

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



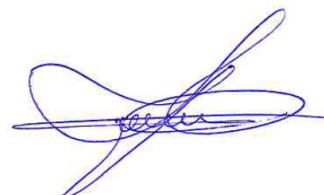
Сальный Иван Сергеевич

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ
С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Пронозин Яков Александрович



ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1. Возникновение, классификация и современные технологии устройства буроинъекционных свай	10
1.2. Особенности работы буроинъекционных свай под нагрузкой и взаимодействие свай с окружающим грунтом	20
1.3. Подходы к расчету буроинъекционных свай.....	32
1.4. Выводы по главе I.....	40
ГЛАВА II. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ С ОСНОВАНИЕМ.....	42
2.1. Цель и задачи лабораторных исследований	42
2.2. Оборудование и приборы	42
2.3. Программа проведения лоткового эксперимента.....	46
2.4. Результаты лотковых экспериментов	52
2.5. Выводы по главе II	75
ГЛАВА III. НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ С ОСНОВАНИЕМ	77
3.1. Цель и задачи натуральных исследований	77
3.2. Место проведения натурального экспериментального исследования.....	77
3.3. Подготовка к проведению натурального эксперимента	82
3.4. Результаты полевых экспериментальных исследований.....	91
3.5. Выводы по главе III	112
ГЛАВА IV. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ	114
4.1. Определение несущей способности буроинъекционных свай.....	114
4.2. Расчет осадки буроинъекционных свай	126
4.3. Рекомендации к выполнению численного моделирования буроинъекционных свай.....	134
4.4. Выводы по главе IV	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	150

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Буроинъекционные сваи малого диаметра (БИС) – сваи диаметром до 0,30-0,35 м, устраиваемые в пробуренных скважинах посредством нагнетания цементного/цементно-песчаного рабочего раствора с возможным созданием по стволу избыточного давления опрессовки.

Давление опрессовки – избыточное давление рабочего раствора на стенки скважины при устройстве БИС в результате нагнетания избыточного количества раствора.

Контактный слой грунта – слой грунта на удалении до $0,25d$ от ствола сваи, испытывающий максимальное уплотнение и изменение физико-механических характеристик, а также напряженно-деформированного состояния при устройстве БИС.

Несущая способность сваи по грунту – предельное сопротивление основания сваи по условию ограничения развития в нем деформаций сдвига в соответствии с заранее заданным условием.

Остаточные напряжения – напряжения, возникающие в массиве грунта при воздействии избыточным давлением опрессовки при устройстве БИС, в результате их релаксации и рассеивания.

Промывочный раствор – водоцементная суспензия с соотношением В/Ц=0,9...1,0, используемая в процессе бурения скважины требуемой глубины.

Рабочий раствор – состав смеси на основе цемента/пескоцемента, обладающий повышенными значениями плотности, прочности, морозостойкости и безусадочности, формирующий тело сваи и обеспечивающий несущую способность по грунту и по материалу.

Расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности и по пяте БИС – уровень напряжений, превышение которого вызывает развитие неограниченных пластических деформаций околоствайного грунта, приводящих к потере несущей способности сваи.

Сигнальная пробка – технологический прием при устройстве БИС, заключающийся в том, что при первом замесе рабочего раствора в миксерной станции в него добавляется красящий пигмент, выход которого из скважины позволяет однозначно определить полное ее заполнение рабочим раствором.

Тампонажная обойма – быстроразъемное, многоразовое устройство, герметично устанавливаемое в устье скважины, позволяющее выполнять опрессовку скважины заданным избыточным давлением рабочего раствора, за счет чего достигается уплотнение и преднапряжение свайного основания, и обеспечивается повышение сопротивления грунта по боковой поверхности и пяте сваи.

Технологические параметры устройства буроинъекционной сваи – состав промывочного и рабочего растворов, а также величина избыточного давления опрессовки и период его действия на стенки скважины.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современное состояние строительства в Российской Федерации и во многих регионах мира характеризуется высокими темпами развития. Используемые при этом решения должны отвечать требованиям эффективности, производительности, экономичности и рациональности при высоком уровне обеспечения надежности. Известно, что до 40% отказов строительных конструкций и наступлений аварийных ситуаций на объектах промышленного и гражданского назначения связано с основаниями и фундаментами. Учитывая тот факт, что перспективные, развивающиеся территории Российской Федерации зачастую расположены в условиях залегания большой толщи слабых сильносжимаемых грунтов основания, необходимость разработки и совершенствования эффективных конструкций фундаментов, а также новых технологий их устройства является *актуальной задачей*.

На сегодняшний день надежной, востребованной и широко применяемой технологией при строительстве новых, а также усилении существующих фундаментов зданий и сооружений различного назначения является буроинъекционная технология устройства свай. Этому способствует возможность производства работ по данной технологии в широком диапазоне грунтовых и климатических условиях, в условиях максимальной стесненности и вблизи с существующими зданиями и сооружениями без необходимости устройства дополнительных защитных мероприятий. Существует большое разнообразие применяемых технологий устройства буроинъекционных свай. В общем процесс их выполнения сводится к бурению и промывке скважины требуемой глубины и диаметра и ее заполнению формировочным раствором, как правило, под избыточным давлением опрессовки.

Многими исследователями установлено, что в процессе устройства буроинъекционных свай, особенно с созданием по стволу сваи избыточного давления опрессовки путем нагнетания дополнительного количества раствора в скважину, происходит изменение напряженно-деформированного состояния окружающего грунтового массива и его физико-механических характеристик. Это способствует повышению расчетного сопротивления грунта как по боковой поверхности, так и под пятой сваи. Определение зависимостей и характера изменения напряженно-деформированного состояния и физико-механических свойств окружающего буроинъекционную сваю грунта является *актуальным направлением* для корректной оценки ее несущей способности. Многочисленные испытания показывают, что фактическая несущая способность свай отличается от определенной по соответствующим нормативным документам до двух и более раз. Таким образом, совершенствование численного прогноза взаимодействия буроинъекционных свай с грунтовым основанием с учетом результатов лабораторных и полевых исследований является *актуальной задачей*.

Степень разработанности темы исследования. Основной объем научно-исследовательских и экспериментальных работ по разработке, совершенствованию, расчету и внедрению буроинъекционных свай в практику были выполнены и выполняются

следующими учеными: Бартоломей А.А., Бахолдин Б.В., Бобровский Я.М., Богомоллов В.А., Готман А.Л., Готман Н.З., Далматов Б.И., Дегиль Г.О., Джантимиров Х.А., Ильичев В.А., Конюшков В.В., Клейнер И.М., Лапшин Ф.К., Лушников В.В., Малинин А.Г., Малоян Э.Л., Мангушев Р.А., Мариничев М.Б., Маршалка А.Ю., Мишаков В.А., Мохаммад Х.М., Никитенко М.И., Никифорова Н.С., Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Перлей Е.М., Петухов А.А., Полищук А.И., Пономарев А.Б., Попова О.В., Пронозин Я.А., Прыгунов М.А., Раюк В.Ф., Самарин Д.Г., Самохвалов М.А., Сахаров И.И., Сбитнев А.В., Смолин Б.С., Соболевский Д.Ю., Соболевский Ю.А., Тарасов А.А., Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Улицкий В.М., Фадеев А.Б., Федоров Б.С., Федоровский В.Г., Чернявский Д.А., Шалгинов Р.В., Шашкин А.Г., Шулятьев О.А., Barley A.D., Bayesteh H., Bruce D.A., Bustamante M., Elaziz A., Estephan R., Gomez J., Hanna T.H., Katzenbach R., Lahuta H., Lei W., Lizzi F., Naggar M., Ostermayer H.I., Pachla H., Soliman N., Spencer I.M., Telford W., Xanthakos P., Zhu X.R. и другие.

Объект исследования: грунтовое основание, сложенное слабыми пылевато-глинистыми грунтами, с изготовленными в нем буроинъекционными сваями, в том числе с созданием по стволу избыточного давления опрессовки.

Предмет исследования: изменение напряженно-деформированного состояния и физико-механических свойств грунтового основания, происходящее в процессе устройства и статического нагружения буроинъекционных свай, в том числе устраиваемых с созданием избыточного давления опрессовки.

Цель диссертационной работы: выявление закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния и физико-механических характеристик грунтового основания, сложенного дисперсными, преимущественно слабыми пылевато-глинистыми грунтами, при устройстве БИС, в том числе с созданием избыточного давления опрессовки, для прогнозирования их несущей способности и осадки.

Задачи исследования:

– произвести анализ современных технологий устройства буроинъекционных свай малого диаметра и выполнить усовершенствование технологии изготовления и конструктивного решения буроинъекционных свай, выполняемых в условиях дисперсных, преимущественно слабых пылевато-глинистых грунтов, которая обеспечит контролируемость технологических и геометрических параметров (расход промывочных и рабочих растворов, обеспечение заданного диаметра сваи по длине, давление и время опрессовки скважины), и повысит надежность свайных фундаментов;

– выявить на основе проведения лабораторных и полевых экспериментальных исследований закономерности изменения физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния пылевато-глинистых грунтов при устройстве буроинъекционных свай малого диаметра, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки и без него;

– установить на основе проведения лабораторных и полевых экспериментальных исследований характер изменения сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивных свай малого диаметра в зависимости от технологических и геометрических параметров их устройства, а также от физических характеристик грунта контактного слоя;

– разработать усовершенствованную методику определения несущей способности буронабивных свай малого диаметра, выполняемых с избыточным давлением опрессовки, с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой;

– разработать усовершенствованную методику определения осадки буронабивных свай малого диаметра, выполняемых с избыточным давлением опрессовки, с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой, и физико-механических характеристик грунта контактного слоя.

Научная новизна работы состоит в разработке усовершенствованных методик определения несущей способности и осадки буронабивных свай малого диаметра, выполняемых с избыточным давлением опрессовки, с учетом выявленных закономерностей изменения физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния пылевато-глинистых грунтов, и в совершенствовании технологии устройства буронабивных свай, повышающей надежность свайного фундамента.

В рамках исследования получены следующие **научные результаты**:

– на основе обзора технологий изготовления буронабивных свай и анализа дефектов, возникающих при их устройстве, предложена усовершенствованная технология изготовления и конструктивного решения БИС применительно к основаниям, сложенным дисперсными, преимущественно слабыми пылевато-глинистыми грунтами, обеспечивающая контролируемость технологических и геометрических параметров, и повышающая надежность свайного фундамента;

– в результате выполненных крупномасштабных лабораторных и полевых экспериментальных исследований выявлены закономерности изменения физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния пылевато-глинистых грунтов при устройстве буронабивных свай малого диаметра, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки и без него;

– с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой буронабивных свай малого диаметра и физико-механических характеристик грунта контактного слоя, в зависимости от технологических параметров, разработаны усовершенствованные методики определения несущей способности и осадки свай, изготавливаемых с избыточным давлением опрессовки;

– определены параметры для моделирования работы буроинъекционных свай, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки, в специализированных геотехнических программных комплексах, используя простой подход, когда сваи задаются одномерным стержневым элементом, а взаимодействие сваи и грунта задается свайными интерфейсами (набором виртуальных пружин).

Теоретическая значимость работы заключается в экспериментальном выявлении и обосновании закономерностей изменения физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния пылевато-глинистых грунтов при устройстве буроинъекционных свай малого диаметра, выполняемых в том числе с созданием избыточного давления опрессовки, и разработке аналитических решений по определению сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой свай.

Практическая значимость работы заключается в совершенствовании технологии изготовления БИС малого диаметра в дисперсных, преимущественно слабых пылевато-глинистых грунтах, которая повышает надежность, и совершенствовании методик определения несущей способности и осадки свай, учитывающей технологические особенности их устройства

Методология и методы исследования:

- сравнительный анализ современных технологий устройства буроинъекционных свай малого диаметра и работ по изучению характера их взаимодействия с грунтовым основанием;
- выполнение крупномасштабных лабораторных и полевых экспериментальных исследований с использованием поверенных приборов и оборудования для установления закономерностей изменения физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния пылевато-глинистых грунтов при устройстве буроинъекционных свай малого диаметра, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки и без него;
- использование известных и апробированных аналитических решений для определения несущей способности и осадки буроинъекционных свай малого диаметра, выполняемых с избыточным давлением опрессовки;
- сопоставление и качественный анализ результатов теоретических исследований с экспериментальными данными (лабораторными и полевыми), а также с исследованиями других авторов.

Личный вклад автора состоит:

- в совершенствовании технологии устройства буроинъекционных свай малого диаметра применительно к основаниям, сложенным дисперсными, преимущественно слабыми пылевато-глинистыми грунтами, которая обеспечивает контролируемость технологических и геометрических параметров, а также повышает надежность и долговечность конструкции готовой сваи;

– в проведении крупномасштабных лабораторных и полевых экспериментальных исследований и установлении закономерностей изменения физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния пылевато-глинистых грунтов при устройстве буроинъекционных свай малого диаметра, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки и без него;

– в разработке усовершенствованных методики определения несущей способности и осадки буроинъекционных свай малого диаметра с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния пылевато-глинистых грунтов основания, происходящих при устройстве свай, в том числе с созданием избыточного давления опрессовки.

Положения, выносимые на защиту:

– обоснование усовершенствованной технологии устройства буроинъекционных свай малого диаметра в дисперсных, преимущественно слабых пылевато-глинистых грунтах, которая обеспечивает контролируемость технологических и геометрических параметров, а также повышает надежность и долговечность конструкции готовой сваи;

– результаты крупномасштабных лабораторных и полевых экспериментальных исследований по установлению закономерностей изменения физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния пылевато-глинистых грунтов при устройстве буроинъекционных свай, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки и без него;

– результаты крупномасштабных лабораторных и полевых экспериментальных исследований по выявлению характера изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой буроинъекционных свай в зависимости от технологических и геометрических параметров их устройства, а также от физических характеристик грунта контактного слоя;

– разработанная усовершенствованная методика определения несущей способности и осадки буроинъекционных свай малого диаметра, выполняемых с избыточным давлением опрессовки, с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения физико-механических характеристик и НДС пылевато-глинистых грунтов, в зависимости от технологических параметров устройства.

