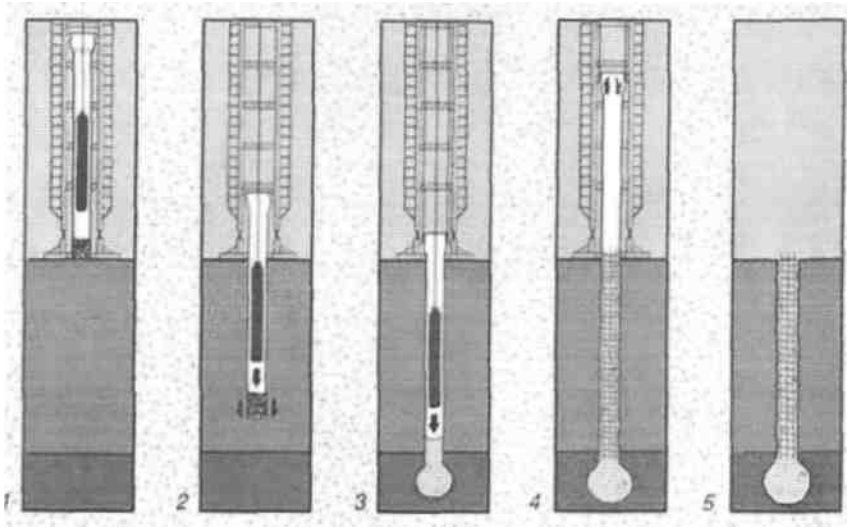


Рис. 1.1.6. Технологическая схема устройства свай Franki

Технология устройства свай Titan.

Сваи Titan используются в качестве анкеров, но могут также применяться в строительном производстве как обычные сваи. Технология устройства анкерных свай Titan следующая: вначале осуществляется бурение скважины и одновременно в скважину подается промывающая жидкость, которая вымывает остатки пробуренного фунта, а также расширяет и закрепляет стенки скважины. Затем через трубу подается бетонная смесь, которая под давлением 0,4-0,6 МПа выходит из отверстия в буровой коронке и заполняет всю скважину. За счет ударно-вращательного бурения происходит естественное уплотнение фунта и существенное повышение его

несущей способности. Несущим элементом в анкерных сваях является рифленая пустотелая металлическая труба из мелкозернистой стали. По периметру сечения трубы и внутри ее находится бетон, который также является несущим элементом. Типовая конструкция анкерной сваи следующая:, в верхней части рифленой металлической пустотелой трубы находится пластина и гайка, в середине трубы расположена распорка, на острие прикручена буровая коронка, которая является режущим органом сваи с отверстием для выхода промывающей жидкости и впрессовывания бетонной смеси под давлением.

На рис. 1.1.7 представлена технологическая схема устройства свай Titan.

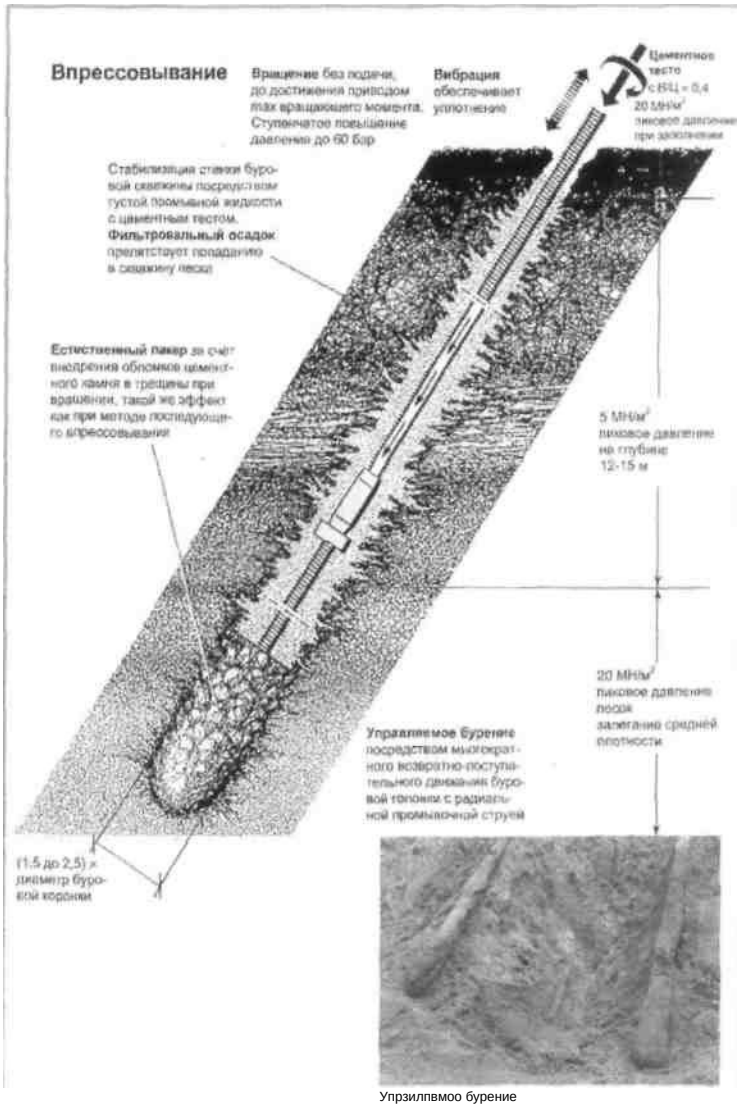


Рис. 1.1.7. Технологическая схема устройства свай Titan

1.2 Регламент для проектирования и устройства буроинъекционных свай

В настоящее время существует много различных нормативных документов, в которых есть рекомендации и указания по проектированию буроинъекционных свай. Приведем краткий обзор существующих нормативных документов, исследований специалистов в этой области и дадим их краткий анализ.

В СНиПе 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» [86] дается определение буроинъекционных свай, рекомендуется при расчете по материалу учитывать продольный изгиб сваи, и приводятся коэффициенты условий работы грунта по боковой поверхности сваи. Столь малая информация о буроинъекционных сваях объясняется весьма простыми причинами: нормы были разработаны для нового строительства, к тому же объемы применения этих свай в то время были незначительны по сравнению с настоящей практикой.

Первым отечественным нормативным документом, регламентирующим область применения, конструирование, указания по расчету и производству работ по устройству буроинъекционных свай, являются «Рекомендации по применению буроинъекционных свай», изданные сотрудниками НИИОСП в 1984 г. В 1997 и 2001 году вышли их переиздания. В 2007 г. вышли «Рекомендации по применению микросвай» [74], в которые уже внесены существенные изменения по проектированию и производству работ при устройстве микросвай, а также методам их расчета. В Москве в 1984 году специалистами «Спецпроектреставрация» совместно с НПФ «Реставратор» были изданы «Методические рекомендации» по проектированию и производству работ буроинъекционных свай при усилении фундаментов [55]. Позднее они были доработаны и переизданы в 1997 и 2001 годах. В этих рекомендациях даны примеры и указания по усилению фундаментов буроинъекционными сваями, даны рекомендации по производству работ. В 2004 году вышли «Методические рекомендации» по усилению оснований и

фундаментов зданий при реконструкции исторической застройки Санкт-Петербурга с использованием инъекционных методов [56].

В 1996 году в Санкт-Петербурге были изданы ТСН 50-302-96 «Устройство фундаментов гражданских зданий и сооружений в Санкт-Петербурге и на территориях административно подчиненных Санкт-Петербургу» [71]. В 2004 году ТСН был дополнен, а в 2007 году более тщательно разработан и переиздан. В Москве в 1998 году были изданы городские нормы: «Рекомендации по расчету, проектированию и устройству свайных фундаментов нового типа» [77], «Рекомендации по проектированию и устройству оснований, фундаментов и подземных сооружений при реконструкции гражданских зданий и исторической застройки» [78]. В этих нормативных документах дается лишь общее понятие буроинъекционных свай и обозначена область их применения.

В 2003 году вышел СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов» [70], в котором более подробно описана технологическая последовательность изготовления буроинъекционных свай.

В Белоруссии в 2005 г было переиздано Пособие по проектированию и устройству буроинъекционных анкеров и свай [67]. В Пособие дается классификация, конструктивные особенности, область применения и указания по расчету буроинъекционных свай.

Согласно исследованиям Федоровского В. Г. [108] работу буронабивной сваи на вертикальную нагрузку можно разделить на две стадии:

- в первой стадии происходит развитие проскальзывания грунта по боковой поверхности сваи;
- во второй стадии происходит развитие зон предельного состояния грунта по боковой поверхности и под острием сваи, что приводит к резкому увеличению осадки.

По требованиям СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» несущая способность висячей сваи по грунту F_d, кН, на сжимающую нагрузку, определяется как сумма расчетных сопротивлений грунтов основания под

нижним концом сваи и по ее боковой поверхности по следующей формуле:

$$F_d = \gamma_C (\gamma_{CR} R A + U \sum_{i=1} \gamma_{Cf} f_i h_i)$$

где γ_C. – коэффициент условий работы сваи в грунте, принимаемый γ_C=1;

R– расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа, принимаемое по таблице 6.4;

A– площадь опирания на грунт сваи, м;

U– наружный периметр поперечного сечения сваи, м;

f_i – расчетное сопротивлениеi-го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи, кПа, принимаемое по таблице 6.5;

h_i- толщинаi-го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м. Пласты грунтов следует расчленить на слои толщиной не более 2 м.

γ_{CR},γ_C– коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи, принимаемые по таблице 6.6.

Примечание к таблице 6.4. В числителе приводятся расчетные сопротивления для песчаных грунтов.

Фактически формула (1.2.1) не отличается от традиционного метода расчета несущей способности забивных свай. Формула (1.2.1) была предложена профессором Лугой А. А. [52] на основе статистической обработки более 3000 полевых испытаний. В своих исследованиях Лугой А. А. были получены эмпирические значения расчетных сопротивлений действующих по боковой поверхности свай и по их острию. Однако для буроинъекционных свай величины этих сопротивлений будут занижены, так как в предлагаемой формуле не учитываются увеличение диаметра изготовленных свай и возрастание сил трения по боковой поверхности сваи опрессовке.

По исследованиям Клейнера И. М. [47] при опрессовке бетонной смеси силы трения по боковой поверхности сваи возрастают в глинистых грунтах в 1,4-1,6 раз, в песчаных в 1,2-1,3 раза.

Лапшиным Ф. К. [51] было установлено, что показатель консистенции грунта 1_L на основе которого принимаются расчетные сопротивления свай на сжимающую нагрузку, не характеризует с достаточной точностью прочностные и деформативные характеристики грунта. Кроме того, при определении показателя консистенции существуют многочисленные факторы, которые вносят значительную погрешность в его значения (способ отбора грунта, условия перевозки и хранения, образцов грунта, субъективный человеческий фактор при лабораторных испытаниях и т.д.).

Согласно исследованиям ученых Работникова А. И., Корякина В. С, Баходина Б. В. и Игонькина Н. Т. [51] фактические сопротивления, действующие по боковой поверхности буронабивных свай, значительно превышают нормативные сопротивления в таблицах СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты».

Профессором Парамоновым В. Н. [64] было выполнено сравнение фактической и рассчитанной по СНиП несущей способности буронабивных свай в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Для этого он произвел статистическую обработку 80 испытаний свай на статическую вдавливающую нагрузку. В выборку входили буронабивные сваи различного диаметра, длины и технологии устройства. Согласно его работе предварительная несущая способность буронабивных свай на площадке может быть назначена в 1,7 раза выше рассчитанной по СНиП (без учета технологии изготовления свай).

В нормативном документе ТСН 50-302-2004 в пункте 12.1 говорится следующее: «При проектировании фундаментов из буровых свай рекомендуется учитывать, что их несущая способность по грунту, определенная по результатам статических испытаний, будет, как правило, в 1,5 раза выше рассчитанной по СНиП 2.02.03-85». Однако эта рекомендация не дает четких указаний по увеличению несущей способности сваи в 1,5 раза

и не учитывает влияние технологии устройства сваи на ее работу в грунте.

В СП 50-102-2003 в пункте 7.3.5 говорится: «Если при максимальной достигнутой при полевых испытаниях нагрузке, которая окажется равной или более 1,5 *Fd* (где *Fd* - несущая способность сваи, рассчитанная по требованиям норм), осадка сваи при испытаниях окажется менее значения нормируемого по СНиП, то в этом случае за частное значение предельного сопротивления сваи допускается принимать максимальную нагрузку, полученную при испытаниях».

В зависимости от технологии изготовления буроинъекционных свай с учетом опрессовки в СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» даны коэффициенты условий работы грунта по боковой поверхности сваи - y_C(-:

- под защитой обсадных труб (y_{cf} = 0,8-0,9);
- под защитой глинистого раствора ($y_C f$ = 0,8-0,9);

Необходимо отметить, что коэффициенты *Ycf* Для буроинъекционных свай существенно занижены по сравнению, например, с технологией устройства забивных свай, для которых этот коэффициент составляет Y_{cf} = 1,0. При соблюдении технологии изготовления и надлежащем качестве выполнения диаметр буроинъекционных свай, как правило, больше проектного, а фактические сопротивления по боковой поверхности значительно выше табличных значений СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты».

Несущая способность буроинъекционной сваи по материалу согласно рекомендациям Джантимирова Х. А. [39] определяется по формуле:

$$F_d = \gamma_C R A$$

где γ_C = 1 – коэффициент условий работы свай в грунте;

A – площадь опирания сваи на грунт, м ;

R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи-стойки, следует принимать 20000 кПа.

Расчетное значение коэффициента постели c_z, кН/м^3, грунта на боковой поверхности сваи при отсутствии опытных данных допускается определять по формуле:

$$C_Z = K_Z$$

где K - коэффициент пропорциональности, кН/м^4, принимаемый в зависимости от вида грунта, окружающего сваю, по таблице Д.1 СНиП; z - глубина расположения сечения сваи в грунте, м, для которой определяют коэффициент постели по отношению к поверхности грунта при высоком ростверке или к подошве ростверка при низком ростверке.

Согласно СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов» несущую способность сваи на горизонтальную нагрузку можно также определить на основе коэффициента пассивного давления для несвязных грунтов и сопротивления недреннированному сдвигу для связных грунтов. Несущая способность сваи на горизонтальную нагрузку Я, кН, в связных грунтах определяется по формуле:

$$H=c_u d^2 P_c$$

где c_u - расчетное среднее значение недренированного сопротивления грунта сдвигу, определяемое для участка от поверхности грунта до глубины 10, кПа;

d - диаметр или ширина ствола сваи, м;

p_c - безразмерный коэффициент прочности ствола сваи, определяемый по таблице в СП в зависимости от безразмерного показателя m_c и вида заделки головы сваи:

Несущая способность сваи на горизонтальную нагрузку в несвязных грунтах определяется по формуле:

$$H\text{-}к^{2}_{рy1}с1^{2}р \qquad (1.2.10)$$

где $к_p$ - коэффициент пассивного бокового давления грунта, равный $к=(1+\sin <p)/(1-\sin ф)$;

1 - расчетное значение удельного веса грунта (при водонасыщенных грунтах с учетом взвешивающего действия воды), кН/м^3;

р - безразмерный коэффициент, определяемый по таблице СП в зависимости от безразмерного показателя m_n, вычисляемого по формуле

Конструктивные особенности и технология изготовления буроинъекционных свай существенно влияют на их работу в грунте и, соответственно, на их несущую способность. В частности, из-за малого диаметра несущая способность висячей сваи обеспечивается, в основном, за счет трения по боковой поверхности. Большая гибкость этих свай при наличии слабых грунтов может вызвать деформации ее ствола или даже потерю устойчивости. Прочностные и деформативные характеристики цементно-песчаной смеси очень сильно зависят от качества и условий изготовления и значительно отличаются от характеристик бетонной смеси. В процессе опрессовки цементно-песчаной смеси происходит адгезия ствола сваи с грунтовым массивом. При последующей передаче на сваю вертикальной нагрузки силы трения, действующие по ее боковой поверхности, возрастают в несколько раз. С увеличением угла наклона сваи возрастают внутренние усилия, из-за которых несущая способность сваи по материалу может оказаться значительно ниже, чем по грунту.

Несмотря на значительный вклад ученых и инженеров по исследованию работы буроинъекционных свай, есть ряд вопросов, которые еще недостаточно изучены. В частности нет четких указаний по расчету буроинъекционных свай на горизонтальную нагрузку и расчету наклонных буроинъекционных свай на вертикальную нагрузку. Недостаточно изучен вопрос влияния конструктивных особенностей и технологии изготовления буроинъекционных свай на их несущую способность. Нет специальных рекомендаций по обеспечению долговечности, надежности и эффективности

применения гибких и длинных свай в условиях слабых грунтов. Представляется, что эти факторы могут явиться определяющими при устройстве в грунте свай малого диаметра, особенно в толще слабых водонасыщенных грунтов, характерных для многих регионов страны.

1.3 Краткая характеристика инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга

Для оценки инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга был выполнен краткий анализ их характерных особенностей на основе работ ученых Л. Г. Заварзина, В. М. Фурсы, В. М. Бевзюка и др [109, 13].

Санкт-Петербург расположен на восточном берегу Финского залива в устье реки Невы. В пределах города можно выделить три крупных геоморфологических района: 1). Приморский низменный район; 2). Приневская низменность; 3). Возвышенный террасированный район.

Приморский район характеризуется самыми низкими абсолютными отметками плюс 10...12 м, поэтому в прежние годы во время значительных наводнений почти вся эта территория затапливалась. Территория включает в себя центральную часть города, расположенную в дельте реки Невы на островах: Васильевском, Петроградском, Крестовском, Елагином, Каменном. Кроме того, сюда входят районы Старой и Новой деревни, восточная граница между Фонтанкой и Моховой и на запад до Стрельны.

Приневская низменность располагается на абсолютных отметках плюс 20.....30 м вдоль Ладожского озера до Финского залива. Северная граница включает в себя Удельную, Полюстрово, Большую и Малую Охту и почти всю южную часть города.

Возвышенный террасированный район расположен на абсолютных отметках плюс 30.....40 м в северо-восточной части города. В него входят Выборгский и Калининский районы, Парголово, Сосновый парк, Пулковская, Дудергофская и Литовская возвышенности.

В инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга длина буроинъекционных свай может достигать 30 м. Однако, как правило, длина

этих свай вследствие значительной гибкости не превышает 20...25 м. На глубинах до 20 м грунты представлены преимущественно четвертичными отложениями, для которых характерна значительная пестрота литолого-генетических разностей, частая перемежаемость, выклинивание с изменением отдельных слоев, как по мощности и простиранию, так и по физико-механическим характеристикам.

Для Санкт-Петербурга в пределах мощности грунтов до 30 м характерны три грунтовых комплекса. Первый грунтовый комплекс расположен в северной части города и представлен песками, супесями и суглинками, обладающими сравнительно хорошими прочностными и деформативными свойствами. Второй комплекс характерен для южной части города и представлен лужской мореной обладающей достаточно благоприятными для строительства характеристиками. Третий грунтовый комплекс расположен в центральной части города и в его западной и восточной частях, где под техногенными отложениями мощностью около 2 м, залегают дельтовые отложения, представленные пылеватыми водонасыщенными песками и супесями мощностью 2...10 м. Подстилающие слои представлены значительной толщей от 10 до 30 м слабых суглинков и супесей. Кровля достаточно прочных моренных отложений залегает на глубине 20.…30 м, от поверхности, а на некоторых площадках расположена на глубине 40.…60 м.

Часто именно в этих грунтах располагается значительная часть длины свай трения.

Для пылевато-глинистых грунтов Санкт-Петербурга характерны следующие свойства:

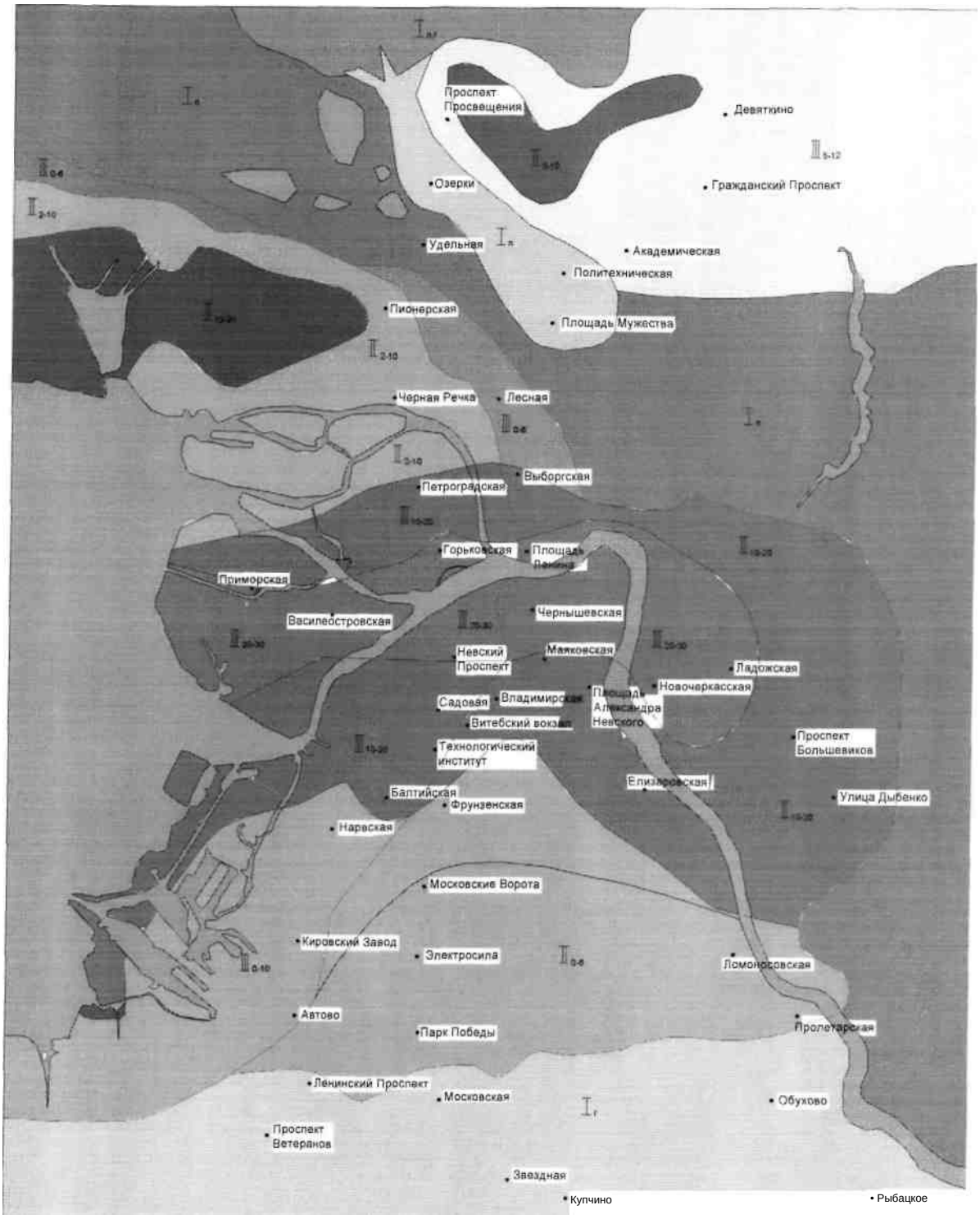
- большие, неравномерные, длительно незатухающие деформации;
- разрушение природной структуры грунтов при традиционных способах производства земляных работ и изготовления свай;
- плывунные явления при открытом водоотливе из котлованов и траншей;

- изменение несущей способности свай вследствие развития сил отрицательного трения на участках, поднятых намытым или насыпным грунтом;
- развитие процессов разложения торфяных грунтов и органических включений в грунте при понижении уровня подземных вод.

Для многих площадок строительства в Санкт-Петербурге характерна большая мощность слабых, водонасыщенных, тиксотропных пылевато-глинистых грунтов. В пределах этой мощности грунты неоднородны по составу и простиранию, а также по прочностным и деформативным характеристикам.

На рис. 1.3.1 представлена схема характерных особенностей инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга по исследованиям работ Заварзина Л. Г. [109].

Таким образом, в зависимости от конкретного напластования грунтов может быть выбрана оптимальная технология устройства буроинъекционных свай и их геометрические параметры. В инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга буроинъекционные сваи могут применяться не только при реконструкции, но и в новом строительстве.



Плотный грунт	Слабый грунт / Платний грунт	Платний грунт / Слабый грун-; / Плотный Фунт

—глубина залегания

—глинистый грунт

Рис. 1.3.1. Схема характерных особенностей инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга (по Заварзину)

1.4 Цель и задачи исследования

Область применения и характер работы буроинъекционных свай предполагает как совместное, так и раздельное восприятие вертикальной и горизонтальной нагрузок. Несущая способность буроинъекционных свай в связи со значительной длиной, малым диаметром и особенностями устройства в значительно большей степени, чем для буровых свай зависит от качества и технологии их изготовления, характера и условий работы.

Целью настоящего исследования является совершенствование метода расчета несущей способности буроинъекционных свай на вертикальную и горизонтальную нагрузки с учетом технологии их изготовления.

Для достижения этой цели предполагается решение следующих задач:

- теоретическая оценка влияния конструктивных особенностей и ряда технологий изготовления свай на их несущую способность по грунту и по материалу;
- разработка инженерного метода расчета буроинъекционной сваи на горизонтальную нагрузку и наклонной сваи на вертикальную нагрузку.
- сравнение несущей способности буроинъекционных свай, рассчитанной по таблицам СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» с результатами полевых испытаний и статистическая обработка теоретических и фактических значений несущей способности;
- оценка влияния ряда технологий изготовления буроинъекционных свай на их несущую способность по грунту на основе статистического анализа;
- анализ работы сваи на горизонтальную нагрузку и его сопоставление с инженерным расчетом, расчетом по требованиям СП 50-102-2003 и численным моделированием;
- анализ работы наклонной сваи на вертикальную сжимающую нагрузку и его сравнение с теоретическими исследованиями;

внедрение результатов исследований на объектах применения буроинъекционных свай.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ НА

ВЕРТИКАЛЬНУЮ И ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ НАГРУЗКИ

2.1 Несущая способность буроинъекционной сваи на вертикальную сжимающую нагрузку

Для обеспечения безопасного строительства, надежности и долговечности любой конструкции необходимо выполнение трех основных условий: жесткости (деформативности), прочности, и устойчивости. Для выполнения первого условия необходимо, чтобы деформации конструкции или элемента не превысили значений, при которых их эксплуатация будет невозможной из-за технических, технологических и эстетико-психологических требований. Для выполнения второго условия необходимо, чтобы напряжения в конструкции или элементе не превышали расчетного сопротивления материалов. Для выполнения третьего условия необходимо, чтобы конструкция или элемент сохранял свою первоначальную форму равновесия при постоянном воздействии внешних и внутренних усилий.

Под общим понятием несущей способности понимается величина силовой характеристики для конструкции или элемента, при воздействии которой, будут удовлетворены условия деформативности, прочности, и устойчивости на протяжении всего срока их эксплуатации. При этом, согласно современным требованиям, необходимо, чтобы затраты на проектирование, производство работ и эксплуатацию конструкции были минимальны.

В данной работе выполнено исследование несущей способности буроинъекционных свай по грунту на вертикальную и горизонтальную нагрузки. Ниже приведены основные условия, при выполнении которых обеспечивается несущая способность буроинъекционных свай.

Условие деформативности.

При незначительных моментных и горизонтальных усилиях в свае, модуле деформации грунтов по боковой поверхности сваи не менее 5... 10 МПа, расчетного сопротивления по боковой поверхности сваи большего, чем расчетное сопротивление по острию, наименьшим значением несущей способности будет величина, полученная из условия деформативности грунта.

Весьма спорным вопросом является определение предельно допустимой осадки сваи в грунте. Согласно требованиям ГОСТ 5686-94 п. 8.2.4: «Нагрузка при испытании натурной сваей должна быть доведена до значения, при котором общая осадка сваи составляет не менее 40 мм». Частные значения предельного сопротивления сваи по грунту по результатам полевых испытаний грунтов сваями или, иначе говоря, величину предельной осадки для сваи определяют по указаниям СНиП 2.02.03.-85 «Свайные фундаменты», исходя из величины предельно допустимого значения средней осадки для фундамента проектируемого здания или сооружения.

Как известно, существует три фазы напряженно-деформированного состояния грунта: уплотнение, сдвиг и разрушение. Зависимости осадки сваи от нагрузки S -$f(P)$ можно условно распределить на три характерных типа в зависимости от деформативных характеристик грунтов, окружающих боковую поверхность свай. Первый тип характерен для малосжимаемых грунтов с модулем деформации более 15 МПа. Ступени нагружения при проведении испытаний ведут к незначительным осадкам и зависимость близка к кусочно-линейной. Второй тип характерен для грунтов средней сжимаемости с модулем деформации 10 - 15 МПа. Осадки сваи при нагружении развиваются постепенно и достаточно быстро затухают, а зависимость выражена в виде пологой гиперболы. Третий тип характерен для сильносжимаемых грунтов с модулем деформации менее 10 МПа. Осадки сваи носят провальный характер и не затухают длительное время после приложения очередной ступени нагрузки, а зависимость представлена в виде крутой гиперболы.

На рис. 2.1.1 можно увидеть, что для различных типов зависимостей осадки сваи от нагрузки не может быть одной величины предельного сопротивления. Если нормируемая величина предельного сопротивления будет верна для кривой 2, то для кривой 1 она будет далека от предельной, а для кривой 3 она будет уже запредельной, то есть весьма близкой к срыву сваи. Из этого можно сделать вывод о том, что величину предельного сопротивления сваи необходимо определять, исходя от инженерно-геологических условий конкретной площадки, а не в зависимости от предельной осадки для фундаментов проектируемого здания или сооружения. Хотя, конечно, с точки зрения проектировщика удобнее использовать методику, основанную на величине предельно допустимой осадки для проектируемого фундамента.

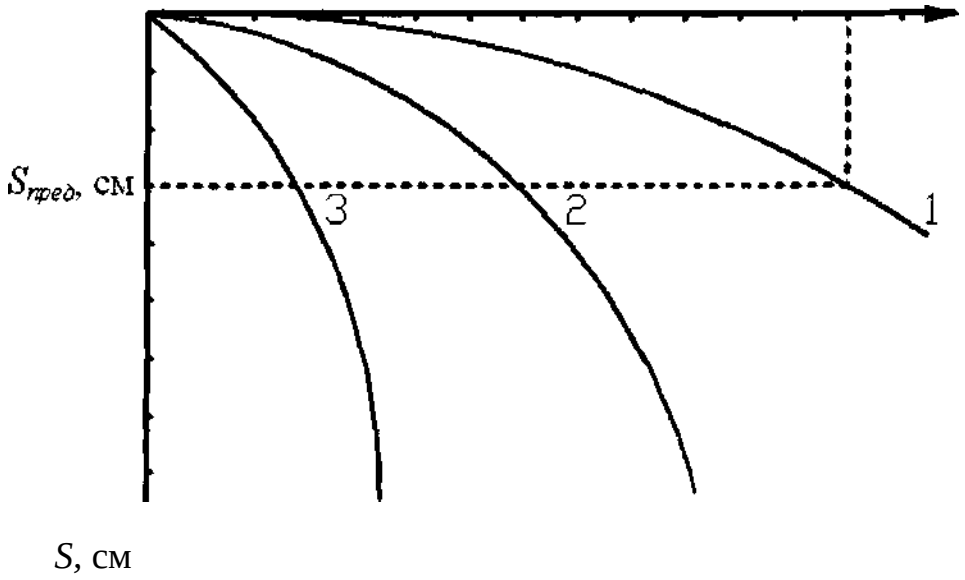


Рис. 2.1.1. Условное распределение трех характерных типов зависимостей осадки сваи от нагрузки

Условие прочности сваи по **грунту (Несущая способность сваи по грунту).**

Согласно рекомендации СП 50-120-2003 расход инъекционного раствора на одну опрессованную скважину для буроинъекционной сваи должен быть не менее 1,25 и не более 2,5 объема скважины. Эта рекомендация подразумевает значительный перерасход цементно-песчанои смеси при ее опрессовке под давлением.

Рассмотрим, как общая для всех технологий последовательность изготовления буроинъекционой сваи влияет на ее несущую способность. В процессе бурения, при любом способе устройства скважины происходит разрушение структурных связей грунта. При последующей подаче бетонной смеси происходит уплотнение грунта, окружающего стенки скважины. Затем при опрессовке происходит вытеснение грунта бетонной смесью, в результате у ствола сваи образуются местные уширения. Кроме того, в процессе опрессовки происходит адгезия частиц бетонной смеси с грунтом и образуется своего рода грунтобетонный массив. Эти особенности не учитываются нормативными документами, поэтому несущая способность свай, определенная по результатам полевых испытаний, значительно превышает рассчитанную по таблицам СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты». При анализе многочисленных полевых испытаний идентичных буроинъекционных свай в одинаковых инженерно-геологических условиях на вертикальную сжимающую нагрузку кривые зависимости осадки сваи от нагрузки носили значительные расхождения. Эта особенность объясняется не только естественным разбросом прочностных и деформативных характеристик грунтов, но также и значительным отличием геометрических параметров изготавливаемых свай.

Исходя из вышеизложенного, введем понятие приведенного диаметра сваи, который можно определить на основе объема бетонной смеси, поданной в скважину. Тогда несущую способность по грунту висячей буроинъекционной сваи на вертикальную нагрузку можно определить по формуле:

$$F_d = \gamma_c \left(\gamma_{cR} \cdot R \cdot \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4} + \pi \cdot d_{np} \sum \gamma_{cf_i} \cdot h_i \cdot f_i \right), \qquad (2.1.1)$$

где $\gamma_c = 0{,}8 - 1{,}0$ - коэффициент условий работы сваи, принимаемый по СНиП 2.02.03-85;

$\gamma_{cR} = 0{,}9 - 1{,}0$ - коэффициент условий работы грунта под нижним концом сваи, принимаемый по СНиП 2.02.03-85;

R - расчетное сопротивление под острием сваи, принимаемое по таблице 7 СНиП 2.02.03-85, кПа;

d_{np} - приведенный диаметр сваи, м;

γ_{cf} - коэффициент условий работы грунта по боковой поверхности сваи, принимаемый по таблице 5 СНиП 2.02.03-85;

h_i - толщина i-го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м;

f_i - расчетное сопротивление i-го слоя грунта на боковой поверхности сваи, принимаемое по таблице 2 СНиП 2.02.03-85, кПа.

Таким образом, для более точного определения несущей способности буроинъекционной сваи по грунту на вертикальную сжимающую нагрузку расчетным способом необходимо учитывать увеличение ее диаметра и возрастание сил трения по боковой поверхности сваи. Исследования по возрастанию сил трения по боковой поверхности сваи при опрессовке бетонной смеси под давлением имеются в диссертации Клейнера И. М. [47]. Согласно исследованиям Клейнера И. М. на несущую способность буроинъекционных свай оказывает значительное влияние

продолжительность и величина давления опрессовки бетонной смеси.

На рис. 2.1.2. представлена расчетная схема к определению несущей способности сваи по грунту на вертикальную сжимающую нагрузку.

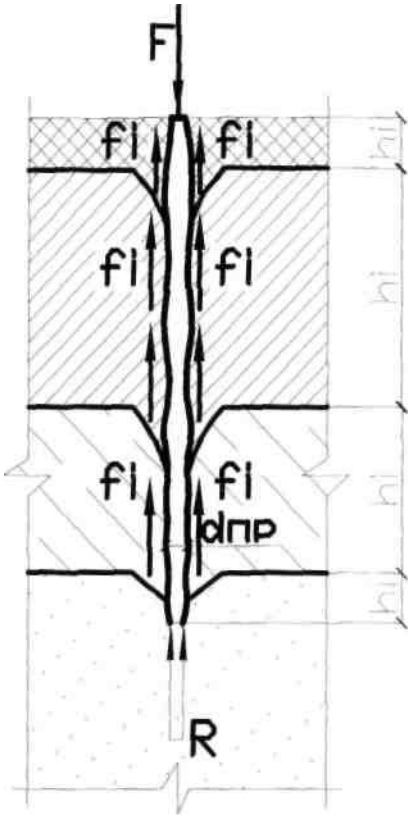


Рис. 2.1.2. Расчетная схема к определению несущей способности сваи на вертикальную нагрузку

Кроме увеличенного диаметра сваи и возрастания сил трения, необходимо также учитывать влияние характерных особенностей каждой технологии изготовления буроинъекционных свай на их несущую способность. В настоящее время на объектах гражданского строительства в Санкт-Петербурге в основном применяются следующие отечественные технологии изготовления буроинъекционных свай: 1). С помощью проходного шнека;

2). Под защитой обсадных труб (извлекаемых и неизвлекаемых); 3).