Достоверность защищаемых положений обеспечивается:

– использованием методов исследования, основанных на современных принципах механики грунтов;

– использованием актуализированных нормативных документов и применением поверенных и оттарированных приборов, оборудования и средств измерений;

– применением сертифицированных и верифицированных программных комплексов, основанных на использовании метода конечных элементов;

– согласованностью теоретических данных с результатами лабораторных и натуральных экспериментальных исследований;

– результатами внедрения разработок автора на строительных объектах.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены: на Международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и расчеты» (г. Санкт-Петербург, 2019 г., 2021 г.), на V Международной учебно-практической молодежной конференции по геотехнике (г. Москва, 2019 г.), на Международном форуме и выставке высотного и уникального строительства «Forum 100+ Russia» (г. Екатеринбург, 2019 г.), на Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону» (г. Тюмень, 2020 г., 2021 г., 2022 г.), на I Межвузовской студенческой научно-технической конференции «Актуальные проблемы подземного строительства» (г. Новосибирск, 2020 г.), на II Всероссийской конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий» (г. Пермь, 2021 г.).

Публикации. Основные научные результаты опубликованы в 8 научных работах, из которых 2 работы опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий), и 3 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Общий объем составляет 161 страницу, включает 23 таблицы, 71 рисунок и фотографию, список литературы из 142 источников.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Согласно полученным научным результатам, диссертация соответствует **п. 7** (в части разработки новых методов расчета, конструирования и устройств фундаментов при реконструкции, восстановлении, усилении и в случаях ликвидации аварийных ситуаций), **п. 10** (в части обеспечения безопасности нового строительства и реконструкции объектов), **п. 15** (в части экспериментальных исследований, направленных на изучение взаимодействия фундаментов и грунтового основания, с целью выявления новых особенностей такого взаимодействия) паспорта специальности **2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения.**

ГЛАВА I СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Возникновение, классификация и современные технологии устройства буроинъекционных свай

Технология изготовления буроинъекционных свай сочетает процесс устройства буронабивных свай и грунтовых инъекционных анкеров. В соответствии с отечественной нормативной литературой буроинъекционные сваи являются разновидностью буровых свай, которые устраиваются в предварительно пробуренных скважинах посредством последующей инъекции в них мелкозернистой бетонной смеси, а также устраиваемые в скважинах, образованных полым шнеком.

Инъекционные технологии устройства фундаментных конструкций берут свое начало с середины XX века, когда в 1956 г. в Германии при строительстве телецентра в г. Мюнхен возникла идея закрепить стенки глубокого котлована посредством заделки в толщу грунтового массива анкерных стержневых тяг с последующим заполнением образованных скважин точно нагнетаемым цементным раствором [12, 89]. Данное конструктивное решение было реализовано немецкой фирмой «Бауэр» и в 1958 г. фирма получила патент на изобретение «грунтовый анкер». В настоящее время компания «Бауэр» остается лидером на рынке производства буроинъекционного оборудования и конструкций.

Благодаря тому, что грунтовые анкеры показали высокую эффективность при использовании в качестве удерживающих конструкций было решено применить их для передачи на грунт основания и вдавливающих усилий. Данный опыт способствовал возникновению буроинъекционных свай.

При устройстве грунтовых анкеров заполнение инъекционным раствором осуществляется лишь нижней части, называемой корнем анкера, которая в результате нагнетания раствора увеличивает свой первоначальный диаметр и передает на грунт основания выдергивающее усилие. Буроинъекционные сваи в отличие от грунтовых анкеров имеют полностью заполненную инъекционным раствором скважину.

Исторически сложилось, что буроинъекционные сваи первоначально использовались в качестве свай усиления. Особенно остро вопрос в необходимости разработки инновационных методов для восстановления, усиления и реконструкции объектов возник после окончания Второй мировой войны. Первый опыт использования буроинъекционных свай получен в Италии в начале 1950 гг. при усилении фундаментов колокольни на архипелаге Бурано в Венеции. Требовалось устройство надежной опорной системы, которая с минимальными изменениями существующих конструкций и при минимальных перемещениях была бы способна воспринимать действующие нагрузки.

Задача значительно усложнялась тем, что работы необходимо было производить в сложных стесненных условиях. Поставленная задача была успешно решена итальянской фирмой *Fondedile* для которой доктор *Lizzi F.* разработал систему корневидных свай, направленных на усиление существующих фундаментных конструкций колокольни. Для создания корневидной системы устраивались буровые, монолитные, малоармированные, цементные сваи малого диаметра [18, 19, 31].

Удачный опыт реализации данного проекта способствовал дальнейшему бурному развитию и массовому применению буроинъекционных свай в Италии. Другим значимым фактором активного их использования послужило то, что в послевоенной Европе сталь была в дефиците, а корневидные сваи в силу своих особенностей имели минимальный процент армирования по сравнению с другими типами свай.

В 1962 г. фирма *Fondedile* использовала данную технологию в Великобритании при усилении фундаментов нескольких исторических сооружений. В 1965 г. технология была впервые использована в Германии при строительстве одной из ветвей метрополитена. В это время другие технологии устройства микросвай были разработаны в Швейцарии и Германии, а технологии их устройства были быстро экспортированы за рубеж. Вскоре Дальний Восток стал крупным рынком использования технологии микросвай. Все та же итальянская фирма *Fondedile* предложила использование буроинъекционных свай в Северной Америке в 1973 г. при реконструкции ряда объектов в районах Нью-Йорка и Бостона [3].

В нашей стране начало применения буроинъекционных свай относится к середине 1970 гг. Именно тогда в 1975 г. Всесоюзным объединением «Гидроцеппстрой» по проектам института «Гидроспецпроект» были проведены первые работы по применению буроинъекционных свай для усиления фундаментов одноэтажного здания [135].

Основной объем научно-исследовательских и экспериментальных работ по разработке, совершенствованию, расчету и внедрению буроинъекционных свай в практику были выполнены и выполняются следующими учеными: Бартоломей А.А., Бахолдин Б.В., Бобровский Я.М., Богомоллов В.А., Готман А.Л., Готман Н.З., Далматов Б.И., Дегиль Г.О., Джантимиров Х.А., Ильичев В.А., Конюшков В.В., Клейнер И.М., Лапшин Ф.К., Лушников В.В., Малинин А.Г., Малоян Э.Л., Мангушев Р.А., Мариничев М.Б., Маршалка А.Ю., Мишаков В.А., Мохаммад Х.М., Никитенко М.И., Никифорова Н.С., Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Перлей Е.М., Петухов А.А., Полищук А.И., Пономарев А.Б., Попова О.В., Пронозин Я.А., Прыгунов М.А., Раюк В.Ф., Самарин Д.Г., Самохвалов М.А., Сахаров И.И., Сбитнев А.В., Смолин Б.С., Соболевский Д.Ю., Соболевский Ю.А., Тарасов А.А., Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Улицкий В.М., Фадеев А.Б.,

Федоров Б.С., Федоровский В.Г., Чернявский Д.А., Шалгинов Р.В, Шашкин А.Г., Шулятьев О.А., Barley A.D., Bayesteh H., Bruce D.A., Bustamante M., Elaziz A., Estephan R., Gomez J., Hanna T.H., Katzenbach R., Lahuta H., Lei W., Lizzi F., Naggar M., Ostermayer H.I., Pachla H., Soliman N., Spencer I.M., Telford W., Xanthakos P., Zhu X.R. и другие.

Анализ источников позволил выделить следующие преимущества, способствующие широкому применению буроинъекционных свай в строительстве [54, 59, 63, 76, 80, 89-100, 106, 110, 138]:

- простота и многократная повторяемость технологических операций, обеспечивающая сокращение продолжительности выполнения работ;
- использование маневренного, легкого и малогабаритного оборудования, что позволяет устраивать буроинъекционные сваи в условиях максимальной стесненности;
- небольшой диаметр буроинъекционных свай (как правило, не превышающий 0,3 м), что позволяет производить их устройство через существующие конструкции и фундаменты (в том числе в пределах существующего свайного поля), что также обеспечивает надежное закрепление буроинъекционных свай с усиливаемой конструкцией без необходимости дополнительного устройства ростверка;
- сокращение объемов земляных работ по устройству котлованов и траншей или их полное отсутствие;
- отсутствие динамического и вибрационного воздействия на грунтовое основание в процессе вращательного бурения скважин, что позволяет снизить технологические осадки существующих зданий и сооружений, особенно при выполнении работ в условиях плотной городской застройки, а также исключить развитие негативных явлений в грунтах, обладающих тиксотропными свойствами;
- производство работ по устройству буроинъекционных свай возможно выполнять без остановки технологического процесса на промышленных объектах, а также без расселения и остановки эксплуатации жилых и административных зданий и сооружений;
- буроинъекционные сваи обладают практически неограниченной глубиной устройства, что обеспечивает возможность их опирания на надежные слои грунтового основания в независимости от глубины их залегания;
- устройство свай по буроинъекционной технологии возможно в широком диапазоне инженерно-геологических и климатических условий;
- применяемое инъекционное оборудование позволяет использовать рабочие растворы различного типа и состава в зависимости от инженерно-геологических условий площадки строительства и характера работы буроинъекционной сваи в грунте;

- в большинстве случаев при устройстве буринъекционных свай используются полые трубы-инъекторы, которые после завершения подачи раствора в скважину остаются в качестве армирующего элемента, в связи с чем отсутствует необходимость установки арматурных каркасов в тело свай;

- возможность устройства буринъекционных свай в труднодоступных и удаленных районах с слаборазвитой транспортной инфраструктурой, в т.ч. в сложных климатических условиях, за счет минимальной сырьевой логистической потребности.

К основным недостаткам буринъекционной технологии устройства свай следует отнести:

- как правило, одноразовое использование высокопрочных и дорогостоящих сердечников-инъекторов, бурового долота и соединительных муфт;

- расхождение в работе готовой буринъекционной свай по грунту и по материалу в несколько раз;

- необходимость проведения предварительных статических/динамических испытаний свай по причине недостаточной и неточной действующей расчетно-нормативной базы в области проектирования буринъекционных свай;

- сложность контроля процесса формирования ствола буринъекционной свай по глубине и оценке качества выполнения работ;

- повышенные требования к процессу приготовления рабочих растворов с соблюдением требуемых дозировок компонентов в условиях строительной площадки;

- сложность однозначной оценки окончания подачи в скважину рабочего раствора, т.к. в большинстве случаев устройство буринъекционных свай завершается после начала выхода рабочего раствора из устья скважины.

Следует отметить систему классификации буринъекционных свай, разработанную исследовательской группой по заказу Американского Федерального управления автомобильных дорог в 1997 году [34], которая построена на основных двух критериях:

- способ передачи нагрузки на сваю;
- способ формирования ствола свай.

По способу передачи нагрузки выделяют буринъекционные сваи, которые напрямую воспринимают приложенную нагрузку и передают ее на основание и буринъекционные сваи, армирующие грунтовый массив, который в целом сопротивляется приложенной нагрузке. В последнем случае создается сетчатая конструкция из свай. Мировой опыт реализации объектов с использованием буринъекционных свай позволяет судить о том, что в 90% случаев буринъекционные сваи напрямую воспринимают действующую нагрузку.

Более важным является второй критерий – способ формирования ствола буроинъекционной сваи, так как он напрямую определяет ее несущую способность. В таблице 1.1 представлена классификация буроинъекционных свай в зависимости от способа создания ствола, вида крепления стенок скважины, типа армирования ствола сваи и используемых растворов.

Таблица 1.1. Классификация буроинъекционных свай [34].

Способ создания ствола БИС	Крепление стенок скважины	Тип армирования	Используемые инъекционные растворы
Заливкой без давления и опрессовки (Тип А)	Временное	Без армирования, одиночным стержнем, арматурным каркасом или прокатным профилем	Цементный/пескоцементный раствор, подаваемый в скважину через отверстия в обсадной/буровой колонне без избыточного давления
	Постоянное по всей длине скважины	Буровой обсадной колонной	
	Постоянное на верхнем участке скважины	Буровой обсадной колонной в верхней зоне скважины, стержнем или трубой на нижнем участке	
Под давлением через буровую обсадную колонну или шнек во время ее извлечения (Тип В)	Временное	Одиночным стержнем или трубой (реже арматурным каркасом)	Во время бурения в скважину подается цементный раствор без давления, затем при извлечении буровой колонны подается дополнительный объем цементного/пескоцементного раствора с избыточным давлением до 1 МПа.
	Постоянное на части длины скважины	Буровой обсадной колонной	
	Постоянное на верхнем участке скважины	Буровой обсадной колонной в верхней зоне скважины, стержнем или трубой на нижнем участке	
С одним циклом повторной опрессовки (Тип С)	Временное	Одиночным стержнем или трубой (реже арматурным каркасом)	Во время бурения в скважину подается цементный раствор без давления, затем с интервалом 15-25 мин. подается дополнительный объем цементного/пескоцементного раствора с избыточным давлением до 1 МПа.
С несколькими циклами повторной опрессовки (Тип D)	Временное	Одиночным стержнем или трубой (реже арматурным каркасом)	Во время бурения в скважину подается цементный раствор без давления или под давлением, затем через несколько часов подается дополнительный объем цементного/пескоцементного раствора через пакеры с избыточным давлением 2-8 МПа. Количество дополнительных инъекций не ограничено.
	Постоянное по всей длине скважины	Буровой обсадной колонной	
	Постоянное на верхнем участке скважины	Буровой обсадной колонной в верхней зоне скважины, стержнем или трубой на нижнем участке	

На сегодняшний день по всему миру активно развивается станкостроение, в том числе и производство различного бурового оборудования, которое позволяет решать

различные технологические задачи при устройстве буроинъекционных свай. Наибольшую известность производства бурового оборудования для устройства буроинъекционных свай имеют английская фирма *Universal Anchorage Company*, немецкие фирмы *Bauer*, *Eurodrill*, *Salzgitter*, *Ischebeck*, итальянские производители *Casagrande*, *Fondedile*, японские фирмы *Furukawa*, *Aichi*, американские компании *CATerpillar*, *Ditch Witch*, *Cooper*, отечественная фирма *CCT Malinin Group* и многие другие. Разнообразие бурового и инъекционного оборудования способствует созданию и развитию различных технологий устройства буроинъекционных свай.

Одной из наиболее применяемых технологий устройства буроинъекционных свай является технология *Titan*, разработанная немецкой фирмой *Ischebeck* в 1984 году [77]. В нашей стране с использованием данной технологии были реализованы, например, проекты по строительству терминала АВК «Внуково» [74], при усилении фундаментов ЦВЗ «Манеж» в г. Москва после пожара [104] и т.д.

Сваи *Titan* состоят из монолитного бетонного ствола и армирующего сердечника. В качестве сердечника применяются полые штанги с накатанной волновой поверхностью, что обеспечивает высокие показатели сцепления с цементным камнем. Внешний диаметр штанг находится в диапазоне 30 – 127 мм и подбирается в зависимости от назначения и действующих нагрузок. Помимо армирующего элемента штанги используются в качестве бурового органа при креплении к нижнему концу буровой коронки.