Под защитой глинистого раствора.

Из зарубежных технологий в Санкт-Петербурге наиболее широко применяются микросваи Titan.

Основные различия в технологиях изготовления буроинъекционных свай состоят в способе бурения скважины в грунте и последующей подаче

бетонной смеси. Кратко приведем основные достоинства и недостатки технологий изготовления буроинъекционных свай на основе наблюдений автора. К достоинствам технологии изготовления свай с помощью проходного шнека можно отнести высокую производительность бурения скважины в грунте. К недостаткам - повышенный расход бетонной смеси вследствие выбуривания большего объема грунта. К достоинствам свай, устраиваемых под защитой обсадной трубы, можно отнести некоторое уплотнение грунта по периметру скважины при устройстве свай. К недостаткам - небольшую скорость производства работ по сравнению с другими технологиями, большие расходы на стальные неизвлекаемые трубы. К достоинствам свай, устраиваемых под защитой глинистого раствора, можно отнести наиболее щадящую технологию производства работ и гарантированную установку арматурного каркаса на всю длину сваи. К недостаткам - большая загрязненность участка при производстве работ, возможность потери устойчивости стенок скважины, кальматация стенок скважины, в результате которой происходит снижение сил трения действующих по боковой поверхности сваи. К достоинствам свай, устраиваемых по технологии Titan, можно отнести большую скорость производства работ и высокое давление, при опрессовке увеличивающее силы трения по боковой поверхности сваи. К недостаткам - большая стоимость бурового неизвлекаемого оборудования, ограниченный диаметр сваи 0,15…..0,25 м, низкая несущая способность сваи на горизонтальные и моментные усилия.

Для более полной и достоверной оценки влияния каждой технологии изготовления свай на их несущую способность необходимо учесть многочисленные факторы, малейшее изменение которых, значительно повлияет на величину несущей способности. Исходя из проведенных ранее исследований [39, 47, 51, 53], а также на основе простого анализа физических процессов происходящих при изготовлении буроинъекционных свай в грунте можно легко определить основные факторы, влияющие на несущую

способность буроинъекционных свай. К наиболее значимым факторам относятся:

- диаметр скважины;
- способ и скорость бурения скважины;
- диаметр шнека;
- толщина стенки обсадной трубы;
- вид применяемого глинистого раствора;
- характеристики мелкозернистой бетонной смеси;
- продолжительность и величина давления опрессовки.

К сожалению многие из вышеперечисленных характеристик не фиксируются при производстве работ по устройству буроинъекционных свай и при проведении полевых испытаний, поэтому анализ влияния этих факторов в данном исследовании не производился.

Условие прочности по материалу (Несущая способность сваи по материалу).

Рекомендуемый СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» расчет сваи на прочность по материалу ствола основан на методике расчета железобетонного сечения СНиП 2.03.01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции». Несущая способность буроинъекционных свай по материалу определяется прочностными и деформативными характеристиками бетона и арматуры, их площадью сечения и конструктивными особенностями устройства. Первичной задачей при расчете сваи на прочность по материалу является верное определение внутренних усилий, действующих в свае, и их сравнение с предельно допустимыми, исходя из условия прочности. Величины внутренних усилий, действующих в свае, зависят от внешних нагрузок, граничных условий закрепления головы сваи, жесткостных параметров сваи, способа размещения и характера работы сваи в грунте.

Внешние нагрузки на сваю, как правило, уже известны на стадии проекта, однако практика показывает, что к этому вопросу надо относиться особенно внимательно, так как проектные и фактические нагрузки могут

существенно отличаться. Это может произойти при внесении конструктивных изменений в проект при производстве работ, производственными дефектами при изготовлении конструкций, либо вследствие изменения напряженно-деформированного состояния грунтов при реконструкции и новом строительстве. Если для обычных свай незначительное увеличение вертикального, горизонтального или моментного усилий незначительно отразится на их работе, то для гибких буроинъекционных свай это может существенно повлиять на их напряженно-деформированное состояние. Для учета всех этих факторов уже на проектной стадии строительства все расчеты необходимо производить по деформированной схеме, то есть учитывать влияние деформаций на величины внутренних усилий.

Граничные условия закрепления головы сваи определяются конструктивной схемой сопряжения головы сваи в ростверке. Различают три основных схемы сопряжения головы сваи в ростверке:

- свободная от закреплений (голова сваи конструктивно не связана с ростверком);
- шарнирное закрепление (голова сваи заделана в ростверк на глубину 5-10 см);
- жесткое защемление (голова сваи или выпуски арматуры заделаны в ростверк на глубину, соответствующую длине анкеровки арматуры, определенной по расчету).

Схема сопряжения головы сваи в ростверке влияет на их совместную работу и, соответственно, на величины деформаций и усилий сваи.

При прочих равных условиях голова сваи, свободная от закреплений, будет иметь максимальные деформации и минимальные усилия.

При жестком защемлении головы сваи деформации будут минимальные, а усилия максимальные.

Жесткость сваи зависит от диаметра сваи, прочности и площади сечения бетона и арматуры и типа армирования бетонного ствола сваи. Ниже

в разделе 2.2 проведено исследование влияния на жесткость сваи класса бетона и площади сечения арматуры, при диаметрах сваи 0,13.....0,35 м.

Кратко опишем основные типы армирования бетонного ствола сваи:

- одиночным центрально расположенным стержнем;
- пространственным арматурным каркасом;
- стальной трубой из прокатного профиля.

Армирование одиночным стержнем целесообразно выполнять для свай, работающих на вдавливающие и выдергивающие нагрузки, действующие вдоль оси сваи.

Пространственный каркас желательно применять для свай, работающих в основном на сжимающие усилия и незначительные горизонтальные и моментные усилия.

Армирование стальной трубой лучше использовать для фундаментов, испытывающих значительные знакопеременные горизонтальные и моментные усилия, в слабых грунтах с модулем деформации менее 5 МПа, а также для вывешивания конструкций на буроинъекционных сваях при понижении уровня пола или устройства подземного помещения.

По способу размещения буроинъекционные сваи выполняются:

- вертикальными;
- горизонтальными;
- наклонными.

Вертикальные буроинъекционные сваи применяются как при реконструкции, так и в новом строительстве.

Горизонтальные сваи (анкерные сваи) используются в основном для крепления бортов котлованов, подпорных стен и насыпей.

Наклонные буроинъекционные сваи применяются при новом строительстве для фундаментов под конструкции, испытывающие знакопеременные вдавливающие, выдергивающие, горизонтальные и моментные усилия и при реконструкции для усиления фундаментов.

По характеру работы различают висячие сваи и сваи стойки. Для висячих свай продольное усилие, действующее вдоль оси сваи, будет «гаситься»

трением по ее боковой поверхности. Максимальные величины поперечного усилия и изгибающего момента будут образованы в месте приложенных нагрузок. Поэтому при расчете висячих свай на прочность по материалу принимают нижний конец сваи жестко защемленным на некотором расстоянии от подошвы ростверка. Это допущение обосновано тем фактом, что граничные условия закрепления острия длинной сваи не оказывают существенного влияния на усилия и деформации в голове сваи. Для свай стоек опирающихся на малосжимаемые грунты с модулем деформации более 50 МПа, продольное усилие будет относительно равномерно распределяться по всей длине сваи, а максимальные величины поперечного и моментного усилий будут также образованы в месте приложенных нагрузок.

2.2 Несущая способность буроинъекционной сваи на горизонтальную нагрузку

Буроинъекционные сваи, применяющиеся в конструкциях, испытывающих знакопеременные усилия, сваи, расположенные в грунтах с различными прочностными и деформативными характеристиками по глубине, а также наклонные сваи воспринимают значительные горизонтальные усилия. Несущая способность сваи на горизонтальную нагрузку зависит от прочностных и деформативных характеристик системы: «буроинъекционная свая-грунт».

При горизонтальной нагрузке на сваю, не превышающей несущую способность грунта, деформации сваи в грунте будут носить упругий характер. Соответственно, при сохранении упругих свойств сваи деформации будут пропорциональны прикладываемой нагрузке. Или, иначе говоря, деформации будут зависеть от величины нагрузки и жесткостных характеристик сваи. Это условие можно записать следующим образом:

$$H = EJ\text{-}e(z) \qquad (2.2.1)$$

где *H* - горизонтальная сосредоточенная нагрузка, действующая на голову сваи, кН;

EJ - продольная жесткость сваи, кН*м^2;

є(x) - местные деформации сваи, мм.

Составим дифференциальные уравнения системы: «буроинъекционная свая грунт» при воздействии на голову сваи горизонтальной нагрузки:

$$EJ\text{-}y = M(z)$$

где *EJ* - продольная жесткость сваи при изгибе относительно основной оси инерции.

y'' - перемещение головы сваи; *Q* -

поперечное усилие, в голове сваи; *M* -

изгибающий момент в голове сваи; O -

угол поворота головы сваи.

Общий интеграл этих уравнений будет иметь известное аналитическое решение гиперболо-тригонометрической функции Тимошенко С. П. [99]:

$$y = e\ x(A\cos x + B\,s\,mx) + ex(C\cos x + D\,s\,mx) \qquad (2.2.3)$$

где *A,B,C,D* - граничные условия в голове и пяте сваи.

Наибольшие деформации возникают в месте приложения нагрузки, распределение усилий по длине сваи определяется множителем $e^{\sim x}$. Величины деформаций и скорость их затухания по длине сваи зависят от деформативных характеристик грунта и изгибной жесткости сваи.

В зависимости от изгибной жесткости, сваи можно классифицировать как жесткие, короткие и бесконечно длинные. К жестким относятся сваи, у

которых жесткость очень велика по сравнению с окружающим грунтом. К коротким относятся сваи, у которых усилия от воздействия нагрузок совпадают с эпюрой реактивного давления грунта. К бесконечно длинным сваям относятся сваи, у которых значительные усилия возникают на одном ограниченном участке и практически не передаются по всей длине. При любых граничных условиях перемещения и усилия в гибкой буроинъекционной свае выражаются с помощью затухающих по длине синусоид. При условии *x* = -, перемещения и усилия становятся бесконечно малыми, поэтому усилия, приложенные на голову сваи, после этой длины затухают и стремятся к нулю. При длине буроинъекционнои сваи: ее можно считать бесконечно длинной.

Для длинных и гибких свай существует понятие краевого эффекта, означающего скачок в усилиях и деформациях вблизи от места приложенной нагрузки. В первом приближении длина краевого эффекта может быть принята равной *V.* длины сваи. Затем методом последовательных приближений этот параметр может быть уточнен по формуле:

$$L_k = \frac{\pi}{2\beta} \qquad (2.2.4$$

Согласно проведенным вычислениям при различных параметрах приведенной жесткости системы: «буроинъекционная свая-грунт» длина краевого эффекта для гибких свай не превышает 1,5-3,5 м. Отсюда можно сделать вывод, что несущая способность буроинъекционных свай на горизонтальную нагрузку определяется прочностными и деформативными характеристиками грунтов, расположенными в пределах 1,5-3,5 м от приложенных нагрузок

Для бесконечно длинной сваи условия у пяты не реализуются, так как *x* стремится к бесконечности, а *y* стремится к нулю. В результате C = *D* = 0. Соответственно упрощаем уравнение:

$$y = e^{x}(A\cos x + B\sin x) \qquad (2.2.5)$$

Для определения несущей способности буроинъекционнои сваи на горизонтальную нагрузку сначала необходимо установить жесткостные параметры сваи и величины усилий, передаваемые на сваю. На основе аналитического решения Тимошенко С. П. [99] предлагается следующий инженерный метод расчета буроинъекционных свай на горизонтальную нагрузку:

Для свободной от закрепления или закрепленной от угла поворота головы сваи поперечное усилие будет равно горизонтальной нагрузке:

$$Q_{\max} = H_{\max} \qquad (2.2.6)$$

Максимальный изгибающий момент от горизонтальной нагрузки в голове сваи, свободной от закрепления, определится по формуле:

$$M_{\max} = \frac{Q_{\max}}{4\beta} \qquad (2.2.7)$$

Максимальный изгибающий момент от горизонтальной нагрузки при закрепленной голове сваи от угла поворота:

$$M_{\max} = \frac{3Q_{\max}}{8\beta} \qquad (2.2.8)$$

Горизонтальное перемещение свободной от закрепления головы сваи:

$$y_{\max} = \frac{Q_{\max} \cdot \eta(z)}{8 \cdot E \cdot I \cdot \beta^{3}} \qquad (2.2.9)$$

где $\eta(z)$ - гиперболо-тригонометрическая функция, зависящая от приведенной жесткости р.

Горизонтальное перемещение головы сваи, закрепленной от угла поворота:

$$y_{\max} = \frac{Q_{\max} \cdot \eta(z)}{16 \cdot E \cdot I \cdot \beta^3}$$

Внутренние усилия и перемещения сваи будут зависеть от жесткости сваи и деформативных характеристик грунта. Жесткость сваи определяется ее диаметром, классом бетона и площадью арматуры. На рис. 2.2.1 приведены графики зависимости продольной жесткости сваи от модуля деформации бетона и площади арматуры при диаметрах сваи 0,13……0,35 м. Все кривые при различных классах мелкозернистого бетона изменяются незначительно. Однако все кривые выражены гиперболической зависимостью, это объясняется тем, что существенное влияние на жесткость сваи оказывает ее диаметр. Кривые зависимости жесткости от площади арматуры существенно изменяются при различных площадях арматуры. При армировании сваи пространственными каркасами они носят линейный характер, а при армировании стальными трубами гиперболическую зависимость.

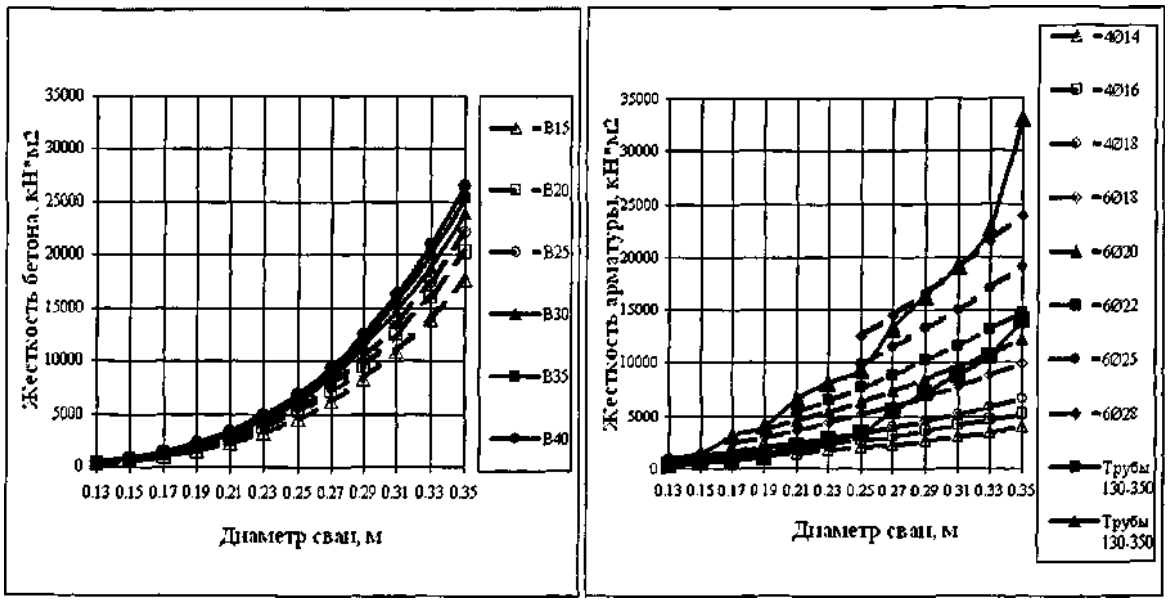


Рис. 2.2.1. Графики зависимости продольной жесткости сваи (EI) от модуля

деформации бетона (классы В15-В40) и площади арматуры при диаметрах сваи 0,13...0,35 м

2.3 Несущая способность наклонной буроинъекционной сваи на вертикальную сжимающую нагрузку

При воздействии вертикальной нагрузки на наклонную сваю в ней образуются три внутренних усилия: продольная, поперечная силы и изгибающий момент. С увеличением угла наклона сваи возрастают величины внутренних усилий. В нормативных документах нет четких указаний по определению внутренних усилий, действующих в наклонных буроинъекционных сваях. Передаваемые усилия на сваю определяются осадкой фундамента, при этом, чем больше его осадка, тем большая часть усилий передается на голову сваи. Согласно проведенному анализу, выполненному на основе геодезических наблюдений за осадками фундаментов, усиленных буроинъекционными сваями в Санкт-Петербурге, было установлено, что дополнительные осадки многих фундаментов при реконструкции зачастую превышают предельно допустимые по нормам. К сожалению, не все проектировщики учитывают эту практику при проектировании свай усиления и внутренние усилия в этих сваях превышают предельно допустимые. В связи с этим обстоятельством актуальным вопросом является определение усилий в буроинъекционных сваях с учетом дополнительных осадок фундаментов или, иначе говоря, расчет по деформированной схеме.

Для определения внутренних усилий в наклонной свае при воздействии вертикальной нагрузки можно применить правило суперпозиции и разложить нагрузку на две составляющих: вертикальную и горизонтальную. При отсутствии других внешних усилий вертикальная и горизонтальная составляющая будут равны соответственно максимальным значениям продольного и поперечного усилий (в месте приложения нагрузки). Исходя

из вышеизложенного, можно выразить:

$$N_{\max} = F\cos\alpha$$
$$Q_{\max} = F\sin\alpha \qquad (2.3.1)$$

На рис. 2.3.1 на основе допущения о справедливости принципа независимости действия сил построены графики зависимости продольного и поперечного усилия в голове сваи при воздействии вертикальной нагрузки и углах наклона сваи 5....25°. Как видно из графиков продольное усилие уменьшается с увеличением угла наклона сваи (до 9 %), а поперечное усилие возрастает (до 80 %). Незначительное изменение продольного усилия в свае при углах наклона до 25° позволяет сделать вывод о том, что осадка наклонной сваи не будет существенно отличаться от осадки вертикальной сваи при прочих равных условиях. Однако увеличение угла наклона сваи приводит к значительному возрастанию поперечного и моментного усилий. Недоучет этого факта может привести к разрушению сваи по материалу при нагрузках меньших, чем ее несущая способность по грунту.