В процессе бурения происходит посекционное наращивание штанг с использованием высокопрочных соединительных муфт. Основные конструктивные элементы буроинъекционных свай *Titan* представлены на рисунке 1.1а.

Устройство буроинъекционных свай *Titan* осуществляется в два этапа. На первом этапе выполняется бурение скважины с одновременной подачей промывочного водоцементного раствора ($V/C \approx 1,0$) под давлением до 2 МПа через сопла, расположенные в буровой коронке. В результате происходит частичный вынос разбуренных частиц грунта на рабочую поверхность, а также инфильтрация промывочного раствора в околосвайный грунт, что приводит к образованию «грунтовой рубашки» по контактной поверхности, способствующей удержанию стенок скважины в вертикальном положении и улучшению физико-механических характеристик окружающего грунта.

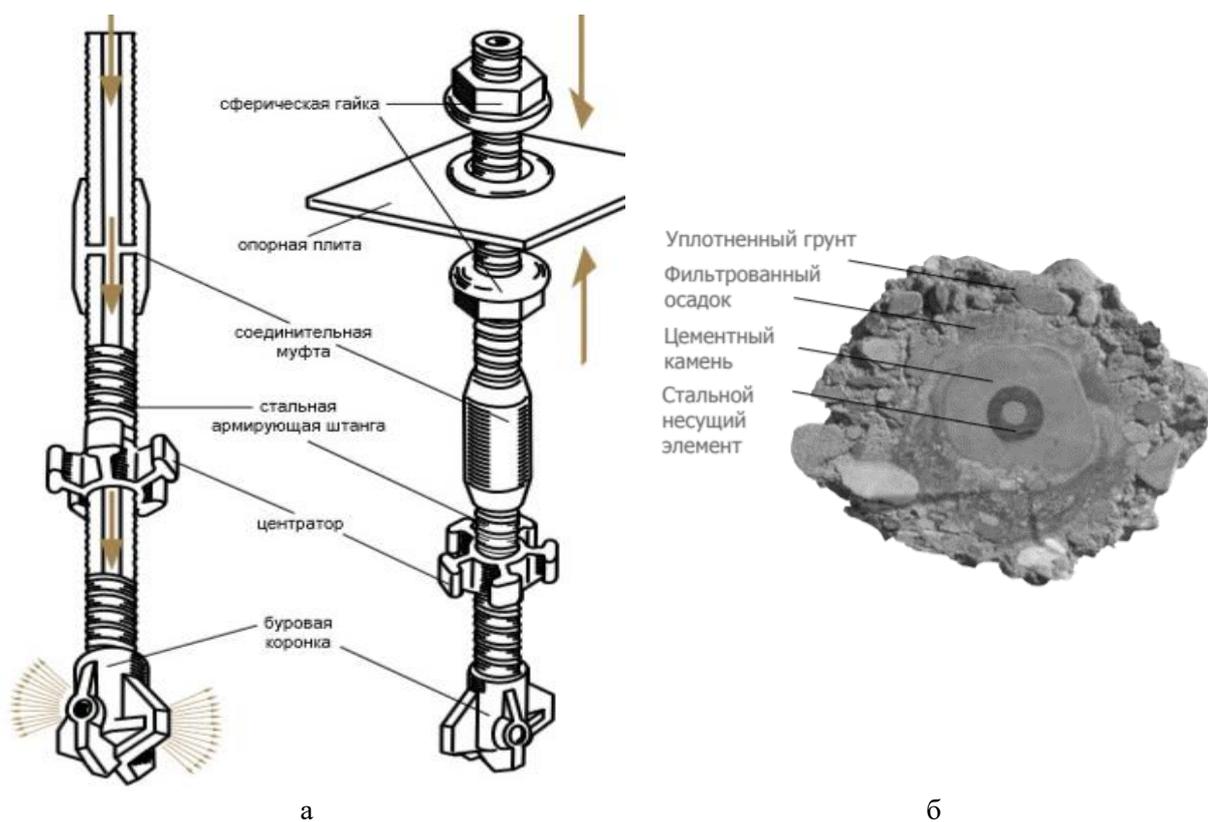


Рисунок 1.1. Буроинъекционные сваи «Titan»
 а – конструкция сваи; б – поперечное сечение готовой сваи [121].

На втором этапе в скважину нагнетается густой рабочий раствор (цементный или пескоцементный) с $V/C \approx 0,4 - 0,6$ под давлением до 6 МПа. Густой рабочий раствор позволяет выдавить из скважины частицы грунта, которые не удалились на этапе промывки, а также способствует увеличению первоначального диаметра сваи. На рисунке 1.1б представлен поперечный разрез готового ствола буроинъекционной сваи *Titan*.

Отечественным аналогом немецкой технологии *Titan* является технология изготовления буроинъекционных свай «Атлант» [70]. Основное отличие данной технологии заключается в том, что при бурении используют гладкие полые штанги из высоколегированной стали, которые по концам имеют резьбовую поверхность для соединения при помощи накручиваемых муфт. Также используется другой тип буровой коронки, отличный от свай *Titan*. Проведение многочисленных испытаний [71-73, 111] показывает, что в большинстве случаев срыв свай «Атлант» происходит по контактной поверхности «свая-грунт», а не по границе «цементный камень-штанга», поэтому использование полых штанг с накатанной поверхностью не всегда рационально. Кроме этого, использование гладких штанг позволяет использовать выпускаемые промышленностью трубы, что значительно сокращает конечную стоимость отечественной технологии. На рисунке 1.2 представлен общий вид конструкции сваи «Атлант».

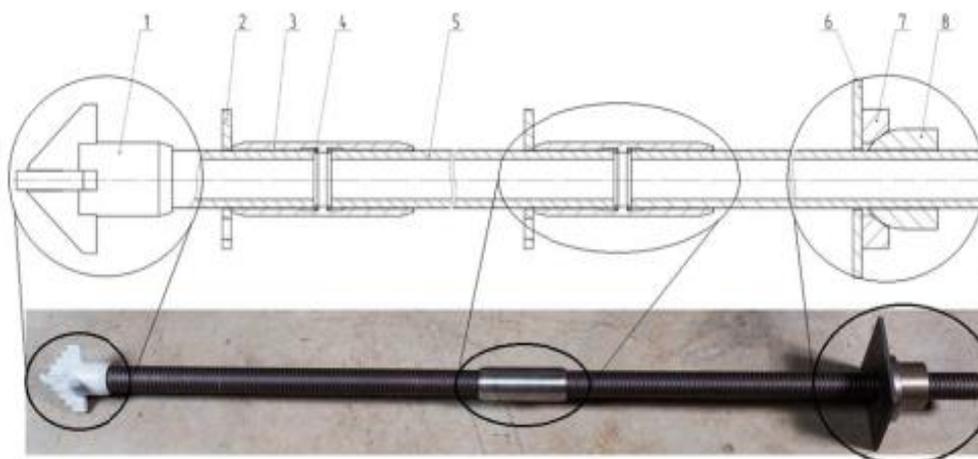


Рисунок 1.2. Буроинъекционные сваи типа «Атлант»:

1 – буровое долото, 2 – центратор, 3 – муфта, 4 – резьба, 5 – штанга, 6 – опорная пластина, 7 – шайба, 8 – гайка.

Эффективным методом устройства буроинъекционных свай является технология, разработанная Полищуком А.И., Петуховым А.А. и др. в 2004 году [96]. Данная технология предусматривает использование перфорированного иньектора, наращиваемого по мере погружения и имеющего конусный наконечник. К первой погружаемой секции иньектора приваривается круглый металлический диск, имеющий бóльший диаметр, чем перфорированная трубка. Под диском устанавливаются режущие пластинки, края которых выходят за его основание, что позволяет по мере вдавливания иньектора нарезать на боковой поверхности скважины пазы, что приводит при нагнетании раствора в скважину к глубокому его проникновению в пристенный слой грунта. Вдавливание иньектора в грунт осуществляется при помощи домкратов или гидроцилиндра. После достижения проектной глубины верхняя часть иньектора тампонируется и происходит нагнетание избыточного количества раствора, в результате чего происходит осесимметричное увеличение первоначального диаметра скважины. Перфорированная труба-иньектор остается в теле сваи в качестве армирующего элемента. На рисунке 1.3 представлен вид рассматриваемой иньекционной сваи.

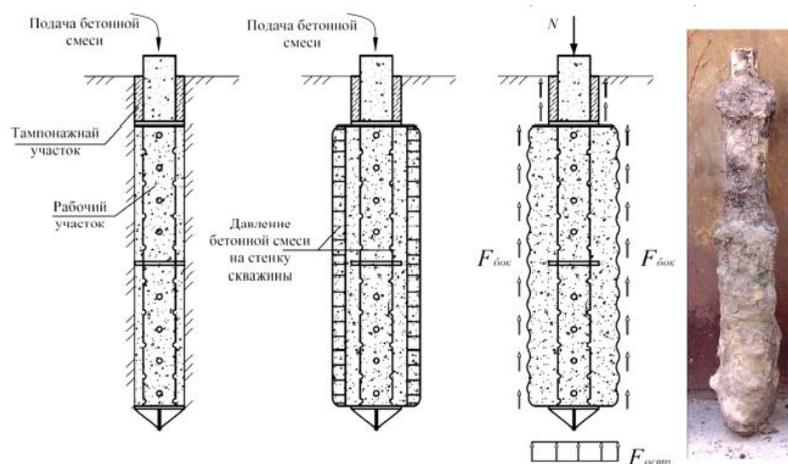


Рисунок 1.3. Иньекционная свая для слабых грунтов [122].

Особой разновидностью устройства буринъекционных свай является использование электроразрядной технологии, в связи с чем данная группа свай получила название свай-РИТ. Развитие данной технологии и ее использование для изготовления свай были разработаны в Ленинградском инженерно-строительном институте (ЛИСИ) и Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта (ЛИИЖТ) благодаря исследованиям Гаврилова Г.М., Самарина Д.Г., Улицкого В.М., Ясиевича Г.Н. и др. [124, 134]. Суть технологии изготовления свай-РИТ заключается в том, что в предварительно пробуренную скважину диаметром 130-300 мм, заполненную подвижной бетонной смесью, погружаются электроды, через которые на бетонную смесь воздействуют серией импульсов электрического тока. В результате такого воздействия происходит увеличение первоначального диаметра скважины. К преимуществам данной технологии следует отнести, то, что, регулируя глубину погружения электродов в скважину, можно создавать зоны локальных уширений в прослойках слабого грунта, а также возможность уплотнения трудноудаляемого грунта в забое скважины. На рисунке 1.4 представлены основные этапы устройства свай-РИТ.

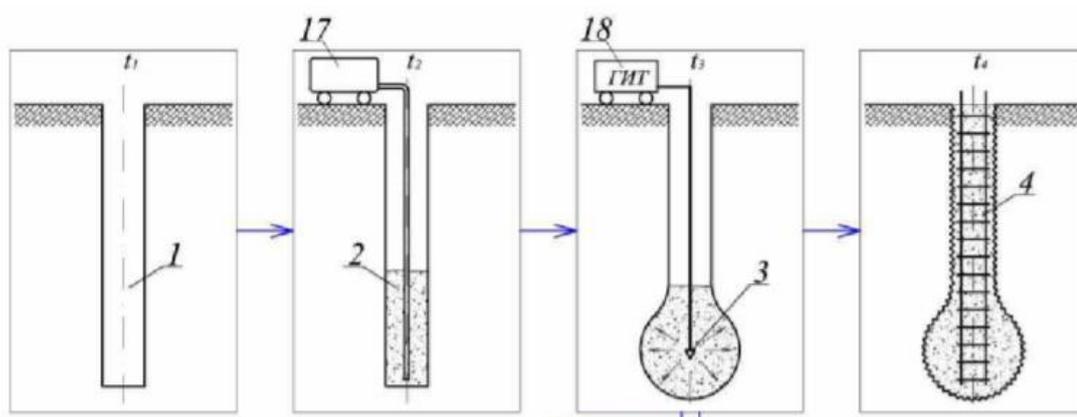


Рисунок 1.4. Схема устройства свай-РИТ [119]:

1 – скважина, 2 – бетонная смесь, 3 – излучатель энергии, 4 – арматурный каркас, 17 – пневморастворонагнетатель, 18 – генератор импульсных токов.

Перспективным методом устройства буринъекционных свай является технология, предложенная Пронозиным Я.А., Степановым М.А. и Волосюком Д.В. [98]. Способ устройства свай получил название «буринъекционные сваи с контролируемым уширением». Свая содержит перфорированную трубу-инъектор, полностью расположенную в полимерной эластичной оболочке и герметично соединенную с ней в начале. Устройство сваи включает выполнение следующих основных операций: бурение скважины диаметром 250-350 мм с извлечением грунта, установку трубы-инъектора, устройство тампонажной пробки в уровне устья и опрессовку скважины регулируемым давлением. В результате нагнетания раствора в оболочку происходит симметричное расширение стенок скважины за счет растяжения полимерной оболочки. Труба-инъектор

остается в теле сваи в качестве армирующего элемента. Конструктивное выполнение буроинъекционной сваи обеспечивает заполнение под давлением раствором всего стола сваи в пределах герметичной оболочки. На рисунке 1.5 представлены основные этапы выполнения работ по устройству буроинъекционных свай с контролируемым уширением. Данная технология имеет широкий спектр применения и возможна к использованию как при новом строительстве, так и при реконструкции или усилении фундаментов существующих зданий и сооружений.

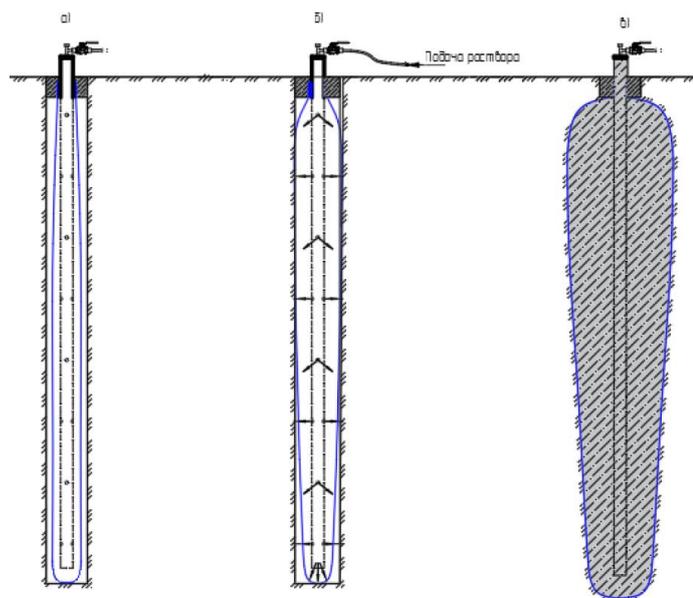


Рисунок 1.5. Буроинъекционная свая с контролируемым уширением [98].