На рис. 2.3.2-2.3.3 представлены графики зависимости изгибающего момента при воздействии вертикальной нагрузки с углами наклона сваи 5....25° и значениях приведенной жесткости р равными 0,2 и 1,0. На основе полученных графиков можно определить значения внутренних усилий в свае в зависимости от угла наклона, значения параметра р и величины вертикальной нагрузки.

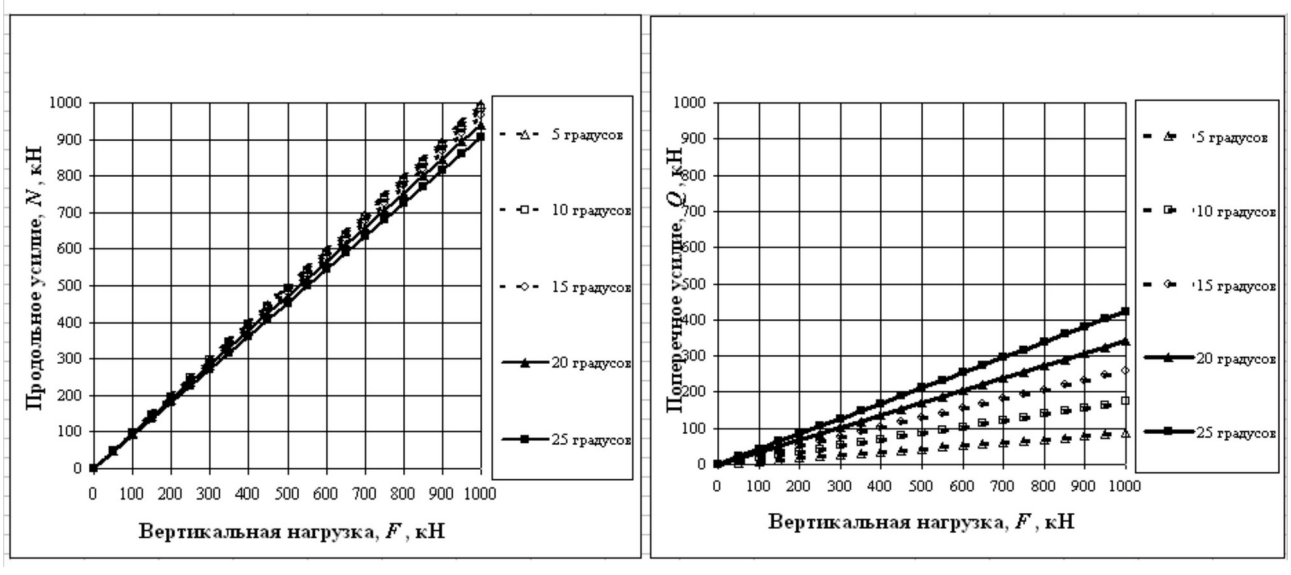


Рис. 2.3.1 Графики зависимости продольного и поперечного усилий в голове наклонной сваи от вертикальной нагрузки

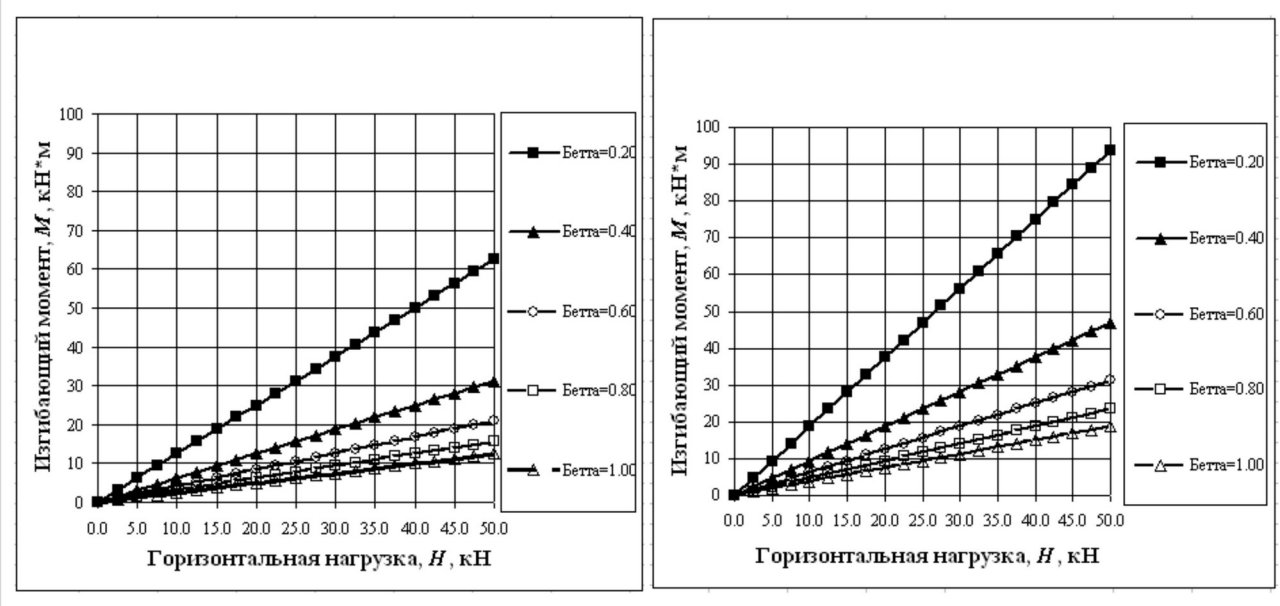


Рис. 2. Графики зависимости изгибающего момента от горизонтальной нагрузки при свободной от закрепления (слева) и жестко защемленной (справа) голове сваи

Согласно проведенным исследованиям увеличение угла наклона буроинъекционной сваи приводит к возрастанию поперечного и моментного усилий. Наклонные сваи целесообразно применять при работе фундаментов на горизонтальные и моментные нагрузки. Применение наклонных свай усиления с углами наклона больше 10° нежелательно, поскольку при дополнительных осадках фундаментов, что на практике происходит довольно часто, на эти сваи передаются дополнительные усилия.

Ниже в разделе 2.4 приведена методика инженерного расчета буроинъекционной сваи по деформированной схеме при дополнительной осадке фундамента.

2.4 Аналитический расчет буроинъекционной сваи по деформированной схеме

Как уже было отмечено в главе 1 и разделе 2.1, действующие усилия в буроинъекционных сваях могут превысить расчетные из-за различного рода факторов. Для того, чтобы обеспечить надежную работу сваи на протяжении всего срока ее эксплуатации, расчет буроинъекционных свай необходимо производить по деформированной схеме. Тогда воздействие неблагоприятных факторов, приводящих к передаче дополнительных усилий на буроинъекционные сваи, будет не столь опасно вследствие увеличения жесткости сваи уже на предпроектной стадии строительства.

Разработаем методику инженерного расчета наклонной буроинъекционной сваи усиления по деформированной схеме. Зададимся исходными данными к решению этой задачи. Перед производством работ по реконструкции производится усиление фундаментов наклонными буроинъекционными сваями. Затем выполняется необходимые работы по реконструкции, вследствие которых происходит изменение напряженно-деформированного состояния грунтов, что приводит к осадкам фундаментов и передаче на сваю дополнительных усилий. При этом в связи с малым диаметром свай усиления и их расстоянием в осях, как правило, составляющим 5-7 d, влияние кустового эффекта у этих свай незначительно. Передаваемые на сваи усилия и их последующая осадка определяются осадкой существующих фундаментов.

На основе всех этих допущений суммарный максимальный изгибающий момент в голове сваи образуется от воздействия поперечного усилия и продольной силы приложенной с начальным эксцентриситетом $\{e_a)$ и дополнительным эксцентриситетом e_0, образовавшимся при вертикальной

осадке фундамента *S*. Тогда дополнительный эксцентриситет определится из геометрии:

$$e_n = 5' \sin a. \qquad (\mathbf{2.4.1})$$

На рис. 2.4.1 представлены расчетные схемы фундамента и буроинъекционной сваи к расчету по деформированной схеме.

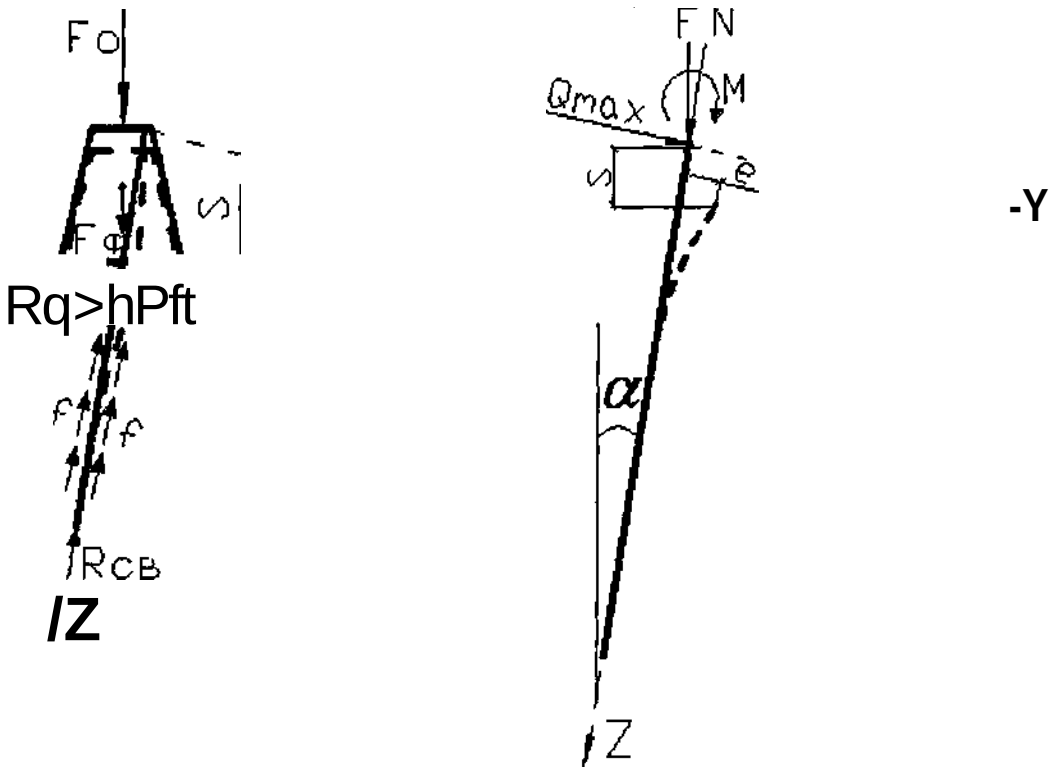


Рис. 2.4.1. Расчетные схемы фундамента и буроинъекционной сваи к расчету по деформированной схеме

На основе этой методики расчета уже на предпроектной стадии строительства, исходя из предполагаемой дополнительной осадки фундамента, можно обеспечить необходимую жесткость и прочность буроинъекционных свай усиления.

2.5 Выводы по главе

2.5.1 Несущая способность буроинъекционных свай по грунту на вертикальную нагрузку, рассчитанная по таблицам СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты», занижает фактическую несущую способность, вследствие недоучета особенностей технологии их изготовления (увеличения диаметра свай, возрастания сил трения по боковой поверхности свай при их

опрессовке под давлением).

2.5.2 Выполнить объективную оценку влияния каждой технологии на несущую способность сваи возможно лишь в каждом индивидуальном случае на конкретной площадке. Для этого необходимо учесть многочисленные факторы, малейшее изменение которых значительно повлияет на величину несущей способности. К наиболее значимым факторам относятся: диаметр скважины, способ и скорость бурения скважины, диаметр шнека, толщина стенки обсадной трубы, вид применяемого глинистого раствора, характеристики мелкозернистой бетонной смеси, вид и физико-механические характеристики грунтов, продолжительность и величина давления опрессовки.

2.5.3 Несущая способность гибкой буроинъекционной сваи на сосредоточенную горизонтальную нагрузку зависит от изгибной жесткости сваи и деформативных характеристик грунтов, расположенных на глубине 1,5-3,5 м от места приложения нагрузки.

2.5.4 Установлено, что при воздействии вертикальной нагрузки величиной от 50 до 1000 кН на буроинъекционную сваю, с углами наклона 5.....25° внутренние усилия в свае при различных значениях приведенной жесткости системы: «буроинъекционная-свая-грунт» могут измениться следующим образом:

- продольное усилие с увеличением угла наклона сваи от 5 до 25° уменьшается до 9 %;

- поперечное усилие с увеличением угла наклона сваи от 5 до 25° возрастает до 80 %;
- изгибающий момент с увеличением угла наклона сваи от 5 до 25° возрастает до 80 %.

2.5.5 В связи с незначительным изменением продольного усилия в наклонной свае (при угле наклона сваи до 25°) происходит его распределение по всей длине сваи.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ

СПОСОБНОСТИ СВАЙ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ И ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ НАГРУЗКИ

3.1 Анализ полевых испытаний буроинъекционных свай на вертикальную сжимающую нагрузку

Анализ несущей способности буроинъекционных свай на вертикальную нагрузку с учетом технологии их изготовления был выполнен с помощью статистической обработки более 200 полевых испытаний свай. Полевые испытания свай были проведены ПКТИ в основном в центральной части Санкт-Петербурга в период с 1991 по 2007 г.г [63]. Длина свай составила от 5 до 28 м, диаметр от 0,13 до 0,35 м.

Оборудование для проведения полевых испытаний свай состояло из системы упоров (балок) и анкерных свай. Нагрузка на головы свай передавалась домкратами, перемещения измерялись индикаторами часового типа с пределом погрешности измерений 0,1 мм. Проведение испытаний, обработка и оформление результатов выполнено согласно требованиям ГОСТ 5686-94 с учетом рекомендаций ТСН 50-302-96 для Санкт-Петербурга. Для общей характеристики грунтов расположенных по боковой поверхности свай было выполнено их условное распределение на три характерных случая в процентном соотношении к общему количеству:

1. Грунты с показателем консистенции \$_L$ < 0,5 и модулем деформации E > 15 МПа - 4 % от общего количества;

2. Грунты с показателем консистенции 1,0 < I_L > 0,5 и модулем деформации E = 5.….15 МПа-95 % от общего количества;

3. Грунты с показателем консистенции \$_L$ > 1,0 и модулем деформации E < 5 МПа - 1 % от общего количества. Острие свай располагалось в грунтах с консистенцией от тугопластичной до полутвердой *(Eo*= 15....25 МПа),

В таблице 3.1.1 представлена выборка, в которую вошли четыре технологии изготовления буроинъекционных свай.

Таблица 3.1.1. Технологии изготовления буроинъекционных свай, вошедшие в выборку

Технология изготовления сваи	**Количество, НІТ**	**Соотношение к общему количеству, %**
С помощью проходного шнека	**86**	**43,0**
Под защитой обсадной трубы	**51**	**25,5**
Под защитой глинистого раствора	**50**	**25,0**
Сваи Titan	**13**	**6,5**
ВСЕГО:	200	**100**

Для сравнительного анализа несущей способности свай, рассчитанной по таблицам СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты», с несущей способностью, определенной по результатам полевых испытаний, необходимо определить критерий предельно допустимой осадки сваи в грунте. Согласно ГОСТ 5686-94 п. 8.2.4 рекомендуется при полевых испытаниях сваи вертикальную нагрузку доводить до значения осадки сваи не менее 4 см. По рекомендациям СП 50-102-2003: «Если при максимальной достигнутой при испытаниях нагрузке осадка сваи окажется менее нормируемого значения, то за частное значение предельного сопротивления сваи *(F_u)* допускается принимать максимальную нагрузку, полученную при испытаниях». По рекомендациям ТСН 50-302-96 (для Санкт-Петербурга) несущая способность сваи при полевых испытаниях *(F_u)* принимается при ее вертикальной осадке равной 4 см. В связи с тем, что все испытания проводились на территории Санкт-Петербурга, критерий предельно допустимой осадки сваи был принят согласно

требованиям ТСН 50-302-96. При обработке результатов испытаний было установлено, что при вертикальной нагрузке равной расчетной несущей способности *(F_d)*, 190 свай (95 %) из всех испытанных свай получили осадку не более 2,0 см. Этот факт подтверждает вывод о том, что несущая способность буроинъекционных свай, определенная на основе полевых испытаний, значительно превышает рассчитанную по таблицам СНиП 2.02.03-85.

Для каждой испытанной сваи была рассчитана несущая способность по таблицам СНиП 2.02.03-85. Результаты полевых испытаний и расчеты были распределены на четыре группы в зависимости от технологии изготовления свай. Для каждой группы было выполнено сравнение фактической и рассчитанной несущей способности путем соотношения их величин. Минимальное отношение F_uIF_d составило 1,0, максимальное отношение FJF_d - 3,1. Столь значительный разброс отношения FJF_d может быть объяснен различием геометрических параметров изготовленных свай и недоучетом сцепления бетонного ствола сваи с грунтовым массивом. Отношение FJF_d было распределено на семь интервалов с шириной каждого 0,3, то есть: 1,0 - 1,3, 1,3 - 1,6, 1,6 - 1,9, 1,9 -2,2,2,2-2,5,2,5-2,8,2,8-3,1.

В интервал 1,0- 1,3 вошли соотношения, при которых $F_u = F_d$ либо достаточно близко к этому условию. Интервал имеет достаточно низкое распределение частот для всех технологий (6-12,8 %), поэтому попадание в него отношения $F_u\ IF_d$, можно объяснить следующими факторами:

- неточными инженерно-геологическими изысканиями площадки;
- дефектами изготовленных буроинъекционных свай.

В таблице 3.1.2 представлено распределение относительной частоты отношения FJF_d по интервалам с учетом технологии изготовления свай. Для большей наглядности полученных соотношений на рис. 3.1.1

построены гистограммы относительного распределения частот для каждой технологии.

Таблица 3.1.2. Относительная частота распределения отношения $F_u IF_d$ по интервалам

Технология изготовле-ния сваи	**Относительная частота распределения отношения F_u *1* F_d по интервалам, %**						
	1,0 -1,3	**1,3-1,6**	**1,6-1,9**	**1,9-2,2**	**2,2-2,5**	**2,5-2,8**	**2,8-3,1**
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
С помощью проходного шнека	**12,8**	43,0	**14,0**	**9,3**	**8,1**	**7,0**	**5,8**
Под защитой обсадной трубы	**9,8**	37,3	**17,6**	**13,7**	**9,8**	**7,8**	**3,9**
Под защитой глинистого раствора	**6,0**	46,0	28,0	**14,0**	**6,0**		
Сваи Titan	-	-	15,4	**53,8**	30,8	-	-

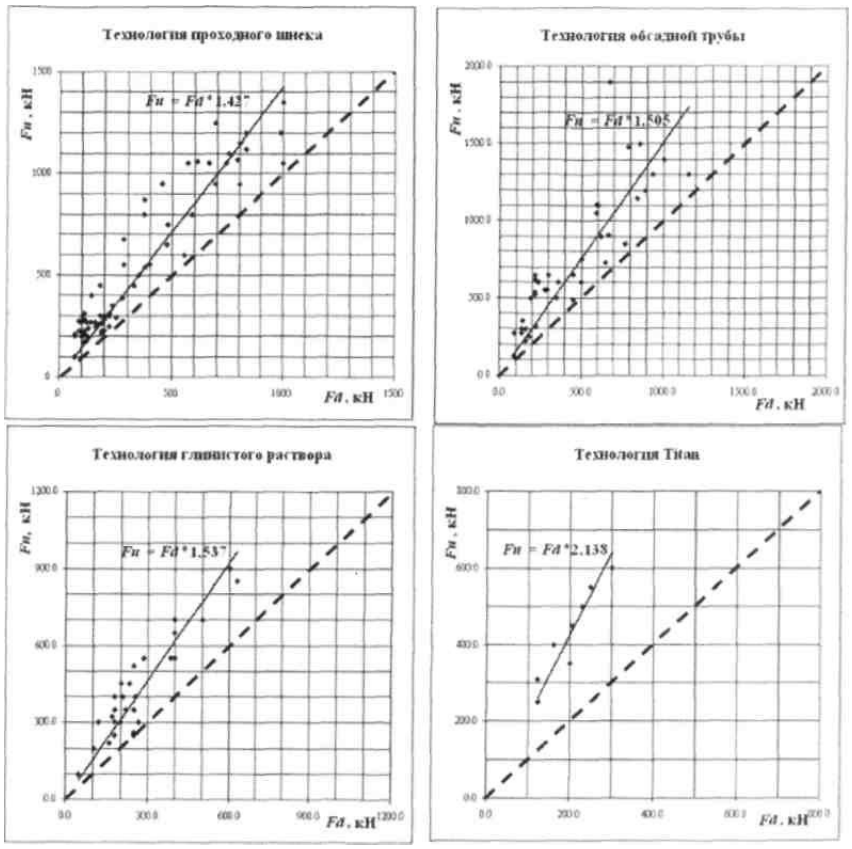


Рис. 3.2.1. Сравнительные диаграммы фактических и рассчитанных значений несущей способности свай при различных технологиях их изготовления

3.2 Статистическая обработка теоретических и фактических значений несущей способности буроинъекционных свай с учетом технологии их изготовления

После сравнительного анализа теоретических и фактических величин несущей способности и построения гистограмм была выполнена статистическая обработка полученных соотношений F_u *I* F_d для проверки соблюдения закона нормального распределения. По результатам обработки были получены основные статистические показатели, представленные ниже в таблицах 3.2.1-3.2.4. При анализе статистических показателей было установлено, что среднее квадратичное отклонение отношения $F_u IF_d$ составляет от 0,270 до 0,538, что говорит о достаточно большом разбросе относительно среднего арифметического. Коэффициенты вариации составили от 12 % до 31 %, что меньше предельного значения равного 33 %. Для технологий изготовления свай с помощью проходного шнека, под защитой обсадной трубы и глинистого раствора величины асимметрии отрицательные. Это говорит о том, что в выборках присутствуют отношения F_u/F_d, значительно меньше среднего арифметического. Для технологии изготовления свай Titan асимметрия положительная, что говорит о том, что в выборке присутствуют отношения *FJ Fj*, значительно больше среднего арифметического. Величина ошибки асимметрии для технологии изготовления свай с помощью проходного шнека превысила нормируемое значение равное 3. Это говорит о том, что данное распределение существенно отличается от нормального и непригодно для статистического оценивания данным методом. Для остальных технологий величина ошибки асимметрии не превысила 3, что говорит об их соответствии закону нормального распределения. Эксцесс для всех технологий изготовления свай получился отрицательным, что говорит о сравнительно корректном распределении частот на заданные интервалы.

Ошибка эксцесса для всех технологий изготовления свай не превысила 3, что говорит об их соответствии закону нормального распределения. Поскольку технология изготовления свай с помощью проходного шнека не прошла проверку на соответствие закона нормального распределения, был выбран альтернативный метод статистической обработки.

Для статистической обработки полученных отношений FJF_d был выполнен регрессивный анализ методом наименьших квадратов теоретических и фактических значений несущей способности свай. Метод наименьших квадратов - это метод оценки параметров линейной регрессии, минимизирующий сумму квадратов отклонений зависимой переменной от искомой линейной функции. Целью регрессионного анализа являлось установление наиболее достоверной формы зависимости для соотношения FJF_d. Для решения этой задачи была определена функция регрессии или, иначе говоря, составлены уравнения, выражающие зависимость одной величины от другой путем нахождения независимого эмпирического коэффициента *к*. Для нахождения эмпирического коэффициента *к*, отражающего взаимосвязь между F_u и F_d, методом наименьших квадратов было получено линейное уравнение регрессии. Основную идею линейной регрессии в нашем случае можно выразить следующим уравнением:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

При решении системы этих уравнений получают эмпирический коэффициент *к*, описывающий линейную взаимосвязь между F_u и F_d.

При решении системы уравнений были получены эмпирические коэффициенты *к* для каждой технологии изготовления буроинъекционных свай. Из полученных линейных зависимостей были найдены линейные коэффициенты корреляции. Линейный коэффициент корреляции отражает меру тесноты связи двух переменных. Коэффициент корреляции

определяется по следующей формуле:

r =_F-Fd -Fu

Коэффициент корреляции принимает значения в интервале: -1,0 < *г* < 1,0. При значениях коэффициента корреляции *г* < 0,3 - связь между двумя переменными слабая, 0,3 < *г* > 0,7 - связь средняя, 0,7 < *г* > 1,0 - связь тесная. Необходимо отметить, что, несмотря на относительно большие значения среднего квадратичного отклонения, и коэффициента вариации, величины корреляции (взаимосвязи) F_u и F_d находятся в пределах от 0,853 до 0,934. Эти показатели свидетельствует о тесной зависимости фактических и теоретических величин несущей способности свай.

На рис. 3.2.1 представлены сравнительные диаграммы фактических и рассчитанных величин несущей способности буроинъекционных свай при различных технологиях их изготовления. Точками на диаграммах обозначены фактические и рассчитанные значения несущей способности свай. Диагонали, выделенные пунктиром на диаграммах, соответствуют условию: $F_u=F_d$. На всех диаграммах точки расположены выше диагонали, то есть фактическая несущая способность свай выше рассчитанной. Для каждой технологии построена линейная зависимость $F_u = k\text{-}F_d$,
где *к* -эмпирический коэффициент, полученный из соотношения $к = FJ$ F_d на основе статистической обработки экспериментальных и расчетных данных.

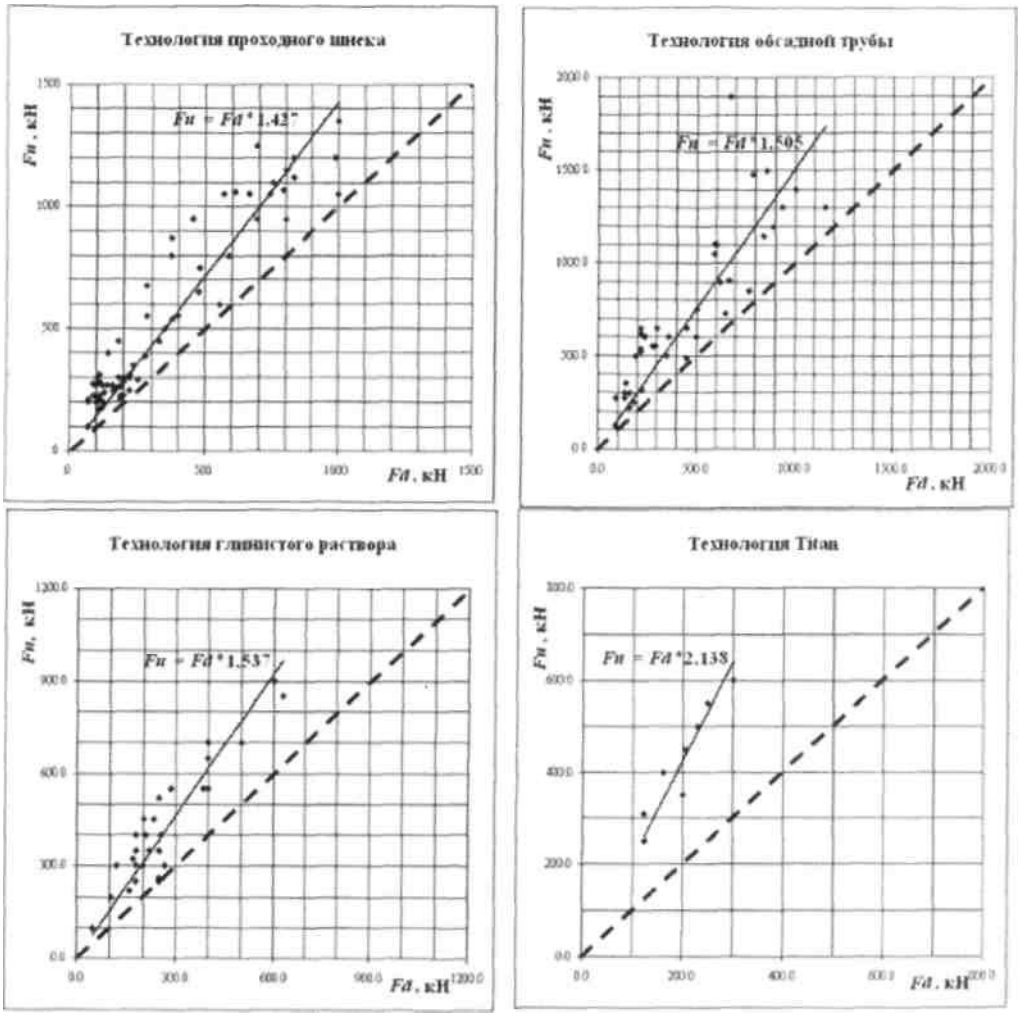


Рис. 3.2.1. Сравнительные диаграммы фактических и рассчитанных значений несущей способности свай при различных технологиях их изготовления

Таблица 3.2.1. Основные статистические показатели для свай, изготовленных с помощью проходного шнека

Наименование статистического показателя	Значение
1. Число членов выборки, *n*	86,0
2. Минимальное отношение F_u / F_d	1,00
3. Максимальное отношение F_u *1* F_d	3,06
4. Среднее арифметическое отношение F_u *1* F_d, Лср	1,750
5. Среднее квадратичное отклонение, *G*	0,538
6. Дисперсия, *Gi*	0,29
7. Стандартное отклонение арифметического среднего	0,058
8. Оценка стандартного отклонения арифметического среднего	0,197
9. Медиана	1,56
10. Мода	1,59
11. Достоверность коэффициента вариации, v	31,0<33
12. Асимметрия, *Ac*	-0,916
13. Ошибка асимметрии, *mAc*	0.264
14. Пригодность выборки по асимметрии	-3,470>3
15. Эксцесс, *E*	-0,264
16. Ошибка эксцесса, *mE*	0,528
17. Пригодность выборки по эксцессу	-0,499<3
18. Коэффициент Стьюдента, /	2,160
19.5x	0,029
20.***t*Sx***	0,063
21. Коэффициент $k = F_u/F_d$, полученный методом наименьших квадратов	**1,427**
22. Коэффициент корреляции, г	**0,934**
23. Доверительный интервал, для коэффициента $к = F_u/F_d$ полученный по распределению Стьюдента и критерию Пирсона	**1,4-1,5**

Таблица 3.2.2. Основные статистические показатели для свай, изготовленных под защитой обсадной трубы

Наименование статистического показателя	**Значение**
1. Число членов выборки, *n*	51,0
2. Минимальное отношение F_u *1'* F_d	1,00
3. Максимальное отношение F_u *1* F_d	3,06
4. Среднее арифметическое отношение F_u *1* F_d, Аср	1,813
5. Среднее квадратичное отклонение, *G*	0,537
6. Дисперсия, *G2*	0,29
7. Стандартное отклонение арифметического среднего	0,075
8. Оценка стандартного отклонения арифметического среднего	0,265
9. Медиана	1,62
10. Мода	1,57
11. Достоверность коэффициента вариации, v	30,0<33
12. Асимметрия, *Ac*	-0,629
13. Ошибка асимметрии, *mAc*	0,343
14. Пригодность выборки по асимметрии	-1,833<3
15. Эксцесс, *E*	-0,742
16. Ошибка эксцесса, *mE*	0,686
17. Пригодность выборки по эксцессу	-1,082<3
18. Коэффициент Стьюдента, /	2,000
19.Sx	0,076
20. *t*Sx*	0,151
21. Коэффициент *k-*F_u*IF*$_d$, полученный методом наименьших квадратов	**1,505**
22. Коэффициент корреляции, *г*	**0,853**
23. Доверительный интервал, для коэффициента *k* = F_u*IF*$_d$ полученный по распределению Стьюдента и критерию Пирсона	**1,5-1,6**

Таблица 3.2.3, Основные статистические показатели для свай, изготовленных под защитой глинистого раствора

Наименование статистического показателя	**Значение**
1. Число членов выборки, *n*	50,0
2. Минимальное отношение F_u *1* F_d	1,00
3. Максимальное отношение F_u *1* F_d	2,50
4. Среднее арифметическое отношение F_u *1* F_d, $X_{ср}$	1,706
5. Среднее квадратичное отклонение, *G*	0,370
6. Дисперсия, *G2*	0,13
7. Стандартное отклонение арифметического среднего	0,052
8. Оценка стандартного отклонения арифметического среднего	0,247
9. Медиана	1,59
10. Мода	1,55
11. Достоверность коэффициента вариации, v	21,0<33
12. Асимметрия, *A c*	-0,347
13. Ошибка асимметрии, *mAc*	0,346
14. Пригодность выборки по асимметрии	-1,002<3
15. Эксцесс, £	-0,557
16. Ошибка эксцесса, *mE*	0,693
17. Пригодность выборки по эксцессу	-0,805<3
18. Коэффициент Стьюдента, /	2,009
19.Яг	0,052
20. ***t*Sx***	0,105
21. Коэффициент *k-*F_u*I*F_d, полученный методом наименьших квадратов	**1,537**
22. Коэффициент корреляции, *г*	**0,918**
23. Доверительный интервал, для коэффициента *к* = F_u*l'*F_d полученный по распределению Стьюдента и критерию Пирсона	**1,5-1,6**

Таблица 3.2.4. Основные статистические показатели для свай, изготовленных по технологии Titan

Наименование статистического показателя	**Значение**
1. Число членов выборки, *n*	13,0
2. Минимальное отношение F_u *1* F_d	1,75
3. Максимальное отношение F_u *1*F_d	2,50
4. Среднее арифметическое отношение $F_u IF_d$,X_{cp}	2,200
5. Среднее квадратичное отклонение, *G*	0,270
6. Дисперсия, *G2*	0,07
7. Стандартное отклонение арифметического среднего	0,075
8. Оценка стандартного отклонения арифметического среднего	0,614
9. Медиана	2,09
10. Мода	2,09
11. Достоверность коэффициента вариации, v	12,0<33
12. Асимметрия, *Ac*	0,230
13. Ошибка асимметрии, *mAc*	0,679
14. Пригодность выборки по асимметрии	0,338<3
15. Эксцесс, *E*	-1,184
16. Ошибка эксцесса, *mE*	1,359
17. Пригодность выборки по эксцессу	-0,87 КЗ
18. Коэффициент Стьюдента, /	2,160
19.5x	0,075
20./*5"x	0,162
21. Коэффициент $k = F_u/F_d$, полученный методом наименьших квадратов	**2,138**
22. Коэффициент корреляции, *г*	**0,900**
23. Доверительный интервал, для коэффициента *к* = $F_u l$ F_d полученный по распределению Стьюдента и критерию Пирсона	**2,0-2,1**

3.3 Анализ полевых испытаний буроинъекционных свай на горизонтальную нагрузку и их сопоставление с аналитическими расчетами и численным моделированием

Согласно требованиям нормативных документов несущая способность сваи на горизонтальную нагрузку принимается при горизонтальном перемещении головы сваи равном 1 см. Полевые испытания свай на горизонтальную нагрузку часто прекращают при нагрузке равной рассчитанной несущей способности. Горизонтальное перемещение головы сваи при нагрузке равной несущей способности, как правило, менее 1 см.

Анализ работы сваи на горизонтальную нагрузку был выполнен на основе пяти полевых испытаний свай, выполненных ПКТИ в Санкт-Петербурге на ул. Вавиловых, д. 8 [63]. Геометрические параметры испытанных свай следующие:

- сваи 1,2 длина 12 м, диаметр 0,16 м;
- свая 3 длина 13,5 м, диаметр 0,16 м;
- свая 4 длина 8,5 м, диаметр 0,15 м;
- свая 5 длина 12,5 м, диаметр 0,16 м.