Всемирно известным прототипом буроинъекционной сваи с контролируемым уширением являются разработанные шведской фирмой в 1980-х гг. сваи *Soilex* [76]. В конструктивном исполнении данный тип свай представляет собой инъекционную трубу и расширяющуюся металлическую оболочку, закрепленную на ее нижнем конце. Расширяющаяся оболочка изготавливается из металлических листов, которые при погружении иньектора в предварительно пробуренную скважину складываются в пачку. Под действием давления инъекции, которое, как правило, составляет до 3 МПа, металлическая оболочка раскрывается в грунте и расширяется, образуя эллиптический наконечник сваи с заранее известной площадью сечения. По мере раскрытия оболочки формируется уширение и происходит уплотнение грунта вокруг основания сваи, что придает ей повышенную несущую способность, в результате чего возможно сокращать длину свай. Основным недостатком является сложность конструкции расширяющейся оболочки и высокий расход металла, а также возможность корроирования расширяющейся металлической оболочки в водонасыщенных грунтах. На рисунке 1.6 представлена технологическая схема изготовления буроинъекционных свай *Soilex*.

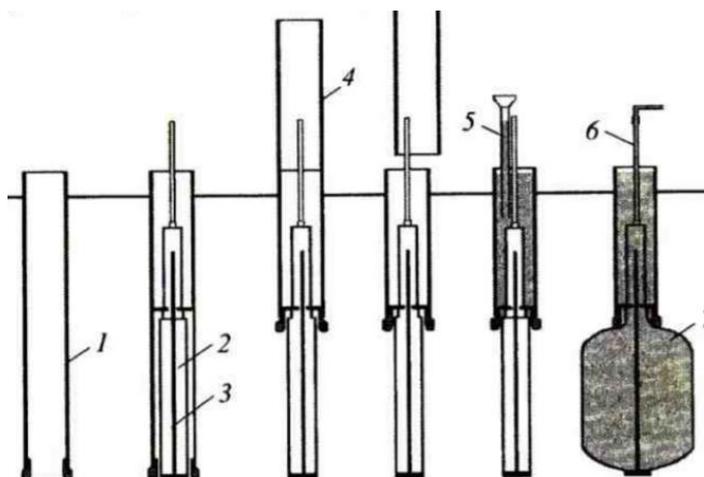


Рисунок 1.6. Буринъекционная свая с контролируемым уширением *Soilex* [76]:

1,4 – обсадная труба, 2 – расширяющаяся оболочка, 3 – стальной стержень, 5 – бетонная труба, 6 – инъекционная трубка, 7 – уширение.

Рассмотренные выше виды буринъекционных свай обладают своими достоинствами, недостатками и отличительными особенностями, которые определяют выбор технологии в конкретных инженерно-геологических, климатических и прочих условиях. Среди общих недостатков следует отметить повышенную удельную стоимость буринъекционных свай в связи с высокой металлоемкостью по причине теряемого бурового сердечника, который в некоторых случаях выполняется из дорогостоящей высоколегированной стали. Также стоит отметить, что в случае использования промывочного раствора (сваи *Titan*, *Tubex*, «Атлант» и др.) при бурении скважины бывает довольно сложно оценить момент, когда промывочный раствор будет полностью вытеснен и скважина станет заполнена рабочим раствором. В случае несоблюдения данного условия часть ствола сваи может содержать обильное включение размолотых частиц грунта (бурового шлама), что способствует снижению прочности цементного камня и может привести к нарушению сплошности сечения сваи при проектных нагрузках [56].

1.2. Особенности работы буринъекционных свай под нагрузкой и взаимодействие свай с окружающим грунтом

Процесс бурения скважины и последующего нагнетания в нее формовочного раствора (в том числе с созданием по стволу избыточного давления опрессовки) приводят к изменению физико-механических характеристик окружающего сваю грунта. Причем сущность и характер данных изменений отличаются от происходящих при устройстве традиционных типов свай, что значительно влияет на характер работы буринъекционных свай при их нагружении и на характер их взаимодействия с окружающим грунтом. Именно характер изменения физико-механических показателей околосвайного массива грунта и напряженно-деформированного состояния определяет их несущую способность. Таким

образом, одним из ключевых моментов при проектировании буроинъекционных является изучение и выявление зависимостей, происходящих в грунте при их устройстве.

подавляющим большинством как отечественных, так и зарубежных исследователей буроинъекционные сваи принято относить к висячим сваям [2, 4, 15, 30, 35, 54, 64, 76, 89, 100, 105, 112, 122, 137]. Вследствие значительной длины буроинъекционных свай и их высокой гибкости (отношение длины сваи к ее диаметру может составлять 100 и более единиц) они работают в основном за счет трения и лишь в малой степени за счет лобового сопротивления. Поэтому некоторыми авторами предлагается при определении несущей способности буроинъекционных свай сопротивление по острию не учитывать, особенно, если в процессе бурения не происходит зачищение забоя скважины от бурового шлама [10, 24, 34, 89].

Однако, исследования показывают, что даже при опирании буроинъекционных свай на сжимаемые грунты их пята может оказывать существенный вклад на величину общей несущей способности (в некоторых случаях несущая способность по острию может достигать 50% от величины общей несущей способности), а осадка свай при этом быть минимальной. Исследования китайских ученых [17] показали, что в случае опирания буроинъекционных свай в слой мягко-текучепластичной глины их несущая способность на вдавливание за счет включения в работу пяты сваи в 2 раза выше, чем при выдергивании и что до 40% нагрузки воспринимается именно острием. Подобные результаты были также получены в работе американских ученых [8], которые используя тензометрический метод оценки распределения усилий по стволу буроинъекционных свай, установили, что вклад пяты сваи в общую величину несущей способности может составлять 25 – 50% в зависимости от величины нагружения и степени ее приближения к критическому значению.

Анализируя характер работы буроинъекционных свай, представленных в работе Конюшкова В.В. [65] было установлено, что при опирании на слой песка плотного и средней плотности, а также на глинистые грунты твердой-тугопластичной консистенции характер их работы практически соответствует работе свай-стоек и висячих свай, имеющих опирание на малосжимаемые слои грунта, для которых зависимость «нагрузка-осадка» имеет кусочно-линейный характер, а осадки на каждой ступени нагружения незначительны и происходит быстрое их затухание, а доля упругих и пластических деформаций примерно равны [67]. На рисунке 1.7 представлены графики работы буроинъекционных свай при действии статической вдавливающей нагрузки, имеющие опирание острия в слои сжимаемого грунта. Аналогичные результаты также получены в исследованиях ряда российских [56, 81, 83, 112, 137] и зарубежных авторов [2, 11, 17, 26, 89].

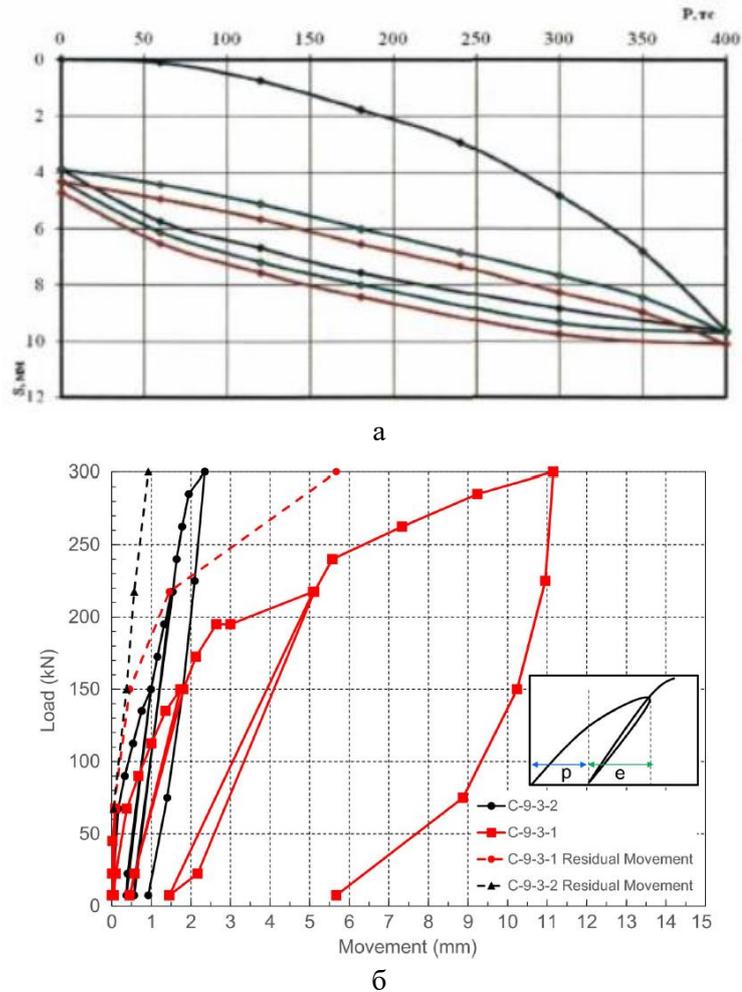


Рисунок 1.7. График зависимости «нагрузка-осадка» для буройнъекционных свай:
а – типа CFA, опирание в слой супеси пластичной ($E=10,1$ МПа) [83];
б – типа «Titan», опирание в слой песка крупнозернистого ($E\approx 20$ МПа) [2].

Таким образом, можно сделать вывод, что при проектировании буройнъекционных свай нельзя недоучитывать их несущую способность по острию, так как ее вклад в формирование общей несущей способности может быть весьма существенным. В противном случае можно не до конца использовать резервы несущей способности таких свай, что в конечном итоге приводит к существенному удорожанию проекта в целом.

К сожалению, на сегодняшний день основной нормативный документ по проектированию свайных фундаментов практически не учитывает данные особенности. Так, коэффициент условия работы под пятой сваи γ_{cR} равен 1,0 для всех способов устройства буройнъекционных свай, что фактически исключает возможность увеличения первоначального диаметра сваи в уровне острия и уплотнения грунта основания. Исключение лишь составляют сваи-РИТ, для которых данный коэффициент составляет 1,3. Сама же величина расчетного сопротивления R под нижним концом сваи, в случае если опирание происходит на крупнообломочный и песчаный грунт, определяется по формуле и зависит от первоначального диаметра сваи, начальных значений удельного веса грунта и расчетного значения угла внутреннего трения в основании буройнъекционной сваи, причем

значение угла внутреннего трения занижается на 10%. В случае же, если под острием сваи залегают глинистые грунты, то определение расчетного сопротивления R осуществляется по табличным данным в зависимости от показателя текучести грунта. Следует отметить, что для глинистых грунтов с показателем текучести более 0,6 величина расчетного сопротивления не приводится, следовательно, работа нижнего конца сваи в таких грунтах не учитывается. Аналогичная ситуация наблюдается для буроинъекционных свай, имеющих показатель текучести более 0,4 и глубину устройства свыше 20 м. Соответственно определение расчетного сопротивления по требованиям СП24.13330 не только не позволяет учесть упрочнение грунта в основании сваи, но и заведомо приводит к занижению несущей способности.

Аналогичная ситуация наблюдается при определении несущей способности сваи по боковой поверхности: коэффициент условия работы γ_{cf} составляет 0,8 – 0,9 для всех способов устройства буроинъекционных свай и 1,1 – 1,3 для свай-РИТ. Помимо прочего, имеется примечание, что при расчете несущей способности буроинъекционных свай по боковой поверхности ее периметр должен приниматься равным первоначальному периметру скважины. Само значение сопротивления по боковой поверхности определяется также по табличным данным в зависимости от вида грунта.

Таким образом, очевидно, что действующий нормативный документ, регламентирующий расчет буроинъекционных свай, не учитывает технологических особенностей их устройства и связанных с этим изменений характеристик околосвайного массива грунта. Как справедливо было отмечено Конюшковым В.В. «...такая позиция свода Правил связана с тем, что его разработка осуществлялась в 80-х годах прошлого столетия, когда первые проекты с использованием буроинъекционных свай еще только появлялись в нашей стране и не было большого опыта их использования...».

Частично указанные недостатки учтены в другом отечественном нормативном документе СП 381.1325800 Сооружения подпорные. Правила проектирования, который вступил в силу с января 2019 года. Данный нормативный документ позволяет определять предельное сопротивление выдергиванию буроинъекционных свай с теряемой буровой колонной. В соответствии с упомянутым Сводом Правил при вычислении сопротивления грунта по боковой поверхности учитывается фактический диаметр цементного тела буроинъекционной сваи, а не первоначальный диаметр скважины, путем введения коэффициента k_d :

$$D_k = d_{скв} \cdot K_d \quad (1.1)$$

Величина коэффициента k_d зависит от типа грунта и находится в интервале от 1,0 (для скальных типов грунтов) до 2,0 (для гравелистого грунта).

Также дополнительно учитывается повышенное сопротивление грунта по боковой поверхности цементного тела анкера q_{sk} , кПа, которое зависит от типа окружающего сваю грунта: для скального грунта сопротивление по боковой поверхности максимальное и составляет 250 кПа, а для глинистого грунта минимальное – 100 кПа. Указанные значения сопротивления грунта по боковой поверхности существенно превосходят значения, представленные в СП 24.13330, где сопротивление 100 кПа учитывается в расчете только при глубине погружения сваи более 35 м в глинистые грунты с показателем текучести не более 0,2. Для остальных случаев значение сопротивления грунта по боковой поверхности оказывается значительно ниже.

Недостатком указанной методики определения сопротивления грунта по боковой поверхности является отсутствие привязки коэффициента k_d и сопротивления грунта q_{sk} к глубине залегания слоя грунта и избыточного давления, при котором осуществлялась опрессовка сваи. Очевидно, что чем глубже располагается сечение ствола буроинъекционной сваи, тем больше обжимающее природное давление грунта и тем меньше увеличение первоначального диаметра скважины.