Инженерно-геологические условия площадки представлены грунтами со следующими прочностными и деформативными характеристиками начиная с уровня дневной поверхности:

- песок мелкий, рыхлый, влажный, мощностью 2,0 м *(Eo* = 8000 кПа,ф = 20°, *c* = 0);
- песок мелкий, средней плотности, влажный, мощностью 2,30 м *(E_0* = 12000 кПа, ф = 25°, *c* = 1 кПа);
- суглинок текучепластичный, мощностью 4,0 м *(E_0* =6000 кПа, ф = 14°, *c* = 12 кПа);
- супесь пластичная, мощностью 3,20 м *(E_0* = 10000 кПа, ф = 18°, *c* = 15 кПа).

Острие всех свай было выполнено в суглинке полутвердой консистенции *(E_Q* = 27000 кПа, ф = 24°, *c* = 25 кПа). Расчетная несущая способность свай на горизонтальную нагрузку составила 9,0 - 11,0 кН. Отношение несущей способности, определенной по результатам испытаний, к несущей способности, рассчитанной по требованиям СНиП *(HJH_d),* составило от 2,0 до 4,2. Столь значительное расхождение отношения *HJH_d* объясняется отсутствием точных данных о прочностных и деформативных характеристиках грунтов, залегающих в пределах 1,5....3,5 м от уровня дневной поверхности. Как правило, в эту толщу входят насыпные грунты, для которых, как известно, не даются характеристики при инженерно-геологических изысканиях.

Для сравнительного анализа расчетных и фактических горизонтальных перемещений были определены перемещения свай при горизонтальных нагрузках аналитическим методом, методом СП 50-102-2003 по формулам (1.2.7-1.2.11) и численным моделированием с помощью программ Plaxis и Scad. На рис. 3.3.1 представлены фактические перемещения свай от горизонтальной нагрузки и перемещения, рассчитанные различными методами.

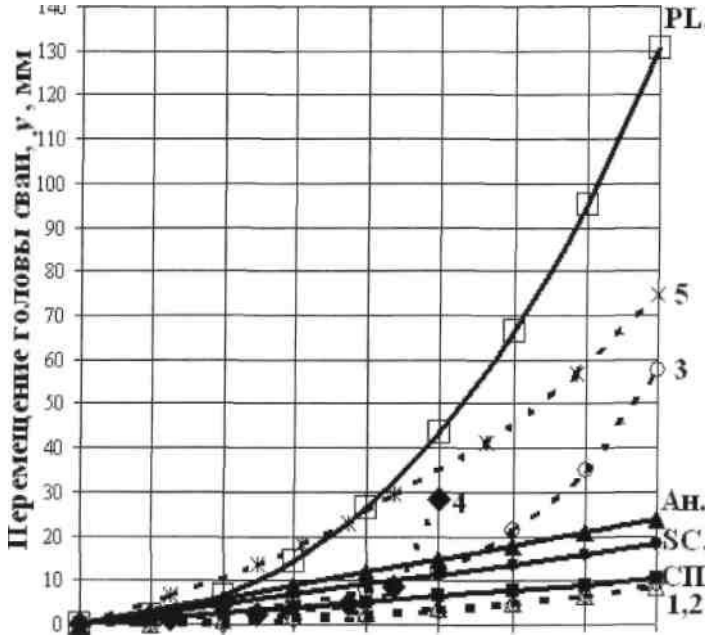


Рис. 3.3.1. Фактические и рассчитанные перемещения головы сваи при воздействии горизонтальной нагрузки

Как видно на рис. 3.3.1 зависимости $y = f(H)$ носят различный характер. Перемещения свай 1, 2 носят линейный характер, а свай 3, 4, 5 -криволинейный. Это расхождение объясняется отличием геометрических параметров свай при их изготовлении и естественным разбросом прочностных и деформативных характеристик грунтов на площадке. Однако при незначительных перемещениях головы сваи (до 5 мм) все зависимости носят явно линейный характер. Этот факт позволяет сделать вывод о том, что при незначительных перемещениях сваи напряженно-деформированное состояние системы: «буроинъекционная свая-грунт» находится в упругой стадии работы. Расчетные перемещения, полученные по рекомендациям СП 50-102-2003, носят линейный характер и хорошо

коррелируются с полевыми испытаниями свай 1, 2, однако значительно отличаются от свай 3, 4, 5. Расчетные перемещения, полученные по программе Scad и с помощью аналитического расчета, на основе упругой модели грунта Пастернака носят линейный характер. Полученные перемещения имеют завышенные значения для свай 1, 2, но при этом заниженные величины для свай 3, 4, 5. Максимальные перемещения получились по результатам расчетов в программе Plaxis на основе упругопластической модели грунта Мора-Кулона. Зависимость перемещений от нагрузки носит гиперболический характер, при этом значения перемещений превысили и фактические и расчетные величины. Это объясняется особенностями этой модели грунта, при которой перемещения могут перейти в пластическую стадию в отличие от упругой модели. Говорить о наибольшей достоверности какого-либо из методов расчета сложно, поскольку даже кривые зависимости, полученные при полевых испытаниях свай в одинаковых инженерно-геологических условиях и практически одинаковых проектных диаметрах имеют значительные расхождения.

Необходимо отметить, что линейная зависимость, полученная по инженерному расчету, разработанному автором на основе аналитического решения Тимошенко С. П., получилась достаточно близкой к кривым, полученным в результате полевых испытаний свай 1, 2, 3, 4. С учетом того факта, что горизонтальные и моментные усилия, как правило, носят знакопеременный характер, могут меняться по величине, и, как правило, являются циклическими, несущую способность свай на горизонтальную нагрузку рекомендуется принимать при перемещениях, не превышающих 3-5 мм. Согласно анализу различных полевых испытаний свай на горизонтальную нагрузку в условиях Санкт-Петербурга, при этих величинах перемещений возможна упругая работа грунта и сваи.

В Приложении В приведены результаты полевых испытаний свай на горизонтальную нагрузку.

3.4 Анализ полевого испытания наклонной буроинъекционной сваи на вертикальную сжимающую нагрузку

Анализ несущей способности наклонной буроинъекционной сваи на вертикальную сжимающую нагрузку был сделан на основе полевых испытаний ПКТИ в 2001 году, выполненных по адресу: Санкт-Петербург, Невский пр. д. 85 [63]. Всего было проведено три испытания, в которые входило: определение несущей способности двух вертикальных свай (1, 2) и одной наклонной сваи (3) при одинаковых инженерно-геологических условиях и геометрических параметрах свай. Технология изготовления свай - под глинистым раствором. Инженерно-геологические условия площадки, начиная от голов свай, были представлены слабыми грунтами из сильносжимаемых супесей и суглинков с консистенцией от текучей до мягкопластичной с незначительными прослоями пылеватых песков средней плотности. Острие всех свай было выполнено в тугопластичном суглинке. Длина всех свай составила 16,5 м, диаметр 0,132 м. Свая 3 была выполнена с углом наклона к вертикали 8°.

Результаты полевых испытаний свай сведены в таблицу 3.4.1.

Таблица 3.4.1. Результаты полевых испытаний свай

№	Несущая способность сваи по СНиП, *Fd*, кН	Максимальная нагрузка при испытании, *Fmax*, кН	Осадка сваи при рассчитанной нагрузке *Fd*, мм	Осадка сваи при максимальной нагрузке *Fmax*, мм	Предполагаемая несущая способность сваи *Fu*, при осадке 4 см, кН
1	180	275	2,1	6,3	400
2	180	300	2,9	6,4	400
3	180	250	2,2	4,3	400

При проведении испытаний осадки всех свай не превысили 7 мм и незначительно отличались по величинам. Это подтверждает гипотезу, что осадка наклонной сваи не будет значительно отличаться от осадки вертикальной сваи при прочих равных условиях. Однако при нагрузке 275 кН наклонная свая 3 была разрушена, хотя ее перемещения не превысили предельно допустимых, а предполагаемая несущая способность по грунту составляла не менее 400 кН. Это подтверждает выводы главы 2 о том, что при вертикальной нагрузке на наклонную сваю, значительно возрастание поперечного и моментного усилий может привести к разрушению сваи по материалу.

В Приложении Д приведены результаты полевых испытаний наклонной сваи на вертикальную нагрузку.

3.5 Выводы по главе

Сравнительный анализ и статистическая обработка 200 полевых испытаний свай подтверждают гипотезу о том, что несущая способность буроинъекционных свай по грунту на вертикальную нагрузку, рассчитанная по таблицам СНиП 2,02,03-85, значительно занижает фактическую несущую способность. Для более точного определения несущей способности буроинъекционных свай, расположенных в пылевато-глинистых грунтах с консистенцией от текучей до мягкопластичной *(Eo* = 5.... 15 МПа) и острием, устроенным в грунтах с консистенцией от тугопластичной до полутвердой *(Eo* = 15.,,,25 МПа), получены повышающие эмпирические коэффициенты *к.* Если величина несущей способности сваи принимается при осадке равной 4 см, то в зависимости от технологии изготовления буроинъекционной сваи, коэффициенты *к* заключены в приведенных ниже интервалах:

- 1,4 < *к* < 1,5 - с помощью проходного шнека (y_c/= 0,9-1,0);
- 1,5 < *к* < 1,6 - под защитой обсадных труб (y_c/~ 0,8-0,9);
- 1,5 < *к* < 1,6 - под защитой глинистого раствора (y_c/= 0,8-0,9);

- 2,0 < κ < 2,1 - сваи Titan (γ_{cf}= 0,8-0,9).

3.5.2 Согласно анализу результатов полевых испытаний свай на горизонтальную нагрузку при малых перемещениях грунта (3-5 мм) зависимость перемещений от нагрузки близка к линейной и грунт работает в упругой стадии. При возрастании нагрузки зависимость становится криволинейной и работа грунта переходит в упругопластическую стадию. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит пластическое течение грунта и срыв сваи по грунту. Для обеспечения надежной и долговечной работы конструкций несущую способность сваи на горизонтальную нагрузку рекомендуется принимать при перемещениях грунта, не превышающих 3-5 мм.

Анализ полевого испытания наклонной сваи на вертикальную нагрузку подтвердил предположение о том, что осадка одиночной наклонной сваи значительно не отличается от осадки вертикальной сваи. Результаты полевого испытания наклонной сваи подтвердили также гипотезу о том, что значительное возрастание поперечного и моментного усилий может привести к разрушению сваи по материалу при нагрузке меньшей, чем несущая способность сваи по грунту.

4. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Оценка напряженно-деформированного состояния системы: «буроинъекционная свая-грунт» при реконструкции здания расположенного на Потемкинской ул., д. 4

Реализация результатов исследований была осуществлена при реконструкции бывшего кинотеатра «Ленинград», расположенного на ул. Потемкинской, д. 4. По конструктивной схеме здание бескаркасное с несущими продольными и поперечными стенами. Пространственная жесткость здания обеспечивается несущими продольными и поперечными кирпичными стенами, железобетонными перекрытиями и фермами. Фундаменты здания по конструкции ленточные, по устройству на естественном основании, по материалу бутобетонные.

В геологическом строении площадки до глубины 30 м принимают участие современные четвертичные отложения озерно-морского (llTliv) генезиса, верхнечетвертичные отложения озерно-ледникового (lgin) и ледникового (gin) генезиса, перекрытые с поверхности насыпными грунтами (t,v)-

Техногенные отложения (tgry). Насыпные грунты, слежавшиеся: пески разной крупности, неоднородные, средней плотности, с глубины 0.1 м -насыщенные водой, с гравием, галькой и строительным мусором. Залегают с поверхности. Абс. отм. подошвы 2.00-3.50 м, мощность 0.50-2.00 м.

Озерно-морские отложения (lrriiy). Представлены заторфованными грунтами, супесями текучими с прослоями пластичных, суглинками текучими с прослоями текучепластичных, песками пылеватыми, песками мелкими, представляют собой переслаивающуюся толщу.

Заторфованные грунты (ИГЭ № 2) вскрыты скважиной № 1 залегают под насыпными грунтами на глубине 0.50 м (абс. отм. подошвы 0.00), мощностью 3.50 м.

Супеси текучие с прослоями песков пылеватых (ИГЭ № 3), распространены повсеместно на участке изысканий, залегают под насыпными грунтами, заторфованными грунтами и песками на глубинах 3.20 - 9.00 м (абс. отм. подошвы 3.00 - минус 2.80 м), мощность составляет 0.80-5.50 м.

Суглинки текучие с прослоями текучепластичных (ИГЭ № 4) вскрыты скважиной № 2, залегают под супесями на глубине 9.00 м (абс. отм. подошвы минус 5.00 м), мощность составляет 3.00 м.

Пески пылеватые (ИГЭ № 5) вскрыты скважиной № 2, залегают под насыпными грунтами на глубине 2.00 м (абс. отм. подошвы минус 0.50 м), мощность составляет 2.50 м.

Пески мелкие (ИГЭ № 3) вскрыты архивными скважинами 1 и 2, залегают под насыпными грунтами и супесями текучими на глубинах 4.00, 5.50, 7.80, 9.00 и 13.30 м (абс. отм. подошвы 2.27, 0.70, минус 1.53, минус 2.80 и минус 7.10), мощностью от 1,50 м до 2,50 м.

Озерно-ледниковые отложения lg_m. Представлены суглинками мягкопластичными и песками средней крупности.

Суглинки текучие (ИГЭ № 6) вскрыты скважинами 1 и 2, залегают под озерно-морскими супесями и суглинками на глубине 9.50-12.00 м (абс. отм. подошвы минус 5.50 -минус 8.00 м), мощность составляет 3.00-5.50 м.

Суглинки мягкопластичные с прослоями текучепластичных (ИГЭ № 6а) вскрыты архивными скважинами 1 и 2, залегают под озерно-морскими супесями и песками на глубине 11.50-13.30 м (абс. отм. подошвы минус 7.10 - минус 5.23 м), вскрытая мощность 5 - 6.70 м.

Пески средней крупности (66) вскрыты архивной скважиной № 2, залегают под суглинками мягкопластичными на глубине 16.50 м (абс. отм. подошвы минус 10.23 м), вскрытая мощность 3.50 м.

Ледниковые отложения (gin). Представлены супесями пластичными, переслаивающимися с песками пылеватыми.

Супеси пластичные (ИГЭ № 6 и № 7) вскрыты скважинами 1 и 2, залегают на глубинах 14.50-15.50 м под озерно-ледниковыми суглинками и на глубинах 24.50-25.00 м под ледниковыми песками, (абс. отм. подошвы минус 11.50-минус 21.00 м), мощность 5.50-6.00 м.

Пески пылеватые (ИГЭ № 8) вскрыты скважинами 1 и 2, залегают под ледниковыми супесями на глубине 20.50-21.00 м (абс. отм. подошвы минус 17.00 - минус 16.50 м), мощность составляет 3.50-4.50 м.

В 2004 г был разработан проект реконструкции кинотеатра под развлекательный центр. Внутри здания были выполнены свайные фундаменты и устроен металлический каркас. С торцевой стены здания была выполнена четырехэтажная пристройка из монолитного железобетона. Перед началом производства работ по реконструкции фундаменты здания были усилены наклонными буроинъекционными сваями длиной 10 м. Диаметр свай составлял 0,151 м, шаг 1,0 м, угол наклона к вертикали 5°. Расчетная несущая способность сваи по грунту составила 75 кН.

При проектировании и производстве работ по реконструкции был не учтен ряд неблагоприятных факторов, что привело к неравномерным деформациям фундаментов здания. Основными причинами образования деформаций послужило следующее:

- дополнительные осадки существующих конструкций здания вызваны, вероятнее всего, нарушениями технологии ведения работ и расструктуриванием грунтов основания фундаментов при выполнении свай диаметром 400 мм под пристраиваемую часть здания.
- в основании фундаментов залегают заторфованные отложения и насыпные грунты с прослоями песков пылеватых. Данные грунты характеризуются сильной сжимаемостью и при минимальных внешних воздействиях, происходит их расструктуривание из-за чего и произошли осадки.

Расчетные значения физико-механических характеристик грунтов слагающих площадку представлены в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1. Расчетные значения физико-механические характеристик грунтов площадки

Наименование грунтов	ИГЭ	tern- ая влажность We	Плотность грунта т/м •?	Коэср— т пористости е	Показатель текучести k	Угол внутреннего трения	Сцепление с, кПа	Модуль деформации Е, МПо
Насьтнае грунта	;	Расчетное сопротивление R= 1.0 кгс/смС						
Заторсрованае грунта	2	В качестве основания не рекомендуются						
Супеси текучие с прослоями текучеп/юстичнах	J	0.3J	1.84	0.957	>;	14'	10	Ь
Суглинки текучие с прослоями текучепластичнак с примесью органических веществ	4	0.39	1. 77	1.126	>1	8'	8	5
Пески палеватае средней плотности	5	нас. водой	1.94	0.750	-	28'	2	! 1
Пески мелкие средней плотности	5а	нас. водой	2.00	0.650	-	32'	1	29
Суглинки текучие	6	0.30	1 94	0.819	.,/		12	-
Суглинки мягкопластичнае с проялоями текучи*	6а	0.35	1.S7	0.957	0.64	13-	17	7
Пески средней крупности, плотностей	66	нос. водой		0.550	-	36°	1	40
Супеси пластичне	i	0.19	2.12	0.517	0.4 3	26'	17	11
Пески палеватае, плотное	c	нос. водой1	2.03	0.600	-	12'	5	22

Для оценки геотехнической ситуации были изучены основные факторы, которые привели к развитию деформаций конструкций здания.

Наличие в основании существующих фундаментов мощной толщи слабых грунтов

В основании фундаментов реконструируемого здания залегают слабые заторфованные и насыпные грунты, с прослоями песков пылеватых. Подстилающими слоями являются глинистые отложения с консистенцией от текучей до текучепластичной, характеризующиеся сильной сжимаемостью и малой водопроницаемостью. Общая мощность слабых грунтов составляет до 21 м.

Нарушение структуры грунтов в основании существующих фундаментов при устройстве свайных фундаментов

Дополнительные осадки существующих конструкций здания вызваны, вероятнее всего, расструктуриванием основания вследствие ведения работ при выполнении свайных фундаментов под пристраиваемую часть здания В результате нарушения природной структуры грунтов получили развитие дополнительные осадки конструкций здания.

Технологические воздействия при устройстве встраиваемого металлического каркаса внутри здания на существующие конструкции здания.