Более прогрессивными на сегодняшний день являются нормативные документы Республики Беларусь [92-94, 116]. Для вычисления сопротивления грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай используются корреляционные зависимости, которые для песчаных грунтов зависят от коэффициента пористости грунта, а для глинистых грунтов от влажности. Причем, указанные нормы позволяют определять сопротивление грунта по боковой поверхности свай, устраиваемых с опрессовкой избыточным давлением (с использованием тампонажных обойм в уровне оголовка) и устраиваемых без опрессовки. В соответствии с данными корреляционными зависимостями сопротивление грунта по боковой поверхности с использованием тампонажных обойм и без них могут отличаться для песчаных грунтов до 60%, а для глинистых – до 25%. Ниже представлены формулы [116], которые содержат корреляционную зависимость для определения сопротивления по боковой поверхности буроинъекционных свай для песков средней крупности с коэффициентом пористости 0,6-0,85:

$$R_{fp} = 113 - 123e \text{ – без устройства обоймы;} \quad (1.2)$$

$$R_{fp} = 283 - 269e \text{ – с использованием тампонажной обоймы.} \quad (1.3)$$

Также сопротивление грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай может определяться в соответствии с табличными данными в зависимости от физических характеристик грунта и глубины его расположения, но в данном случае используются повышенные коэффициенты условия работы по боковой поверхности γ_{cf} , учитывающие улучшение характеристик околосвайного грунта. Например, для буроинъекционных свай,

устраиваемых без опрессовки, $\gamma_{cf}=1,1$ для песков и $\gamma_{cf}=1,0$ для глинистых грунтов, в то время как для свай, устраиваемых с однократной опрессовкой избыточным давлением в пределах 200-500 кПа, значение данного коэффициента для песков составляет 1,4, для суглинков – 1,2, для глин 1,1. Кроме этого следует отметить, что белорусские нормы содержат данные о значении сопротивления грунта по боковой поверхности свай и для ряда специфических грунтов – насыпных, намывных, моренных грунтов и т.д., что особо актуально в том случае, если буроинъекционные сваи прорезают большую толщу техногенных грунтов.

При проектировании буроинъекционных свай в соответствии с Белорусскими нормами учитывается фактический диаметр ствола сваи, который определяется аналитически и зависит от водоцементного отношения, объема закаченной смеси, первоначального диаметра скважины. Однако, использование формулы по определению диаметра сваи не учитывает тип окружающего грунта, глубину расположения слоя, а также давление, при которой осуществлялась опрессовка, что может существенно повлиять на результаты его определения. Корреляционные зависимости по определению сопротивления по боковой поверхности буроинъекционных свай также не учитывают давление и продолжительность опрессовки, а использование данных зависимостей для глинистых грунтов с влажностью более 18% и при коэффициенте пористости более 0,35 не допускается.

Большая работа по изучению взаимодействия буроинъекционных свай с окружающим грунтом и изменения физико-механических характеристик грунта проделана Петуховым А.А. под руководством профессора Полищука А.И. [99]. В рамках исследования проводились испытания буроинъекционных свай, выполненных в соответствии с патентом [96], длиной от 1,5 до 5,0 м в инженерно-геологических условиях г. Кемерово и г. Томска, которые в пределах рабочей области характеризовались наличием глинистых грунтов мягкопластичной-текучей консистенции. Первоначальный диаметр скважин составлял 57 мм – 188 мм. Опрессовка свай выполнялась давлением до 1 МПа. После откопки опытных свай до глубины 3,5 м было установлено, увеличение первоначального диаметра в зоне залегания глинистых грунтов мягкопластичной консистенции до 40 %, а в зоне залегания грунта текучей консистенции – до 80 %.

Также оценивалось изменение физико-механических характеристик околосвайного массива грунта по результатам статического зондирования и в результате непосредственных испытаний отобранных образцов. По данным статического зондирования было отмечено уплотнение грунта в пределах 0,2-0,4 м от оси свай, что вызвало повышение сопротивления трению по боковой поверхности и по наконечнику зонда на 30 – 50%. В результате отбора монолитов было выявлено увеличение плотности

грунта, плотности сухого грунта и удельного сцепления до 1,14 – 1,25 раз, уменьшение влажности грунта до 1,2 раз и коэффициента пористости до 1,6 раз, а также повышение угла внутреннего трения до 3 градусов в пределах уплотненной зоны околосвайного грунта, которая составила 2 – 2,5 диаметра ствола. К сожалению, в работе не приведены данные по изменению характеристик грунта на глубине более 3,5 м.

Шалгинов Р.В. выделяет четыре стадии, которые происходят в окружающем грунте при устройстве буроинъекционных свай [140]. На первой стадии давление опрессовки меньше давления обжатия грунта и только начинает возрастать, в результате чего расширения стенок скважины и уплотнения грунта не происходит. Первая стадия довольно быстро сменяется второй стадией, на которой давление опрессовки превосходит обжимающее давление окружающего грунта, что приводит к увеличению первоначального диаметра скважины и повышению плотности грунта в контактной зоне. По мере удаления от стенок скважины плотность грунта уменьшается до первоначального значения. Последующая стадия характеризуется продолжающимся расширением скважины и уплотнением грунта в контактной зоне до предельного значения. Дальнейшее действие давления опрессовки на стенки скважины приводит к увеличению толщины контактного слоя грунта, в котором формируется максимально возможная плотность (четвертая стадия). По мере удаления от скважины плотность грунта также стремится вернуться к исходному показателю. На рисунке 1.8 схематично показаны стадии формирования зоны уплотнения в контактном слое грунта.

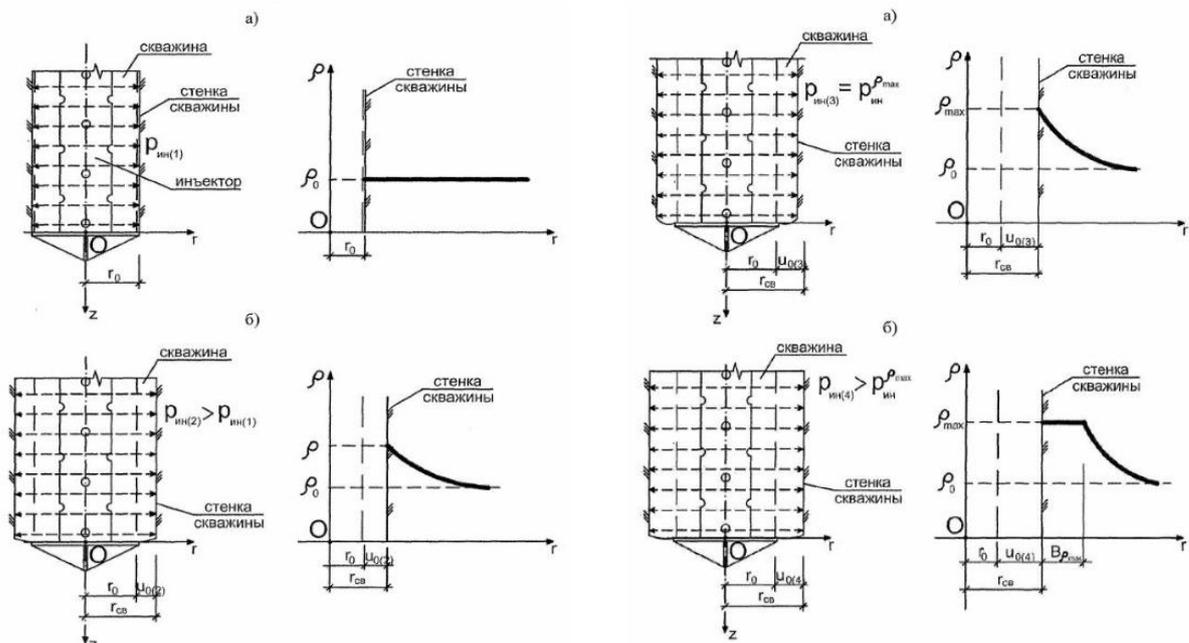


Рисунок 1.8. Стадии формирования зоны уплотнения грунта в контактном слое [140].

Шалгиновым Р.В. были получены формулы для определения плотности грунта в результате расширения стенок скважины в упругой (формула 1.4) и упругопластической

постановке (формула 1.5), для определения предельной плотности грунта контактного слоя (формула 1.6).

$$\rho(r_{ce}) = \frac{\rho_0}{(1+u_0) \cdot (1+(W+1) \cdot u_0)} \quad (1.4)$$

$$\rho(r_{ce}) = \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{1}{E_0} \cdot A \cdot p_{кр} \cdot R_0^\beta + \frac{M}{E_0} \cdot \frac{1-R_0^{1-\alpha+\beta}}{1+\alpha-\beta} + \frac{N}{E_0} \cdot \frac{1-R_0^{1+\beta}}{1+\beta}\right) \times} \times \left(1 - \frac{1}{E_0} \cdot A \cdot p_{кр} \cdot R_0^\beta + \frac{M}{E_0} \cdot \left[\frac{1-\alpha}{1+\beta-\alpha} + \frac{\beta \cdot R_0^{1-\alpha+\beta}}{1+\beta-\alpha}\right] + \frac{N}{E_0} \cdot \left(\frac{1}{1+\beta} + \frac{\beta \cdot R_0^{1+\beta}}{1+\beta}\right)\right) \quad (1.5)$$

$$\rho_{max} = \frac{\rho_s \cdot (1+0,8W_0)}{0,8W_0 \cdot \rho_s + 1} \quad (1.6)$$

где u_0 – радиальное перемещение стенок скважины; R_0 – радиус зоны пластичности; A, M, N, α, β – вспомогательные коэффициенты; остальные обозначения общепринятые.

Тарасов А.А. улучшение физико-механических характеристик грунта при устройстве буринъекционных свай предлагает учитывать путем использования повышающих коэффициентов условий работы грунта γ_{cR} и γ_{cf} [122]. В результате автором были получены значения коэффициентов γ_{cf} в пределах 1,04 – 1,5 для различных видов грунтов. Так, для суглинка при $0,75 < I_L \leq 1$ значение данного коэффициента рекомендуется принимать 1,05 д. ед., а для супеси при $I_L > 0$ – 1,25. Коэффициент условия работы по пяте сваи предложено определять по следующей зависимости:

$$\gamma_{cR} = -0,232 \ln(q_{\phi d}) + 2,6346, \quad (1.7)$$

где $q_{\phi d}$ – сопротивление грунта под нижним концом инъектора при его вдавлении, кПа.

Позже, обобщая данные многочисленных экспериментальных исследований профессором Полищуком А.И. были предложены повышающие коэффициенты, учитывающие улучшение характеристик грунта контактного слоя в результате формирования буринъекционных свай [101-103]:

$$c_{ynl} = K_c \cdot c \text{ и } \varphi_{ynl} = K_\varphi \cdot \varphi \quad (1.8)$$

Значения повышающих коэффициентов представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Значения повышающих коэффициентов K_c и K_φ [101].

	Суглинки и глины		Супеси
	$0,25 < I_L \leq 0,75$	$I_L > 0,75$	$I_L > 0$
K_c	1,02 – 1,06	1,01 – 1,03	1,04 – 1,07
K_φ	1,20 – 1,35	1,05 – 1,20	1,05 – 1,15

Комплексные исследования по изменению НДС и природных характеристик околосвайного грунта после устройства буринъекционных свай, выполняемых по методу высоконапорной инъекции [95], были проведены Богомоловым В.А. на основе анализа

многочисленных полевых и лабораторных экспериментов [44]. Было установлено, что в случае воздействия на массив грунта (суглинок тугопластичной и мягкопластичной консистенции) давлением 50 кПа влажность грунта в контактном слое уменьшается в среднем до 30%, а при уплотнении давлением 100 кПа влажность уменьшается на 20 – 25%. Экспериментально показано, что в случае воздействия более высоким давлением опрессовки (до 800 кПа) радиальные напряжения и перемещения в массиве грунта развиваются в пределах зоны $5 - 6d$. Также было предложено учитывать улучшение физико-механических характеристик глинистых грунтов путем введения повышенных коэффициентов условий работы грунта γ_{cR} и γ_{cf} , которые зависят от давления опрессовки и консистенции грунта и при $0 < I_L \leq 1,1$ изменяются в пределах 1,8 – 0,8 и 0,9–1,6 соответственно.

Самохваловым М.А. в ходе испытаний модельных и натуральных буринъекционных свай с контролируемым уширением [97] было установлено, что в суглинке тугопластичной и мягкопластичной консистенции при создании уширений вертикальные перемещения в зависимости от количества раствора, нагнетаемого в стакан-мембрану, распространяются на расстояние $0,7 - 1,3d$, а в горизонтальном направлении на расстояние $1,5d$ от стенки инъектора (d – диаметр сформировавшегося уширения) [110]. Плотность грунта в указанной области уширения увеличивается на 20-25%, а влажность понижается до 30%, модуль деформации увеличивается до 67%, в то время как вдоль ствола буринъекционных свай изменение указанных характеристик составляет 14 – 21%, 34% и 22 – 35%.

На кафедре «Строительное производство» Тюменского индустриального университета также были выполнены крупномасштабные испытания буринъекционных свай по технологии с контролируемым уширением [98] с последующей их экскавацией и изучением свойств грунтового основания. В пределах зоны отбора образцов основание представлено суглинком мягкопластичным. Давление опрессовки буринъекционных свай составило 90 – 350 кПа. После откопки опытных свай зафиксировано увеличение первоначального диаметра в 2,5 – 3,0 раза. По результатам исследований установлено, что плотность грунта увеличилась в пределах 3 – 6%, влажность грунта снизилась на 25%, также произошло уменьшение коэффициента пористости грунта до 30%. Опрессовка свай способствовала увеличению модуля деформации грунта практически в 2,5 раза, также вдвое увеличилось удельное сцепление грунта уплотненной зоны и произошло увеличение угла внутреннего трения на 5%.

Существенный вклад в изучение инъекционной технологии формирования свай и анкеров, а также процессы, происходящие в грунте при их устройстве, внесли белорусские исследователи: Соболевский Ю.А., Соболевский Д.Ю., Никитенко М.И., Раюк В.Ф.,

Мишаков В.А., Мохаммад Х.М., Дегиль Г.О., Клейнер И.М., Попова О.В. и др. [22, 62, 53, 87, 89]. Мохаммадом Х.М. в результате экспериментов в приборе вращательного сдвига было установлено, что при инъекционном расширении скважины свободная поровая вода отжимается из уплотненной зоны и происходит практически линейное изменение влажности околосвайного грунта по мере удаления от границ скважины на расстояние до 4-5 радиусов. Плотность же грунта приобретает максимальное значение в пределах расстояния 0,2 – 0,3 радиуса от границы скважины, после чего происходит уменьшение плотности в пределах зоны шириной до 2 радиусов до первоначальной величины. В целом уплотненная зона развивается на расстояние 4 – 5 радиусов. Мишаковым В.А. и Раюком В.Ф. было доказано, что на величину расширения стенок скважины влияет не столько давление инъекции, сколько объем закаченного раствора. Опыты Никитенко М.И. и Соболевского Ю.А. показали, что улучшение прочностных и деформационных свойств грунтов при инъекционном формировании стволов свай и анкеров характерно в большей степени для рыхлых песчаных грунтов и более увлажненных глинистых грунтов. Никитенко М.И. было установлено, что кривизна контактной поверхности «свая-грунт» и диаметр цементного тела не влияет на величину предельного сопротивления сдвигу, но изменяет предельные перемещения. Также были получены зависимости предельных контактных сопротивлений сдвигу для различных видов грунтов в зависимости от коэффициента пористости и влажности грунта и установлено, что при инъекционной опрессовке предельные сопротивления грунта сдвигу возрастают в 3 – 5 раз по сравнению с буровыми и набивными сваями. Клейнером И.М. выполнялись исследования по изучению режима опрессовки на несущую способность свай и сопротивление грунта контактной зоны сдвигу в песчаных и глинистых грунтах. Так, было установлено, что ступенчатый режим опрессовки давлением 200-300 кПа с выдержкой 5 – 10 мин. позволяет повысить несущую способность буроинъекционных свай в 2,4 – 2,6 раз по сравнению со сваями без опрессовки, также увеличивается предельное сопротивление грунта сдвигу до 1,3 раз для песчаных грунтов и до 1,6 раз для глинистых грунтов. Позже, научные достижения указанных авторов использовались при составлении нормативных документов Республики Беларусь по проектированию фундаментов из буроинъекционных свай.

Первые же опыты устройства и испытаний буроинъекционных свай позволили многим исследователям (*Xanthakos* [36], *Ostermayer* [23], *Barley* [3] и др.) сделать вывод, что сопротивление грунта сдвигу по контакту «свая-грунт» существенно увеличивается после опрессовки. *Ostermayer* [23] установил, что трение по боковой поверхности буроинъекционных свай в глинах мягкопластичной-текучей консистенции может быть увеличено с 120 кПа до 300 кПа после воздействия избыточным давлением опрессовки. Им

были получены одни из первых экспериментальных зависимостей трения грунта по боковой поверхности свай от величины давления опрессовки (рис. 1.9а).

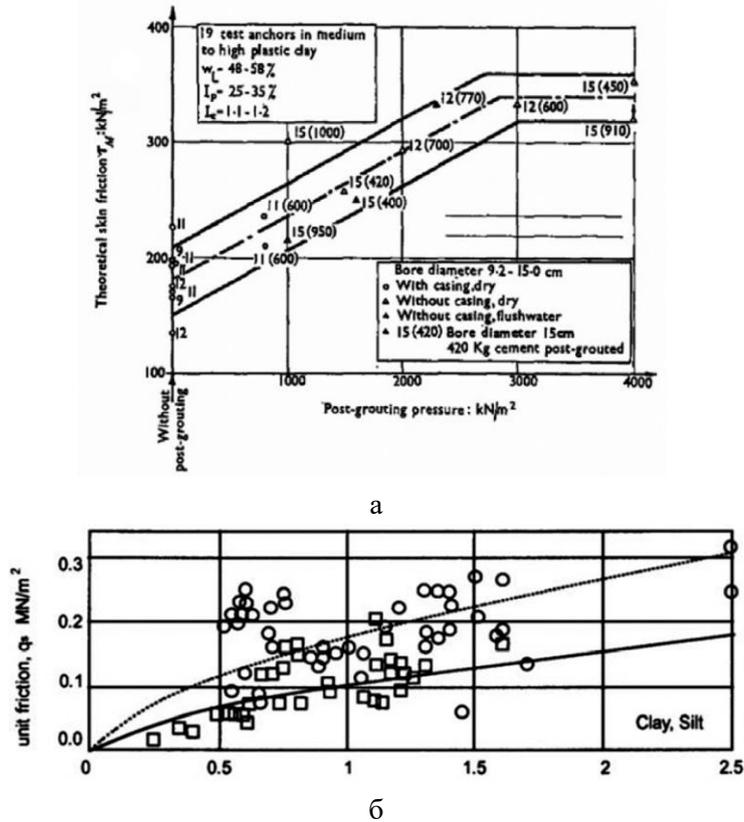


Рисунок 1.9. Графики изменения трения по боковой поверхности БИС от давления опрессовки: *а* – исследования *Ostermayer* [23]; *б* – исследования *Bustamante* и др [6].

Аналогичные исследования были выполнены французскими авторами *Bustamante*, *Doix* и др. [6] в глинах, в результате которых была установлена корреляционная зависимость между давлением опрессовки (МПа) и боковым трением по боковой поверхности буроинъекционных свай (рис. 1.9б). Также была получена зависимость между объемом закаченного раствора, диаметром инъекционного тела и предельной нагрузкой для условий переуплотненных пластичных глин [5].

Jones, Spencer [14] в ходе испытаний буроинъекционных свай, изготовленных по технологии *GEWI*, установили, что инъекционная опрессовка стенок скважины позволяет существенно повысить сопротивление грунта по боковой поверхности и тем самым увеличить несущую способность. Позже, *Misove* [20] на основе данных экспериментов были получены значения повышающих коэффициентов 1,2 – 2,1 в зависимости от глубины устройства свай и вида грунта.

Большая работа по изучению буроинъекционных свай, их составных элементов, взаимодействию свай с грунтом и особенностям их расчета была проделана американскими исследователями [34]. Значимым результатом такой работы стала систематизация предельных сопротивлений грунта сдвигу по боковой поверхности буроинъекционных свай в зависимости от вида грунта и особенности их устройства в соответствии с

классификацией, представленной в таблице 1.1 настоящей работы. Сопротивления сдвигу характерных для юга Тюменской области грунтов при устройстве буроинъекционных свай в соответствии с [34] представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Сопротивления грунта сдвигу по контактной поверхности буроинъекционных свай [34].

Вид грунта	Пределы сопротивления сдвигу по боковой поверхности буроинъекционных свай, кПа			
	Тип А*	Тип В*	Тип С*	Тип D*
Суглинок и глина (некоторые виды песка) мягко-текучепластичной консистенции	35-70	35-95	50-120	50-145
Суглинок и глина (некоторые виды песка) тугопластичной, полутвердой и твердой консистенции	50-120	70-190	95-190	95-190
Песок мелкий рыхлый и средней плотности	70-145	70-190	95-190	95- 240
Песок мелкий плотный	95-215	120-360	145-360	145-385

* - классификация свай по типам приведена в таблице 1.1.

Аналогичная работа по исследованию взаимодействия буроинъекционных свай с окружающим массивом грунта после инъекционной опрессовки давлением до 6 МПа была проделана немецкими учеными и специалистами фирмы *Ischebek* [13, 16]. Было рекомендовано учитывать диаметр ствола сваи после опрессовки путем умножения начального диаметра скважины на коэффициент 1,0 – 2,0, зависящий от вида грунта. Также были получены осредненные и рекомендуемые к расчету повышенные значения сопротивления грунта сдвигу по контактной поверхности буроинъекционных свай, представленные в таблице 1.4. Указанные зависимости были использованы при составлении соответствующих нормативных документов [7].

Таблица 1.4. Сопротивления грунта сдвигу по контактной поверхности буроинъекционных свай [7].

Вид грунта	Пределы сопротивления сдвигу по боковой поверхности буроинъекционных свай, кПа
Песчаные и крупнообломочные грунты	200
Связные грунты	150
Песчаник, алевроит	100

Как видно, данные таблиц 1.3 и 1.4 коррелируются между собой и существенно превосходят значения, рекомендуемые к расчету в соответствии с СП 24.13330.

Однако, исследования различных авторов последних лет показывают, что в связи с появлением новых буроинъекционных технологий устройства свай и совершенствованием существующих, даже передовые зарубежные прогрессивные нормы не позволяют в полной мере оценить специфику взаимодействия свай с грунтом и определить их трение по боковой поверхности. Так, *El Naggat u Abd Elaziz* [8] отмечают, что рассчитанное значение сопротивления грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай, выполненных по

технологии с теряемым полым сердечником, полученное в результате полевых испытаний, превышает значения, рекомендуемые американскими и немецкими нормами в 1,2-1,5 раза.

Gomez and etc. [11] проанализировали результаты 260 испытаний буроинъекционных свай, выполненных по технологии *Titan* в водонасыщенном песке и плотной глине, при усилении фундаментов двух мостов в США. Все сваи восприняли нагрузку, превышающую расчетную на 150%, при минимальной осадке, а доведение свай до срыва показало, что их несущая способность примерно в 2,5 раза превышает расчетную. *Telford* [32] приводит данные испытаний 10 метровых свай *Titan* первоначальным диаметром 115 мм, выполненных в песчаных и гравелистых грунтах, и отмечает, что фактические значения трения грунта по боковой поверхности свай хорошо соответствуют расчетным табличным значениям лишь при увеличении первоначального диаметра сваи в 1,5 – 2,5 раза по сравнению с диаметром бурового долота.

Таким образом, следует отметить, что на сегодняшний день как в отечественных, так и в зарубежных источниках не существует универсального способа оценки характера изменения характеристик околосвайного массива грунта, который позволил бы достоверно определять силы трения грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай. Очевидно, что существующие методы оценки и прогнозирования данной величины напрямую зависят от технологии выполнения и инженерно-геологических условий, поэтому для корректного расчета необходимо уточнение или выявление указанных зависимостей для каждой конкретной технологии с обязательной привязкой к геологическому строению. Также нельзя недоучитывать несущую способность таких свай по пяте, так как в результате опрессовки пята сваи может воспринимать до 50% нагрузки.

1.3. Подходы к расчету буроинъекционных свай

На сегодняшний день известен ряд методик, разработанных отечественными и зарубежными авторами для определения несущей способности буроинъекционных свай по грунту основания. В таблице 1.5 представлена систематизированная информация по указанным методикам. Также в таблице 1.5 частично представлены методы определения несущей способности буроинъекционных анкеров, так как данные подходы вполне обосновано могут применяться для определения сопротивления грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай при действии статической нагрузки.

Таблица 1.5. Методы определения несущей способности буронагнеточных свай.

№ п/п	Метод расчета	Сущность метода	Примечание
1	п. 7.2.3 СП 24.13330	$F_d = \gamma_c \cdot (\gamma_{cR} RA + u \sum \gamma_{cf_i} h_i)$	Обозначения в формуле общеприняты. Значения R и f_i принимаются по табличным данным как для буровых свай. Значения коэффициентов условий работы и геометрические параметры не учитывают действительного характера работы БИС.
2	п. 7.3.12 СП 24.13330.	$F_{du} = RA + u \sum \gamma_{cf_i} h_i$	Обозначения в формуле общеприняты. Значения R и f_i принимаются по табличным данным в зависимости от сопротивления конуса зонда q_c , сопротивление грунта по боковой поверхности не учитывается. Значение коэффициента условия работы и геометрические параметры не учитывают действительного характера работы БИС.
3	п. Л.2 СП 381.1325800	$R_{a,k} = \pi D_k l_k (1 + \sin \varphi_I) (\sigma_{0g} \tan \varphi_I + c_I) K_p \gamma_c$	$R_{a,k}$ – предельное сопротивление анкера по боковой поверхности; σ_{0g} - усредненное по боковой поверхности анкера природное напряжение грунта; K_p - коэффициент, зависящий от отношения диаметра скважины к диаметру анкера, природного напряжения, прочностных и деформационных характеристик грунта. Не учитывается давление опрессовки, а также используются средневзвешенные физико-механические характеристики грунтов основания. Значение коэффициента условия работы не учитывает действительного характера работы.
4	п. Л.4 СП 381.1325800	$R_{a,k} = \pi D_k l_k q_{s,k}$ $D_k = d_{св} \cdot K_d$	q_{sk} – повышенное сопротивление грунта по боковой поверхности цементного тела анкера. Методика разработана для расчета самозабуриваемых грунтовых анкеров с теряемой буровой штангой (микросвай). Не учитывается давление обжата грунта и давление опрессовки.

5	п. Л.3 СП 381.1325800	$R_{a,k} = km_p \pi D_k l_k p_b \tan \varphi_I$	<p>m_p - коэффициент, учитывающий напряженное состояние окружающего корень анкера грунта в зависимости от давления инъецирования, принимаемый для песчаных грунтов равным 0,50, для пылевато-глинистых - 0,4-0,2;</p> <p>p_b - избыточное давление в корне анкера при опрессовке.</p> <p>Методика разработана для расчета инъекционных грунтовых анкеров с учетом давления инъецирования, однако, при больших значениях избыточного давления опрессовки дает завышенные результаты. Не учитывает давления обжатия грунтом.</p>
6	Методика ЦНИИС МинТрансСтроя	$F_d = m \pi D_k l_k \left(\gamma h_k \left[\left(\frac{1+\chi}{2} + \frac{1-\chi}{2} \cos 2\alpha \right) \tan \varphi + \frac{1-\chi}{2} \sin 2\alpha \right] + c \right)$ $\chi = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$ $D_k = d_{св} + 2 \cdot 10 \text{ мм}$	<p>m – коэффициент неоднородности (0,8);</p> <p>χ – коэффициент бокового давления грунта.</p> <p>Методика не позволяет в полной мере учесть изменение диаметра инъекционного тела.</p>
7	Конюшков В.В [65]	$F_d = k \cdot \gamma_c \cdot \left(\gamma_{сР} R A + u \sum \gamma_{сf} f_i h_i \right)$	<p>k – повышающий эмпирический коэффициент, учитывающий технологию устройства буроинъекционных свай:</p> <ul style="list-style-type: none"> • для свай Titan $k=2,0-2,1$; • для свай, выполненных при помощи проходного шнека $k=1,4-1,5$; • для свай, выполненных под защитой обсадных труб $k=1,5-1,6$ и т.д.
8	Шалунц К.Ш. [139]	$F_d = \gamma_c \cdot \left(\gamma_{сР} R A + \sum \gamma_{сf} \pi d_i c_i \operatorname{tg} \varphi_i h_i \right)$	<p>Учитываются боковое давление грунта на ствол сваи и фактические геометрические характеристики сваи для каждого слоя грунта.</p>