При устройстве встраиваемого металлического каркаса внутри здания существующие конструкции здания получили дополнительные осадки, вызванные воздействием от производства строительных работ.

Изменение напряженно-деформированного состояния грунтов в основании существующих фундаментов при устройстве встраиваемого металлического каркаса.

При устройстве встраиваемого металлического каркаса и нагружения ростверков возникнет осадочная воронка, в пределах которой находятся существующие фундаменты здания. При этом возможна осадка

существующих конструкций вследствие образования дополнительных напряжений в основании фундаментов от нагружения ростверков.

Для оценки напряженно-деформированного состояния грунтов в основании существующих фундаментов было выполнено численное моделирование пространственной системы «основание-фундаменты-надземные конструкции». Работа была произведена автором совместно с инженером Лучкиным М. А. под руководством профессора Улицкого В. М. Оценка напряженно-деформированного состояния грунтов в основании фундаментов была выполнена с использованием программного комплекса «FEM-models», разработанного под руководством профессора В.М.Улицкого сотрудниками НПО «Георекнструкция-Фундаментпроект».

В программе реализована упруго-пластическая модель грунта, предполагающая линейную связь между напряжениями и деформациями в пределах поверхности, описываемой критерием Мора-Кулона и бездилатантное течение грунта на предельной поверхности.

Расчет системы «основание-фундаменты-надземные» конструкции производился в три этапа:

На первом этапе расчета была смоделирована пространственная расчетная схема здания до реконструкции. Физико-механические характеристики грунтов приняты по материалам проведённых инженерно-геологических изысканий.

На втором этапе расчета была смоделирована пристраиваемая часть здания. При назначении физико-механических характеристик грунтов было учтено нарушение структуры грунтов и их разуплотнение в основании существующих фундаментов, возникшее от производства работ при устройстве свайных фундаментов. Прочностные характеристики грунтов были снижены исходя из результатов геодезического мониторинга за фактическим осадками конструкций. На третьем этапе расчета были заданы нагрузки на ростверки от встраиваемого металлического каркаса внутри здания. По выполненным расчетам получены следующие результаты:

- численные значения напряжений в основании существующих фундаментов

и в надземных конструкциях на период до реконструкции, при строительстве монолитной железобетонной каркасной пристройки и при строительстве встраиваемого металлического каркаса;

- совместные деформации системы основание-фундаменты-надземные конструкции на период до реконструкции, при строительстве монолитной железобетонной каркасной пристройки и при строительстве встраиваемого металлического каркаса;

- расчетные осадки основания существующих фундаментов на период до реконструкции, при строительстве монолитной железобетонной каркасной пристройки и при строительстве встраиваемого металлического каркаса.

Для оценки напряженно-деформированного состояния системы: «буроинъекционная свая-грунт» был выполнен разработанный автором аналитический расчет и численное моделирование с помощью программ Scad и Plaxis. Программа Scad позволяет рассчитывать конструкции на упругом основании на основе двухконстантной модели грунта Пастернака. Коэффициенты постели рассчитываются автоматически на основе значений модуля деформации грунтов и коэффициента Пуассона. Программа Plaxis позволяет учитывать совместную работу грунта и конструкции при различных моделях грунта. В данном случае была использована упруго-пластическая модель Мора-Кулона, основанная на физико-механических характеристиках грунтов: ф, с, E_Q, и.

На рис. 4.1.2.1 и 4.1.3.1 представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния системы: «буроинъекционная свая-грунт», полученные с помощью программ Scad и Plaxis.

4.1.1 Аналитический метод **определения внутренних** усилий в буроинъекционной свае

По отношению расчетной длины сваи к диаметру определяем коэффициент, учитывающий влияние продольного изгиба и случайного эксцентриситета продольной силы:

$$\Lambda = 22 L 0 / i = 0.45$$

Несущая способность сваи по материалу с учетом коэффициентов условий работы $P = \gamma_c \phi (\gamma_{ñb} R_b À_b + \gamma_{ca} R_{ac} À_a)$

$$P = \gamma_c \phi (\gamma_{ñb} R_b À_b + \gamma_{ca} R_{ac} À_a)$$
$$= 0{,}45(8500 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}01789 + 270000 \cdot 0{,}00061) = 1\ кН.$$

Несущая способность сваи по грунту: 75 кН.

Принимаем в качестве вертикальной нагрузки на сваю наименьшую несущую способность по грунту - 75 кН.

Начальный модуль деформации мелкозернистой бетонной смеси класса В15 с учетом понижающего коэффициента 0,72 по рекомендациям:

$E_h = 24000000 \cdot 0{,}72 = 17280000 к/л^2$;

Момент инерции поперечного сечения сваи относительной главных осей:

$$I = \frac{n - d^{4}}{64} = \frac{3.14 - 0.15^{4}}{64} = 0.00024838\ м^{4}$$

Модуль упругости арматуры:

E = 200000Мпа;

Приведенный модуль упругости железобетонного сечения сваи:

$$E = \frac{E_h - I_m + E - J}{I_m} = \frac{17280000 - 0.000024838 + 200000 - 0.00001249}{0.000024838} = 27304962 кгс/м^{2}$$

Изгибная жесткость сваи:

EI_m = 27304962 • 0,000024838 = 678

Упругий отпор грунта:

$$k = \frac{\frac{d^{a} - R_b}{3.5}}{\frac{E^{4} - d^{a} - R_b}{V\left(1 - V^{2}\right) E\, I_m}} = \frac{0.15 - 0.9}{3.5} / \frac{11000^{4} - 0.15 - 0.9}{\left(1 - 0.3^{2}\right) - 678} = 25\ кН / м$$

Продольная сила:

N = F-cosa = 75-cos5° = 74,7кН;

Поперечное усилие:

Q = F sin a = 75 sin 5° = 6,54кН;

Значение начального эксцентриситета вычисляется по формуле:

$$e_a = L_a - k + 0,1 - d = 0,22 - 0,03 + 0,1 \cdot 0,151 = 0,02м;$$

Изгибающий момент от действия поперечного усилия и продольной силы приложенной с начальным эксцентриситетом *(e_a)* и эксцентриситетом *(e_0=Ssina)* образовавшимся в результате вертикальной осадки фундамента *S = 0,03м*:

$$M_T = 3.54 + N - \left(e_a + S \sin \alpha\right) = 3.54 + 74.71 - \left(0.02 + 0.04 - \sin \alpha\right) = 5.29 \, кН / м$$

Допускаемый момент для железобетонного сечения по нормам:

$$M = K\ 'R_b - 1ы - Уы - У_м - b - x(h_0 - 0,5x) + R_{sc} As'(h_0 - a) =$$
$$= 8500 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,135 \cdot 0,149(0,120 - 0,5 \cdot 0,149) +$$
$$+ 270000 \cdot 0,000616(0,120 - 0,03) = 14,97кН * м > M_т = 5,29кН * м$$

Моментное усилие не превышает предельно допустимое по нормам

4.1.2 Численный метод определения внутренних усилий в буроинъекционной свае с помощью программы SCAD

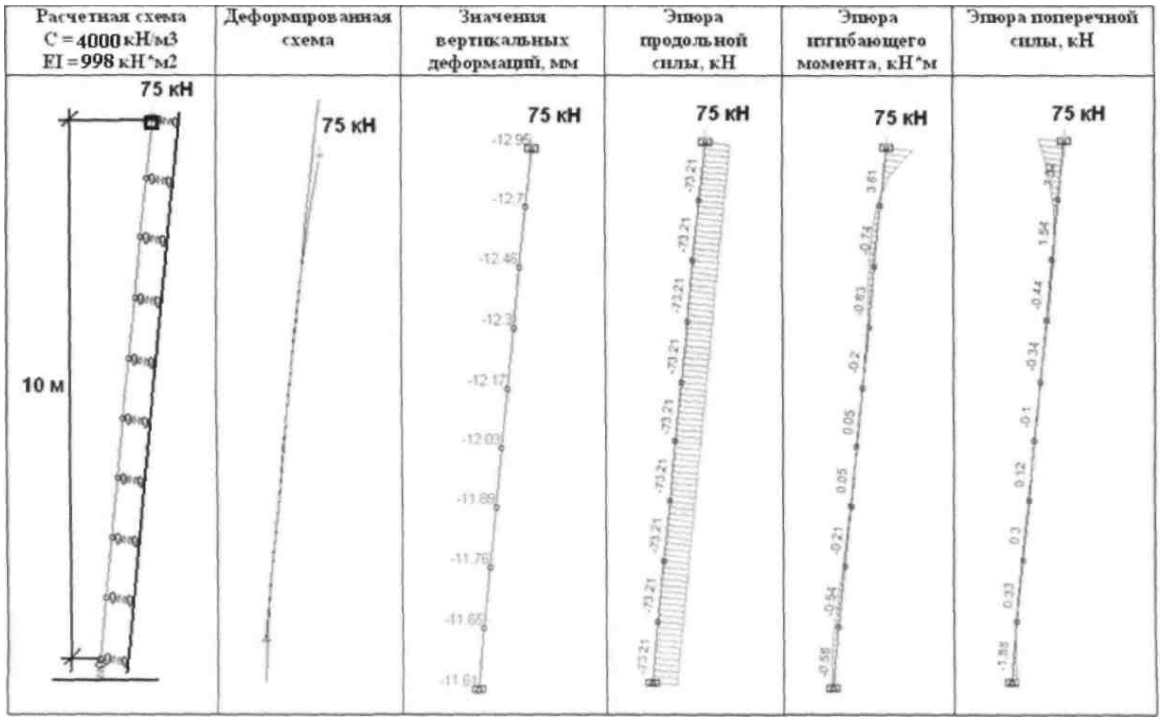


Рис. 4.1.2.1. Внутренние усилия в свае определенные с помощью программы SCAD

4.2 Оценка напряженно-деформированного состояния системы: «буроинъекционная свая-грунт» при реконструкции здания расположенного на Литейном пр., д. 26

Здание, расположенное на Литейном проспекте д. 26, является жилым. Проектом реконструкции предусматривалось: снос примыкающего к нему здания и строительство торгово-развлекательного центра. По конструктивной схеме здание бескаркасное с несущими продольными стенами. Пространственная жесткость здания обеспечивается несущими продольными кирпичными стенами и перекрытиями. Фундаменты здания по конструкции ленточные, по устройству на естественном основании, по материалу бутобетонные.

В геологическом строении площадки принимают участие современные четвертичные отложения озерно-морского (lmiv) генезиса, верхнечетвертичные отложения озерно-ледникового (lgin) и ледникового (gin) генезиса, перекрытые с поверхности насыпными грунтами (tgiv).

В геоморфологическом отношении площадка расположена в пределах Приневской низменности. В строении площадки принимают участие пять генетических образований: техногенные, озерно-морские, озерно-ледниковые, ледниковые и верхнечетвертичные озерно-ледниковые отложения.

Техногенные отложения ftgiy) представлены насыпными грунтами мощностью 1,9-2,2 м.

Озерно-морские отложения (mliy) представлены песками и супесями. Пески пылеватые, средней плотности сложения, водонасыщенные, мощностью 1,2-4,8 м. Супеси пылеватые серые, пластичные мощностью 0,7-0,8 м.

Озерно-ледниковые отложения (lgiw) представлены суглинками и супесями.

Суглинки пылеватые текучепластичные, мощностью 1,4-3,8 м.

Супеси пластичные мощностью 1,4-2,8 м.

Ледниковые отложения fgm) представлены суглинками полутвердыми мощностью 11,7-17,3 м.

Межстадиальные озерно-ледниковые отложения (lg IIP представлены супесями и суглинками.

Супеси пылеватые серые пластичные мощностью 2,0-4,2 м.

Суглинки пылеватые полутвердые мощностью 1,0-6,8 м.

Перед началом нового строительства фундаменты под межевую стену здания были усилены буроинъекционными сваями длиной 17,0 м. Диаметр свай составил 0,151м, шаг 0,75м, угол наклона к вертикали 19°. Армирование ствола свай выполнялось с помощью пространственных каркасов из стержневой арматуры периодического профиля 4014 класса А3ОО. Несущая способность сваи по грунту, рассчитанная по требованиям СНиП, составила 200 кН.

При проектировании и производстве работ по реконструкции был не учтен ряд неблагоприятных факторов, что привело к неравномерным деформациям фундаментов межевой стены здания. Основными причинами образования деформаций послужили следующие факторы:

- капитальный ремонт здания не выполнялся со дня его постройки с 1874 года;
- техническое состояние конструкций здания до начала производства работ по реконструкции можно классифицировать как аварийное или недопустимое (требующее срочного ремонта);
- вокруг здания устроено множество инженерных сетей, из которых происходят периодические протечки, что приводит к нарушению структуры грунта в основании фундаментов и неравномерным осадкам;
- в основании фундаментов залегают пылеватые пески с органическими остатками, обладающие тиксотропностью (свойством разжижения при малейших динамических воздействиях).

демонтаж здания примыкающего к межевой стене дома был выполнен с нарушениями правил производства работ (стена демонтируемого здания была фактически моментально обрушена);

Согласно геодезическим наблюдениям максимальная дополнительная технологическая осадка межевой стены существующего здания составила 60 мм, что в три раза превышает предельно допустимую дополнительную осадку по требованиям ТСН 50-302-2004.

Для оценки напряженно-деформированного состояния системы: «буроинъекционная свая-грунт» был выполнен аналитический расчет и численное моделирование с помощью программ Scad и Plaxis.

Расчетные значения физико-механических характеристик грунтов слагающих площадку представлены в таблице 4.2.1.

На рис. 4.2.2.1 и 4.2.3.1 представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния системы: «буроинъекционная свая-грунт» с помощью программ и Plaxis.

ТАБЛИЦА 4.2.1. Расчетные значения физико-механические характеристик грунтов площадки

Ноименобание грунтод	№ ИГЭ	Ест- оя Влажность We	Плотность грунта	Ко э<р- т пористости е	Показатель текучести /,	Угол Внутреннего трения	Сцепление С, кПа	Модуль деформации Е, МПа
Насыпные грунта		Расчетное сопротивление R= 1.0 кгс/смі						
Пески пылеботые средней плотности насыщенные водой	2	0.4	1.98	0.700		24-	1	10
Супеси пылеботые с примесью органических ЬещестВ	3	0.36	1.80	0,969	0,89	IV	4	6,5
Суглинки тяжелые пылеботые текучепластичные	4	0.37	186	1,016	0,92	8'	6	6
Суглинки легкие пылеботые текучеп ластичные	5	0.27	197	0, 743	0,90	14'	11	8,5
Супеси пылеботые пластичные	6	0.22	2,05	0,607	0,69	I3'	7	9
Суглинки легкие лолутбердые	7	0.19	2,11	0,537	0,19	22'	20	13
Супеси пылеботые пластичные	8	0,21	2,0 '	0.581	Q i o	17'	у	1п
Суглинки тяжелые полутбердые	9	0.29	1 Q4	0,821	0,10	17'	15	!-

4.2.1 Аналитический метод определения внутренних усилий в буроинъекционной свае

Несущая способность сваи по грунту: 200 кН.

Принимаем в качестве вертикальной нагрузки на сваю наименьшую несущую способность по материалу - 106 кН.

Начальный модуль деформации мелкозернистой бетонной смеси класса В15 с учетом понижающего коэффициента 0,72 по рекомендациям:

$$E_h = 24000000 \cdot 0{,}72 = 17280000 к/л^2;$$

Момент инерции поперечного сечения сваи относительной главных осей:

$$I = \frac{n \cdot d^4}{64} = \frac{3.14 \cdot 0.15^4}{64} = 0.00024838\ м^4$$

Модуль упругости арматуры:

$$E = 200000 Мпа;$$

Момент инерции 4014 класса А300 относительно главной оси:

$$J_t = 0.000001249$$

Приведенный модуль упругости железобетонного сечения сваи:

$$E = \frac{E_h \cdot I_m + E \cdot J}{I_m} = \frac{17280000 \cdot 0.000024838 + 200000 \cdot 0.00001249}{0.000024838} = 27304962 кгс/м^2$$

Изгибная жесткость сваи:

$$E I_m = 27304962 \cdot 0{,}000024838 = 678$$

Продольная сила:

$$N = F \cos a = 106 \cos 19° = 100{,}22 \text{ кН};$$

Поперечное усилие:

$$Q = F \sin a = 1 \sin 19° = 34{,}51 \text{ кН};$$

Значение начального эксцентриситета вычисляется по формуле норм:

$$e_a = L_0 * k + 0\text{-}d = 0{,}22 \cdot 0{,}03 + 0{,}1 - 0{,}151 = 0{,}02 \text{м};$$

Изгибающий момент от действия поперечного усилия и продольной силы приложенной с начальным эксцентриситетом (e_a) и эксцентриситетом$(e_0 = S^{\sin \alpha})$ образовавшимся в результате вертикальной осадки фундамента $S = 0{,}06м$:

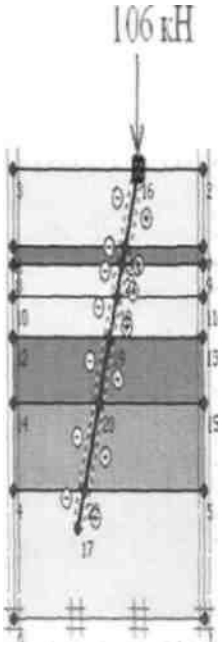
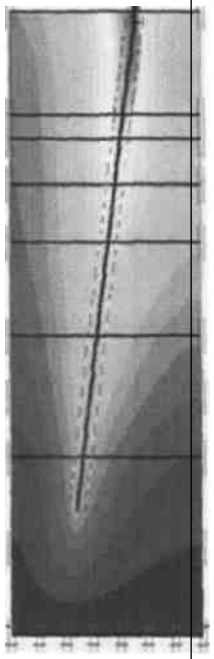
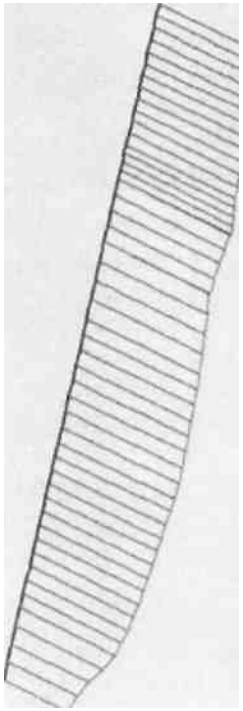
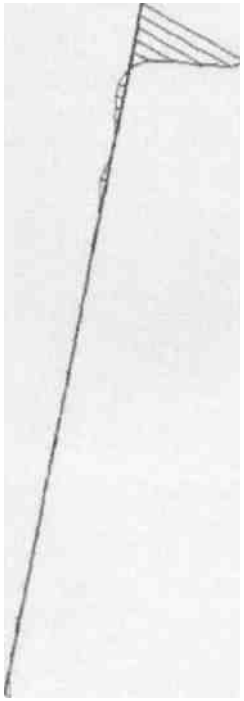
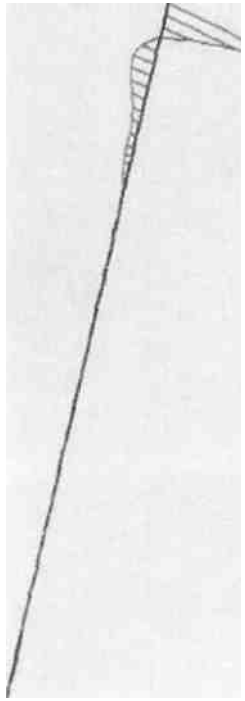
$$M_T = 3.54 + N - \left(e_a + S \sin \alpha\right) = = 3.54 + 100.22 - \left(0.02 + 0.06 \ \sin \alpha\right) = = 22.1 \, кН / м$$

Допускаемый момент для железобетонного сечения по нормам:

$$M = R_k \text{ -У*i -Ум "Уи "Ум -b-x}\{h_0 \text{ -0,5x)+}R_K As'(h_0 \text{ -a}) =$$
$$= 8500\text{-}0{,}9\text{-}0{,}8\text{-}0{,}8\text{-}0{,}8\text{-}0{,}135\text{-}0{,}149(0{,}120\text{-}0{,}5\text{-}0{,}149)+$$
$$+ 270000 \bullet 0{,}000616(0{,}120 - 0{,}03) = 14{,}97 \text{кНм} < M_T = 22{,}1 \text{ кН м}$$

Моментное усилие в свае превышает предельно допустимое на 32 %.