9	Полищук А.И. [101]	$N = N_R + N_f$ $N_f = \pi d_0 L \tau_{max}$ $\tau_{max} = (\sigma_0 + \sigma_{ocm}) \operatorname{tg}(\varphi K_\varphi) + c K_c$	<p>σ_0 – боковое напряжение грунта; σ_{ocm} – остаточное напряжение в грунте; K_φ и K_c – коэффициенты, учитывающие уплотнение грунта в околосвайной зоне БИС. Методика позволяет учитывать улучшение прочностных характеристик грунта контактной зоны после воздействия избыточным давлением и изменение напряженного состояния, однако, не учитывает реальные геометрические характеристики сечения сваи. В расчете также принимаются осредненные характеристики по длине сваи.</p>
10	Петухов А.А. [99]	$F_d = \gamma_c \cdot \left(\gamma_{cR} R A + \sum u_i \gamma_{cf} f_i h_i \right)$ $u_i = \pi d_i$ $d_i = 2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta V_{Ei}}{\pi z_i} + r_0^2}$	<p>$\gamma_{cf} = 1, 2$ – повышенный коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности сваи; d_i – фактический диаметр буроинъекционной сваи, определяемый в зависимости от объема закаченной инъекционной смеси ΔV_E и перемещений стенки скважины по длине сваи. Перемещения стенки скважины определяются на основании решения задачи о формировании цилиндрической полости в упрочняющейся разномодульной грунтовой среде (УРС) в соответствии с работами Лушников В.В., Богомолова В.А. [38,68]. Предложенный метод согласуется с нормативным методом определения несущей способности БИС. Учитывается фактический характер работы БИС по боковой поверхности. Методика учитывает увеличение первоначального диаметра скважины в результате ее инъекционной опрессовки.</p>
11	Abd Elaziz and El Nagggar [8]	$P_G = (0,9-1) S_u \pi d L (1 + 0,35 V_{inc}) + 9 S_{ub} A_{hole}$ $V_{inc} = \frac{V_{grou} - V_{hole}}{V_{hole}}$	<p>V_{inc} – избыточное количество закаченного в скважину раствора; S_u – сопротивление недренированному сдвигу грунта, определяемое по результатам статического зондирования; S_{ub} – расчетное сопротивление грунта под пятой сваи, определяемое по результатам статического зондирования. Методика учитывает увеличение первоначального диаметра скважины в результате ее опрессовки, а также учитывает вклад в несущую способность БИС ее острия.</p>

12	APP. D1 DIN 1054:2005-01 (Германия) [7]	$R_{sl,k} = \sum_i q_{sl,ki} \cdot A_{si}$	<p>A_{si} – фактический размер ствола сваи (диаметр и длина) в рассматриваемом слое грунта;</p> <p>$q_{sl,ki}$ - сопротивление грунта по боковой поверхности сваи в зависимости от вида грунта (табличные данные).</p> <p>Методика не учитывает сопротивление по острию буроинъекционной сваи. Не даны пояснения по определению параметра A_{si}. Отсутствует привязка сопротивления грунта $q_{sl,ki}$ к глубине залегания слоя грунта и давления инъекции, при которой осуществлялась опрессовка сваи. Требуется обязательное проведение статических испытаний.</p>
13	EA-Pfähle (Германия) [9]	$R_k = \sum_i q_{1,ki} \cdot A_{si}$ $A_{si} = \pi(d+a)L_{b,i}$	<p>$q_{sl,ki}$ - сопротивление грунта по боковой поверхности сваи в зависимости от вида грунта, определяемое по результатам статического зондирования в зависимости от сопротивление недренированному сдвигу;</p> <p>d – диаметр буровой коронки;</p> <p>a – параметр, учитывающий увеличение первоначального диаметра скважины. Равен 20 мм.</p> <p>Методика не учитывает сопротивление по острию буроинъекционной сваи. Не в полной мере учитывается изменение первоначального диаметра сваи. Отсутствует привязка сопротивления грунта $q_{sl,ki}$ к глубине и величине давления инъекции, при которой осуществлялась опрессовка сваи. Требуется обязательное проведение статических испытаний.</p>
14	FHWA-NHI-2005 (США) [34]	$P_G = \alpha_{bond} \pi D_b L_b$	<p>α_{bond} - сопротивление грунта по боковой поверхности сваи (табличные данные);</p> <p>D_b – диаметр бурового долота.</p> <p>Методика не учитывает сопротивление сваи по острию буроинъекционной сваи. Отсутствует привязка сопротивления грунта α_{bond} к глубине залегания слоя грунта и давления инъекции, при которой осуществлялась опрессовка сваи. Не учитывается изменение диаметра сваи в результате опрессовки. Требуется обязательное проведение статических испытаний.</p>

15	Lei Wen, Gangqiang Kong и др.[17]	$R = \sum_i \alpha c_u \cdot A_{si}$ $\alpha = \begin{cases} 1 - \frac{c_u - 25}{90} & 25 \text{кПа} < c_u < 70 \text{кПа} \\ 1,0 & c_u \leq 25 \text{кПа} \\ 0,5 & c_u \geq 70 \text{кПа} \end{cases}$	<p>c_u – сопротивление недренному сдвигу грунта, определяемое по результатам статического зондирования;</p> <p>A_{si} – фактический размер ствола сваи (диаметр и длина) в рассматриваемом слое грунта.</p> <p>Методика не учитывает сопротивление по острию буроинъекционной сваи. Отсутствует привязка к глубине залегания слоя грунта и давления инъекции, при которой осуществлялась опрессовка сваи.</p>
16	Fondedile [115]	$N = \pi d L k J$	<p>k – коэффициент, который учитывает взаимодействие сваи с грунтом;</p> <p>J – коэффициент формы, учитывающий начальный диаметр сваи.</p> <p>Методика дает лишь приблизительное значение несущей способности БИС, основанное на результатах многочисленных статических испытаний, и используется для предварительных расчетов. Всегда выполняются опытные испытания свай.</p>

Заслуживает внимания метод определения несущей способности буроинъекционных свай, основанный на принципе приближенного моделирования, предложенный Никитенко Н.И. [89]. Суть метода заключается в том, что испытываются не сами сваи, а их маломасштабные аналоги. Причем, аналоги выполняются по технологии, соответствующей той, которая применяется в полевых условиях, а характеристики грунтовой пасты соответствуют натурным условиям. Дополнительной особенностью принципа приближенного моделирования является обработка результатов испытаний в безразмерных величинах: нагрузка на каждой ступени определяется соотношением P_i/P_{lim} , а соответствующая ей величина деформации S_i/S_{lim} (рис. 1.10). Данный метод позволяет сократить время, трудовые и финансовые ресурсы на проведение испытаний свай и позволяет уменьшить число свай, подлежащих контрольным испытаниям.

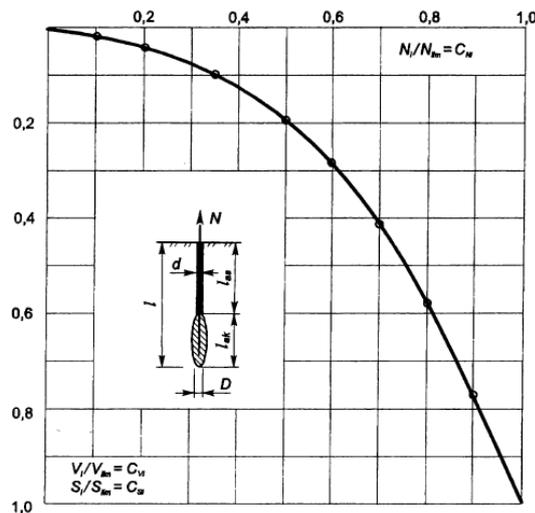


Рисунок 1.10. Графики работы БИС при испытаниях по методу приближенного моделирования [89].

В связи с тем, что длина буроинъекционных свай может достигать 30 м и более [29], то следует учитывать возможную потерю их устойчивости. Традиционно сложилось два подхода по определению устойчивости свай в грунтовой среде. Первый подход основан на том, что даже в довольно слабом слое грунта возникает отпор, который значительно увеличивает критическую силу, способную вызвать потерю устойчивости свай, и эта сила значительно превосходит несущую способность по материалу [33, 37, 40, 133, 134] и, как следствие, изгиб в сваях развиваться не может. Второй подход основан на пренебрежении отпором грунта в запас прочности и на допущении продольного изгиба ствола сваи, который учитывается путем введения коэффициента продольного изгиба [60, 105, 107]. Практически всегда возможная потеря устойчивости буроинъекционных свай рассчитывается по гибкой схеме по причине большого отношения длины к диаметру сваи.

Суть методов определения устойчивости буроинъекционных свай в грунте сводится к определению критической Эйлеровой силы, превышение которой вызовет искривление продольной оси. Для условий устройства свай в толще слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов следует отметить исследования, проведенные Улицким В.М. и Шашкиным А.Г. [33, 133, 134]. На основании сравнения критической Эйлеровой силы с предельной допускаемой нагрузкой на сваю, было установлено, что запас по устойчивости составляет до 10 раз. Также авторами было дополнительно проведено исследование устойчивости буроинъекционных свай с учетом их геометрического несовершенства, возникающего в результате деформирования при приложении внешней нагрузки и на этапе производства работ (например, отклонение от вертикальности бурения скважины). Результаты показали, что даже с учетом начального геометрического несовершенства ствола свай потеря их устойчивости маловероятна.

Аналогичные результаты были получены Мельниковым Р.В., который экспериментальным образом установил начальное отклонение ствола сваи от вертикальности. Инклинометрическим методом было исследовано 10 скважин по 25 метров и выявлено, что отклонение забоя скважин от устья в среднем составляет до 2 метров, что эквивалентно наклону скважины на угол до 5°. Автором в ходе численного моделирования строго вертикальной сваи и буроинъекционной сваи с начальным уклоном скважины было установлено, что форма ствола сваи совершенно не сказывается на ее работе в грунте как на вдавливающую, так и на выдергивающую нагрузки [84].

Прыгуновым М.А. была предложена инженерная методика, в соответствии с которой определение критической силы производится по следующей формуле [105]:

$$N_{lim} = mn2\sqrt{KdB} \quad (1.9)$$

где m и n – коэффициенты, учитывающие длину сваи и способ ее заделки в ростверк, а также трение, возникающее по боковой поверхности сваи; K – коэффициент отпора грунта, кН/м^4 ; d – диаметр сваи, м; B – изгибная жесткость сваи, $\text{кПа}\cdot\text{м}^4$.

Также Прыгуновым М.А. установлено, что потеря устойчивости стволом сваи может возникнуть только в грунтах, для которых коэффициент отпора $K < 1500 \text{ кН/м}^4$.

Можно сделать вывод, что вероятность потери устойчивости ствола буроинъекционных свай в грунте крайне мала и не требует дополнительных мероприятий по ее предотвращению. Однако, следует отметить, что наклон буроинъекционных свай от 5° до 25° вызывает повышение поперечного усилия и изгибающего момента до 80%, в связи с чем разрушение сваи может произойти по материалу, поэтому зону устья сваи до глубины 3 метров необходимо дополнительно армировать [65]. Таким образом, при устройстве буроинъекционных свай угол наклона от вертикали не должен превышать 10-15° с обязательным армированием верхней зоны сваи.

1.4. Выводы по главе I

На основании проведенного анализа существующих технологий устройства буринъекционных свай, их особенностей, опыта применения, а также подходов к проектированию установлено следующее:

1. На сегодняшний день существует большое разнообразие буринъекционных технологий устройства свай и, несмотря на более чем полувековую историю их использования в фундаментах, данное направление продолжает постоянно совершенствоваться и развиваться, что способствует появлению новых способов устройства буринъекционных свай, зачастую разрабатываемых под конкретные инженерно-геологические условия. Тем не менее, при устройстве буринъекционных свай можно выделить две основные технологические операции: бурение скважины требуемой длины и ее заполнение формовочным раствором, как правило, под избыточным давлением опрессовки.

2. Важной составляющей устройства буринъекционных свай является контроль их качества: сплошности сечения, обеспечения требуемого диаметра сваи по всей длине и полного заполнения скважины формовочным (рабочим) раствором. Общий для всех технологий контроль включает регулирование скорости бурения (погружения буровых штанг в грунт), измерение удельного веса формовочного раствора, нагнетаемого в скважину, и отбор с последующим испытанием контрольных образцов раствора. Однако, при бурении скважины бывает довольно сложно оценить момент, когда промывочный раствор будет полностью вытеснен и скважина станет заполнена формовочным (рабочим) раствором. В противном случае часть ствола сваи может содержать обильное включение бурового шлама.

3. При проектировании свай буринъекционных свай традиционным считается подход, который не учитывает вклад острия в общую несущую способность. Однако, в последнее время многими исследователями отмечается, что нельзя недоучитывать несущую способность по пяте таких свай, так как в ряде случаев она может достигать 50%. В противном случае можно не до конца использовать резервы несущей способности, что в конечном итоге приведет к удорожанию проекта в целом.

4. Существующие расчетные методы определения несущей способности буринъекционных свай, как правило, разработаны для конкретной технологии устройства и учитывают ее специфические особенности. Большинство расчетных методов используют табличные данные сопротивления грунта по боковой поверхности, полученные на основе обработки статических испытаний. В большинстве случаев используемые значения не

учитывают глубину залегания слоя и избыточного давления опрессовки, под которым выполнялось формирование ствола свай. После устройства буроинъекционных свай требуется проведение статических испытаний.

5. Вероятность потери устойчивости ствола длинных буроинъекционных свай в грунте крайне мала и расчетом может не учитываться. Оптимальным углом наклона буроинъекционных свай от вертикали является угол в пределах 10-15°, при этом необходимо дополнительно армировать верхнюю зону устья на глубину 12-15d.

В результате обзора литературы и научно-технической документации выбранного направления исследования сформулированы следующие актуальные задачи:

1. Совершенствование технологии изготовления и конструктивного решения буроинъекционных свай малого диаметра, выполняемых в условиях распространения большой толщи слабых пылевато-глинистых грунтов;

2. Выявление зависимостей изменения физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния пылевато-глинистых грунтов при устройстве буроинъекционных свай, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки и без него;

3. Установление характера изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой буроинъекционных свай в зависимости от технологических и геометрических параметров их устройства, а также от физических характеристик грунта контактного слоя;

4. Разработка усовершенствованных методик определения несущей способности и осадки буроинъекционных свай, выполняемых с избыточным давлением опрессовки, с учетом экспериментально выявленных закономерностей изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой свай, а также его физико-механических характеристик, в зависимости от технологических параметров их устройства.

ГЛАВА II

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ С ОСНОВАНИЕМ

2.1. Цель и задачи лабораторных исследований

Целью проведения лабораторных исследований являлось выявление и уточнение характера и особенностей взаимодействия фрагментов буроинъекционных свай с глинистым основанием в результате воздействия избыточным давлением опрессовки.

Для выполнения поставленной цели эксперимента решались следующие задачи:

1. Определение напряженно – деформированного состояния околосвайного грунта, возникающего при опрессовке скважины избыточным давлением раствора, посредством регистрации напряжений и перемещений, возникающих в грунте в момент устройства сваи и в процессе релаксации напряжений;

2. Определение параметров расширения скважины в процессе устройства фрагментов буроинъекционных свай в зависимости от технологических параметров (величины избыточного давления опрессовки, объема закачиваемого раствора, глубины расположения участка ствола сваи) путем установки глубинных марок, а также измерения геометрических размеров фрагментов свай после их испытания и извлечения;

3. Определение характера изменения физико-механических свойств грунта в пределах зоны изменения напряженно-деформированного состояния;

4. Определение величины фактического сопротивления грунта сдвигу по боковой поверхности в зависимости от вида грунта, величины действующего избыточного давления опрессовки и глубины расположения рассматриваемого сечения сваи в результате испытания фрагментов свай статической вдавливающей нагрузкой.