4.2.2 Численный метод определения внутренних усилий в буроинъекционной свае с помощью программы PLAXIS

Расчетная схема	Деформированная схема	Эпюра продольной силы, кН	Эпюра поперечной силы. кН	Эпюра изгибающего момента, кН*м
				

В таблице 4.2.2 представлены результаты расчетов по двум вышеприведенным объектам. В таблице приведены внутренние усилия в буроинъекционных сваях: продольное усилие *(N)*, поперечное усилие (0 и изгибающий момент (М). При сравнительном анализе величин внутренних усилий максимальная относительная разница составила 17 % (значения поперечных усилий в свае для кинотеатра «Ленинград»). Это объясняется тем фактом, что при определении усилий выбранная модель грунта незначительно влияет на величины внутренних усилий, при прочих равных условиях. Наибольшее влияние на внутренние усилия оказывают: внешняя нагрузка и изгибная жесткость сваи. Максимальные значения усилий в гибких и длинных сваях образуются вблизи приложенной нагрузки.

Таблица 4.2.2. Сводная таблица результатов расчетов по двум объектам

Наименование объекта	**Усилия по SCAD, *N,кН* Q,кН *м* кН*м**	**Усилия по PLAXIS, *N,кН* *Q,кН* *M,* кН*м**	**Усилия по аналити-ческому расчету,** *N,* **кН &кН *M,* кН*м**	**Изгибающий момент при дополнитель-ной осадке фундамента, кН*м**	**Относительное превышение предельно допустимых деформаций/ усилий, % %**
	2	**3**	**4**	**5**	**6**
Здание кинотеатра на Потемкинской 4	-73,21 7,32 3,61	-74,37 7,84 3,57	-74,71 6,54 3,54	**5,62**	50 **0**
Здание на Литейном 26	-100,37 33,93 21,17	-105,30 34,11 19,73	-100,22 34,51 18,15	22,11	**67** 32

4.3 Выводы по главе

При конструировании буроинъекционных свай усиления часто не учитывается, что реконструкция в условиях слабых грунтов приводит к изменению напряженно-деформированного состояния и дополнительным осадкам фундаментов. Вследствие дополнительных осадок фундаментов на наклонные сваи передаются усилия, на которые они, как правило, не рассчитаны. Буроинъекционные сваи на примерах двух объектах в Санкт-Петербурге получили недопустимые деформации: 6 см у первого здания и 4 см у второго здания. По результатам аналитического и численных расчетов внутренние усилия в буроинъекционных сваях превысили предельно допустимые значения для жилого здания, расположенного на Литейном проспекте, д. 26. Для здания, бывшего кинотеатра «Ленинград», усилия в сваях не превысили предельно допустимых в связи с малым углом наклона свай. При сравнении результатов расчетов, выполненных аналитическим и численным методами с помощью программ Plaxis, было установлено, что максимальная относительная разница величин усилий составила 17 %. Это говорит о достаточной точности предлагаемого инженерного метода расчета свай на горизонтальную нагрузку и наклонных свай на вертикальную нагрузку.

Основные выводы

1 Сравнительный анализ и статистическая обработка 200 полевых испытаний свай подтверждают гипотезу о том, что несущая способность буроинъекционных свай по грунту на вертикальную нагрузку, рассчитанная по таблицам СНиП 2.02.03-85, значительно занижает фактическую несущую способность. Для более точного определения несущей способности буроинъекционных свай, расположенных в пылевато-глинистых грунтах с консистенцией от текучей до мягкопластичной (E_0 = 5……15 МПа), острие которых устроено в грунтах с консистенцией от тугопластичнои до полутвердой (E_0 = 15....25 МПа), получены повышающие эмпирические коэффициенты *к.* Если величина несущей способности сваи принимается при осадке равной 4 см, то в зависимости от технологии изготовления буроинъекционной сваи коэффициенты *к* заключены в приведенных ниже интервалах:

-1,4 < *к* < 1,5 - с помощью проходного шнека (y_c/= 0,9-1,0);

- 1,5 < *к* < 1,6 - под защитой обсадных труб (y_c/⁻ 0,8-0,9);

- 1,5 < *к* < 1,6 - под защитой глинистого раствора (y_c/⁻ 0,8-0,9);

- 2,0 < * < 2,1 - сваи Titan (y_{cf}= 0,8-0,9).

2 Согласно статистической обработке полевых испытаний свай на вертикальную сжимающую нагрузку получены близкие границы интервалов для свай, изготовленных с помощью проходного шнека, под защитой обсадной трубы и глинистого раствора. Это объясняется эффектом опрессовки, которая «выравнивает» особенности устройства каждой технологии. Незначительное отличие границ интервалов для технологии проходного шнека объясняется более высоким значением коэффициента y_c/= 0,9-1,0, принятого по методическим рекомендациям Санкт-Петербурга. Наиболее существенное влияние на несущую способность сваи оказывает продолжительность и величина давления опрессовки бетонной смеси, а также диаметр устраиваемой скважины. Это подтверждается высокими

значениями границ интервалов для свай Titan, опрессованными под высоким давлением (0,4-0,6 МПа) и выполненными с небольшими диаметрами (преимущественно 0,13-0,15 м).

Выполнить объективную оценку влияния каждой технологии на несущую способность сваи возможно лишь в каждом индивидуальном случае на конкретной площадке. Для этого необходимо учесть многочисленные факторы, малейшее изменение которых значительно повлияет на величину несущей способности. К наиболее значимым факторам относятся: диаметр скважины, способ и скорость бурения скважины, диаметр шнека, толщина стенки обсадной трубы, вид применяемого глинистого раствора, характеристики мелкозернистой бетонной смеси, вид и физико-механические характеристики грунтов, продолжительность и величина давления опрессовки.

3 Несущая способность гибкой буроинъекционной сваи на сосредоточенную горизонтальную нагрузку зависит от изгибной жесткости сваи и деформативных характеристик грунтов, расположенных на глубине 1,5-3,5 м от места приложения нагрузки. Согласно анализу результатов полевых испытаний свай на горизонтальную нагрузку при малых перемещениях грунта (3-5 мм) зависимость перемещений от нагрузки близка к линейной и грунт работает в упругой стадии. При возрастании нагрузки зависимость становится криволинейной и работа грунта переходит в упругопластическую стадию. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит пластическое течение грунта и срыв сваи по грунту. В инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга на глубине 1,5.....3,5 от поверхности могут залегать насыпные, либо сильносжимаемые пылевато-глинистые грунты (преимущественно с модулем деформации 5-Ю МПа). Для обеспечения надежной и долговечной работы конструкций несущую способность сваи на горизонтальную нагрузку рекомендуется принимать при перемещениях грунта, не превышающих 3-5 мм.

4 Установлено, что при воздействии вертикальной нагрузки величиной от 50 до 1000 кН на буроинъекционную сваю, с углами наклона 5.....25° внутренние усилия в свае при различных значениях приведенной жесткости системы: «буроинъекционная-свая-грунт» могут измениться следующим образом:

- продольное усилие с увеличением угла наклона сваи от 5 до 25° уменьшается до 9 %;
- поперечное усилие с увеличением угла наклона сваи от 5 до 25° возрастает до 80 %;
- изгибающий момент с увеличением угла наклона сваи от 5 до 25° возрастает до 80 %.

5 Анализ полевого испытания наклонной сваи на вертикальную нагрузку подтвердил предположение о том, что осадка наклонной сваи значительно не отличается от осадки вертикальной сваи. Результаты полевого испытания наклонной сваи подтвердили также гипотезу о том, что значительное возрастание поперечного и моментного усилий может привести к разрушению сваи по материалу при нагрузке меньшей, чем несущая способность сваи по грунту.

6 При сравнении результатов расчетов наклонных свай на вертикальную нагрузку, выполненных аналитическим и численными методами с помощью программ Scad и Plaxis, было установлено, что максимальная относительная разница величин усилий составила 17 %. Таким образом, предлагаемый инженерный метод расчета сваи на горизонтальную нагрузку и наклонных свай на вертикальную нагрузку дает достаточно точные результаты и может применяться на практике.

7 Проведенный анализ напряженно-деформированного состояния системы: «буроинъекционная свая-грунт» на объектах реконструкции показал, что действующие усилия в этих сваях могут превысить расчетные (предельно допустимые) из-за воздействия следующих факторов:

- изменения напряженно-деформированного состояния грунтов при производстве работ по реконструкции;
- деформаций свайных фундаментов превышающих расчетные или предельно допустимые осадки;
- недоучета значительного возрастания поперечного и моментного усилий в буроинъекционных сваях при их устройстве с большими углами наклона к вертикали (более 10°).

8. Для обеспечения условий прочности и деформативности конструкций на протяжении всего срока их эксплуатации, в месте сопряжения головы свай с ростверком рекомендуется увеличивать площадь поперечного сечения сваи и арматуры на 30-40%, так как наибольшие усилия в гибких и длинных сваях возникают в месте приложения нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аббас, З. Ф. Натурные исследования буроинъекционных свай/ З. Ф. Аббас// Межвузовский тематический сборник трудов ЛИСИ. - Л.: ЛИСИ, 1990.-С.25-29.

2. Алексеев, П. С. Использование среды разработчика конечных элементов при создании моделей в рамках программы FEM models/ П. С. Алексеев, К. Г. Шашкин // Реконструкция городов и геотехническое строительство. - СПб., 2000. №2. - С. 125-127.

3. **Бате, К.** Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. - М.: Стройиздат, 1982. - 477 с.

4. **Бабанов, В. В.** Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций на упругом основании методом конечных элементов/ Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Л.: ЛИСИ, 1975.

5. Бартоломей, Л.А. Прогноз осадок сооружений с учетом совместной работы основания, фундамента и надземных конструкций/ Л. А. Бартоломей// Перм. Гос. Техн. Ун-т. Пермь, 1999.

6. **Бахолдин, Б. В.** Рекомендации по проектированию и устройству фундаментов из буроинъекционных свай/ Б. В. Бахолдин, Х. А. Джантимиров, А. В. Вронский, Б. Л. Фаянс// НИИОСП. - М., 1982. - 48с.

7. Бахолдин, Б. В. Исследование сопротивления грунта по боковой поверхности свай/ Б. В. Бахолдин, Н. Т. Игонькин// Сборник докладов по свайным фундаментам. - М.: Стройиздат., 1968.

8. Бевзюк, В. М. Комплексная оценка инженерно-геологического разреза Санкт-Петербурга и его окрестностей, как среды для подземных сооружений/ В. М. Бевзюк// Учебное пособие. - СПб.: ПГУПС, 2005. - 40 с.

9. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры: СП 52-101-2003. - М.: ГУП "НИИЖБ", ФГУП ЦПП, 2004. - 53 с.

10. **Бровин, С. В.** Особенности работу буроинъекционных свай усиления в массиве слабых грунтов/ Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук// Л.: ЛИСИ, 1994.-241 с.

11. **Васильев, Б. Д.** Основания и фундаменты/ Б. Д. Васильев. - М.: Госстройиздат, 1955. - 384 с.

12. **Власов, В. З.** Балки плиты и оболочки на упругом основании / В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев// М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1960. - 491 с.

13. **Герсеванов, Н. М.** Теоретические основы механики фунтов/ Н. М. Герсеванов, Д. Е. Полыиин// М.: Стройиздат, 1948.-247 с.

14. горизонтальных нагрузок/ Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук// Л., 1990. - 212 с.

15. **Гамылин, С. Е.** Усиление фундаментов мелкого заложения с помощью свай/ Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук// Л., 1990.

16. **Горбунов-Посадов, М.И.** Метод решения смешанных задач теории упругости и теории пластичности грунтов/ М. И. Горбунов-Посадов// М., 1971.

17. **ГОСТ 12248-96** Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

18. **Гольдштейн, М. Н., Черкасов И. И., Царьков А. А.** Механика грунтов, основания и фундаменты/ М. Н. Гольдштейн, И. И. Черкасов, А. А. Царьков//М.: Транспортиздат, 1981.

19. **Гордон, А. М.** Эффективный метод усиления свайных фундаментов/ А. М. Гордон// Строительство и архитектура Москвы. М., 1976. - С. 16-19.

20. **Далматов,** Б. И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов/ Б. И. Далматов, Ф. К. Лапшин, Ю. В. Россихин// Л.: Стройиздат, 1975. - 106с.

21. **Далматов,** Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты/ Б. И. Далматов// М: Стройиздат, 1981. - 319 с.

22. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов/ М. Н. Гольдштейн//М.: Стройиздат, 1973. -304 с.

23. Далматов, Б. И. Оценка несущей способности свай трения/ Б. И. Далматов// Сборник научных трудов ЛИСИ// Л,: ЛИСИ - 1972.

24. **Егоров, А. И.** Опыт проектирования и строительства фундаментов из буроинъекционных свай/ А. И. Егоров, Л. Б. Львович, Н. Р. Марочнин// Механика грунтов, основания и фундаменты/ М., 1982. - С14-16.

25. **Клейнер, И. М.** Метод прессиометрии для прогнозирования несущей способности буроинъекционных свай/ Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Минск., 1986. - 155с.

26. **Клепиков,** С. Н. Расчет конструкций на упругом основании / С. Н. Клепиков. - Киев: «Будівельник», 1967. - 184 с.

27. **Лапшин, Ф. К.** Расчет оснований одиночных свай на вертикальную нагрузку/ Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук// Саратов., 1987. - 448 с.

28. **Луга,** А. А. К нормам расчетных сопротивлений свай по грунту/ А. А. Луга// М.: Транспорт, 1965. - С,52-57.

29. **Мангушев Р. А.** Об определении несущей способности буронабивных и буроинъекционных свай/ Р. А. Мангушев, А. В. Кошман// Материалы 54-ой научной конференции. - СПб.: СПбГАСУ, 1997. - С.23-24.

30. Методические рекомендации по проектированию и производству работ по усилению грунтов основания и фундаментов инъекционными методами. -Л.: Спецпроектреставрация, 1984.-34с.

31. Несмелое, Н. С. Экспериментально-теоретические исследования формирования осадок свай большой длины при вертикальных нагрузках/ Автореферат диссертации кандидата технических наук. Л.: ЛИИЖТ, 1974. -18с.

32. Основания гидротехнических сооружений: СНиП 2.02.02-85. - М: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. - 48с.

33. Отчеты ПКТИ о результатах полевых испытаний буроинъекционных свай на статическую вдавливающую нагрузку. - СПб.: ПКТИ, 1991-2007.

34. Пособие по проектированию и устройству буроинъекционных анкеров и свай. - Минск. - 2005. - 79с.

35. Полищук, А. И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий. - Томск. - 2004, - 472с.

36. Проектирование и устройство свайных фундаментов: СП 50-102-2003, - М.: ФГУП ЦПП, 2004. - 81 с.

37. **Пузыревский,** Н. Н. Расчеты фундаментов / Н. Н. Пузыревский. - Л.: ЛНИП, 1923.

38. **Работников,** А. И. Несущая способность буронабивных свай в лессовых грунтах/ А. И. Работников, В. С. Корякин// Промышленное строительство и инженерные сооружения. Л., 1968.

39. Рекомендации по расчету свайных фундаментов на вертикальную и горизонтальную нагрузки. М: НИИОСП им. Герсеванова. - 1971. - 55с.

40. Фадеев, А. Б. Ремонт и усиление подземной части зданий. - СПб.: АСВ. - 2000. - 28с.

41. **Федоровский, В. Г.** Сваи в гидротехническом строительстве/ В. Г. Федоровский, С. Н. Левачев, С. В. Курило, Ю. М. Колесников// Учебное пособие.-М., 2003-238с.

42. **Фурса, В. М.** Строительные свойства грунтов района Ленинграда. Л.: Стройиздат.-1975. - 142с.

43. **Цытович, Н. А.** Основы прикладной геомеханики в строительстве / Н. А. Цытович, З. Г. Тер-Мартиросян. - М.: Высш. школа, 1981. - 3**1**7 с.

Снитко, Н. К. Теория и расчет балок на упругом основании. - М., 1937.-93с.

44. **Терцаги, К.** Строительная механика грунтов на основе ее физических свойств. -М.-Л., Госстройиздат, 1933.

45. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. Изд-во Недра, М., 1987.