2.2. Оборудование и приборы

Для оценки влияния на исследуемые параметры эффекта расширения скважины без проникновения инъекционного раствора в контактный слой грунта фрагменты буроинъекционных свай диаметром 0,2 м и высотой $\approx 1,0$ м выполнялись герметичными из эластичной мембраны ЭПДМ Эластосил толщиной $t=0,8$ мм. Для однозначного придания фрагменту сваи цилиндрической формы по торцам оболочка из эластичной мембраны крепилась к деревянным дискам, которые и формировали начальный диаметр сваи. В верхнем деревянном диске предусматривались отверстия для установки шарового крана, через который осуществилось нагнетание раствора, и манометра, по которому регулировалось создание в скважине избыточного давления. Для обеспечения работы манометра предусматривался масляной средоразделитель. Дополнительно оболочка из мембраны крепилась к деревянным дискам силовыми хомутами. Общий вид готового

фрагмента буроинъекционной сваи в процессе изготовления и при пневматических испытаниях представлен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1. Общий вид фрагмента буроинъекционной сваи.

Нагнетание раствора с созданием избыточного давления опрессовки осуществлялось шнековым электрическим насосом БМП 6.

Укладка грунтовой пасты требуемой консистенции и испытание фрагмента буроинъекционных свай выполнялась в экспериментальном лотке размерами 1,2х1,2х1,0 м, общий вид которого представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2. Общий вид экспериментального лотка.

Экспериментальный лоток состоял из двух симметричных частей размерами 1,2х0,6х1,0 м, которые устанавливались на колеса и стыковались между собой посредством болтового соединения. Лоток был выполнен из листов бакелизированной фанеры толщиной 10 мм, которые устанавливались в стальной каркас из прямоугольных труб сечением 40х20х2 мм. В собранном виде лоток дополнительно усиливался обвязкой из стальных прямоугольных труб сечением 60х40х2 мм. В дне лотка предусматривалось отверстие

диаметром 0,3 м. Для предотвращения высыхания грунтовой пасты в процессе проведения эксперимента внутренняя поверхность лотка была обтянута слоем полиэтиленовой пленки и дорнита.

Измерение радиальных напряжений в грунтовом массиве при устройстве свай выполнялось посредством мессдоз, принцип действия которых и особенности их устройства представлены в трудах ряда отечественных авторов [42, 46, 47, 88]. Корпус мессдоз диаметром 34 мм и общей толщиной 5 мм выполнялся из титана марки ВТ1-0 и состоит из двух частей (с рабочей и нерабочей мембраной), которые соединялись между собой посредством пазового соединения и дополнительно по контуру стыка проливались эпоксидным клеем для обеспечения водонепроницаемости соединения (рис. 2.3а). Толщина рабочей мембраны составляла 0,4 мм, 0,6 мм и 0,8 мм и назначалась в зависимости от удаленности от ствола фрагмента сваи и ожидаемой величины давления опрессовки.

Для фиксации возникающих деформаций растяжения/сжатия на поверхности рабочей мембраны в конструкции мессдоз использовались рабочие и компенсационные одиночные фольговые тензорезисторы 2ФКП-10-200-А-12-С согласно ТУ 26.51.66-006-16695547-2016. Рабочий тензорезистор приклеивался на внутреннюю поверхность рабочей мембраны, компенсационный – на отдельную титановую пластинку, также помещаемую внутрь корпуса мессдозы. Компенсационный датчик позволял исключить влияние температурной деформации в процессе проведения эксперимента (рис. 2.3б).

Для выявления зависимости преобразования значения деформации растяжения/сжатия рабочего тензорезистора в значение напряжения и для проверки работоспособности мессдоз выполнялась их пневматическая тарировка в барокамере. Посредством нагнетания в барокамеру воздуха в ней ступенями по 10 кПа создавалось избыточное давление до величины 250 кПа, которое контролировалось манометром. Тарировка мессдоз выполнялась по ветви нагружения и аналогичной ветви разгрузки до момента выбора всех пластических деформаций и выхода на линейную зависимость «величина давления-показание» (рис. 2.3в), которая для каждой мессдозы являлась индивидуальной. Мессдозы, дающие погрешность измерения больше 10% от линейной зависимости, выбраковывались и пересобирались. Преобразование электрического сигнала с тензорезисторов в цифровой сигнал выполнялось при помощи высокочувствительной тензометрической аппаратуры *Compact RIO by National Instruments*, а их дальнейшее преобразование в единицы напряжения осуществлялось по полученным тарировочным зависимостям, которые предварительно подгружались в информационную систему *TENZO*.

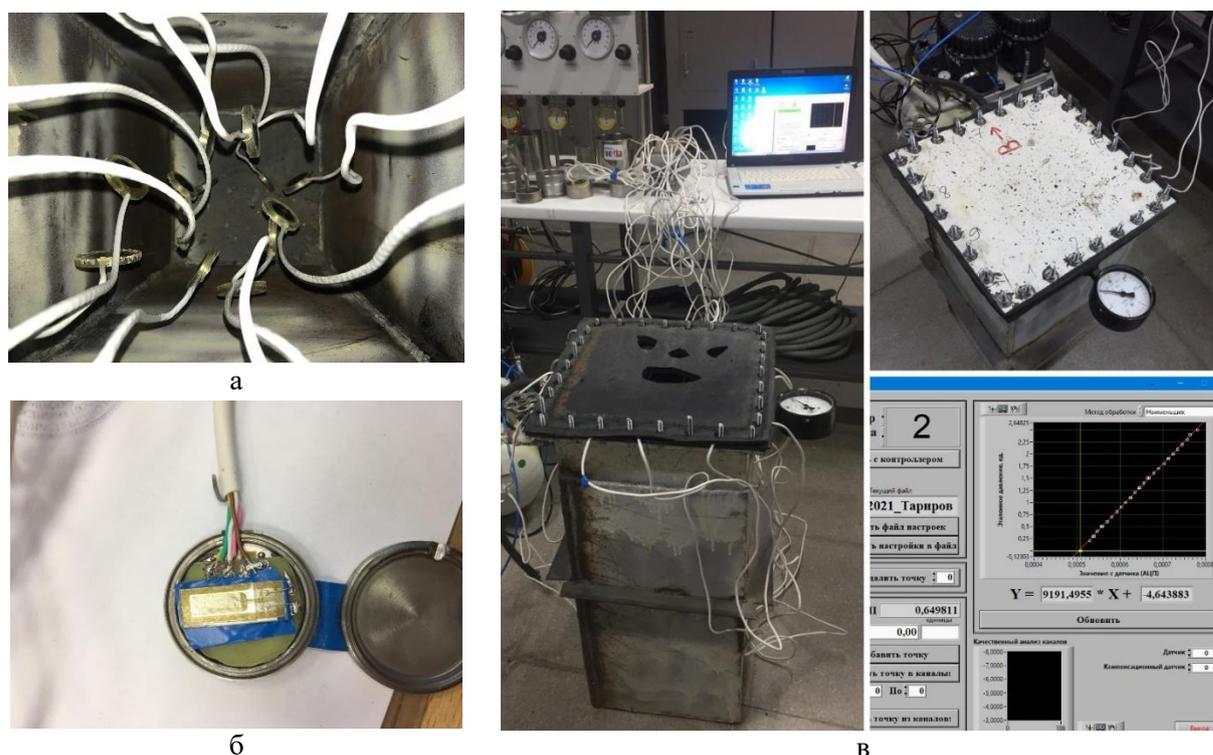


Рисунок 2.3. Датчики измерения напряжений в грунте (мессдозы):
а – общий вид мессдоз $d=34$ мм; б – внутреннее устройство мессдозы; в – процесс тарировки мессдоз.

Горизонтальные перемещения грунта измерялись при помощи горизонтальных марок перемещений, конструкция которых представлена на рисунке 2.4. Марки перемещений представляют собой алюминиевую трубочку $d=5$ мм, в которую свободно входит стальной прут $d=2,5$ мм и длиной 150 мм. Стальной прут на противоположном конце имеет жестко закрепленную плоскую квадратную пластину с длиной ребра $l=25$ мм. Для исключения трения прута по алюминиевой трубочке он обильно покрывался слоем технического вазелина. К стальному пруту крепилась струна, другой конец которой выходил из алюминиевой трубочки и крепился к датчику перемещений ИЧ.

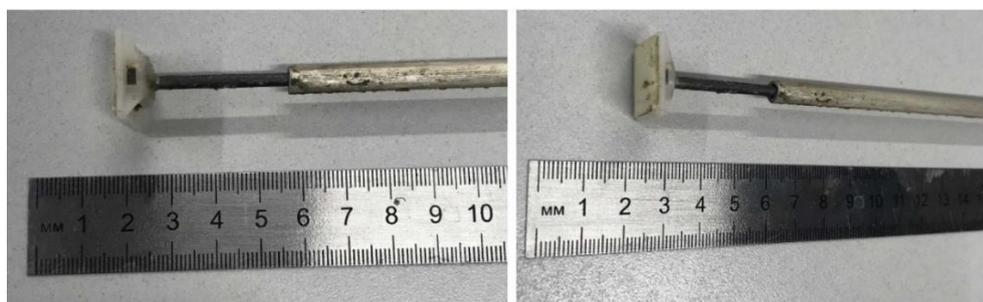


Рисунок 2.4. Марки горизонтальных перемещений.

Пригруз поверхности лотка для создания давления, соответствующего определенной глубине расположения слоя грунта, выполнялся с помощью гидравлического домкрата марки ДГА100П100, укомплектованного ручной масляной станцией НРГ-7035 и манометром. Нагрузка от домкрата посредством распределительной системы из

деревянных брусьев и листов фанеры равномерно передавалась на поверхность грунта. Реактивное усилие от домкрата воспринималось стальной двутавровой балкой №30 длиной 2,5 м. По краям двутавр посредством швеллеров №12 обвязывался с резьбовыми шпильками диаметром 20 мм, которые нижним концом замоноличивались в бетонный пол. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 2.8а.

Испытание фрагментов свай статической вдавливающей нагрузкой выполнялось при помощи гидравлического домкрата БелАК грузоподъемностью 4 т. Домкрат устанавливался непосредственно на верхнюю торцевую часть фрагмента сваи, а реактивное усилие воспринималось упорной балкой, состоящей из системы стальных прямоугольных труб сечением 60x40x2 мм, которые посредством болтов крепились к экспериментальному лотку (рис. 2.10).

2.3. Программа проведения лоткового эксперимента

Проведение лабораторных испытаний осуществлялось в два этапа – подготовительный и основной.

На подготовительном этапе выполнялись следующие виды работ:

1. Послойная укладка глинистого грунта требуемой консистенции в экспериментальный лоток с формированием скважины начальным диаметром 0,2 м в центре. Толщина укладываемого слоя грунта составляла 10 см. Каждый слой после укладки уплотнялся ручной трамбовкой. Перед укладкой последующего слоя ранее уплотненный взрыхлялся на глубину до 10 мм.

В рамках проведения экспериментальных исследований производилось изучение взаимодействия фрагментов буроинъекционных свай с характерными для юга Тюменской области грунтами в зависимости от глубины устройства и избыточного давления опрессовки. В связи с чем, в лотковом эксперименте последовательно проводились испытания фрагментов свай в суглинках мягкопластичной ($I_L \approx 0,50-0,60$) консистенции.

Во время заполнения лотка грунтом учитывалось, что в процессе проведения эксперимента на поверхность грунта будет передаваться нагрузка, имитирующая природное давление грунта на определенной глубине, что будет вызывать отжатие воды и изменение его консистенции. В связи с чем, предварительно в приборе компрессионного сжатия определялась требуемая начальная влажность грунта, которая после приложения уплотняющей нагрузки и отжатия воды из порового пространства соответствовала бы нужной консистенции ($I_L \approx 0,50-0,60$). Для получения искомой влажности глинистый грунт перемешивался с рассчитываемым количеством воды ручным электрическим миксером.

Для формирования начального диаметра скважины в центре лотка устанавливалась стальная тонкостенная труба диаметром 0,2 м, покрытая слоем солидола и полиэтиленовой пленкой, которая позже извлекалась. Процесс заполнения лотка грунтом представлен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5. Процесс послойного заполнения экспериментального лотка грунтом.

2. Параллельно с послойным заполнением лотка грунтом производилась расстановка мессдоз и глубинных марок горизонтальных перемещений.

Мессдозы располагались вертикально в радиальном направлении от ствола сваи на расстоянии 0,05 м, 0,1 м, 0,15 м, 0,25 м, 0,35 м, 0,6 м и ориентировались рабочей мембраной к стволу в 3-х уровнях на глубинах 0,2 м, 0,5 м и 0,8 м от поверхности грунта. Всего в каждом эксперименте использовалось по 16 мессдоз, принципиальная схема расположения которых представлена на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6. Схема расположения мессдоз.

Марки горизонтальных перемещений устанавливались на глубине 0,5 м от поверхности грунта. Глубинные марки располагались симметрично относительно ствола

фрагмента ствола сваи на расстоянии 0,025 м, 0,05 м, 0,14 м, 0,20 м, 250 мм, 0,30 м, 0,45 м и 0,60 м от его грани. Датчики часового типа ИЧ жестко крепились к реперной системе. Схема расположения марок перемещений представлена на рисунке 2.7. Всего в каждом эксперименте использовалось по 16 марок.



Рисунок 2.7. Схема расположения марок горизонтальных перемещений.

3. После полного заполнения лотка грунтом и расстановки измерительной аппаратуры производилось создание на поверхности грунта давления, соответствующего условной глубине расположения слоя, в котором в последующем формировался фрагмент ствола буроинъекционной сваи. Удельный вес грунта принимался равным $\gamma=19 \text{ кН/м}^3$. В рамках проведения эксперимента имитировались следующие условные глубины:

- 3,0 м (среднее давление на поверхности грунта 38 кПа);
- 5,0 м (среднее давление на поверхности грунта 76 кПа);
- 7,0 м (среднее давление на поверхности грунта 114 кПа).

Давление условных вышележащих слоев грунта создавалось при помощи гидравлического домкрата, нагрузка от которого посредством распределительной системы из деревянных брусьев и листов фанеры равномерно передавалась на рабочую поверхность грунта (рис. 2.8а). После приложения уплотняющей нагрузки регистрировались изменения радиальных напряжений (рис. 2.8б, 2.8в), стабилизированное значение которых перед формированием ствола сваи принималось за нулевое значение. Также после приложения поверхностной нагрузки фиксировалась величина осадки поверхности грунта и к последующему этапу приступали только после ее стабилизации.

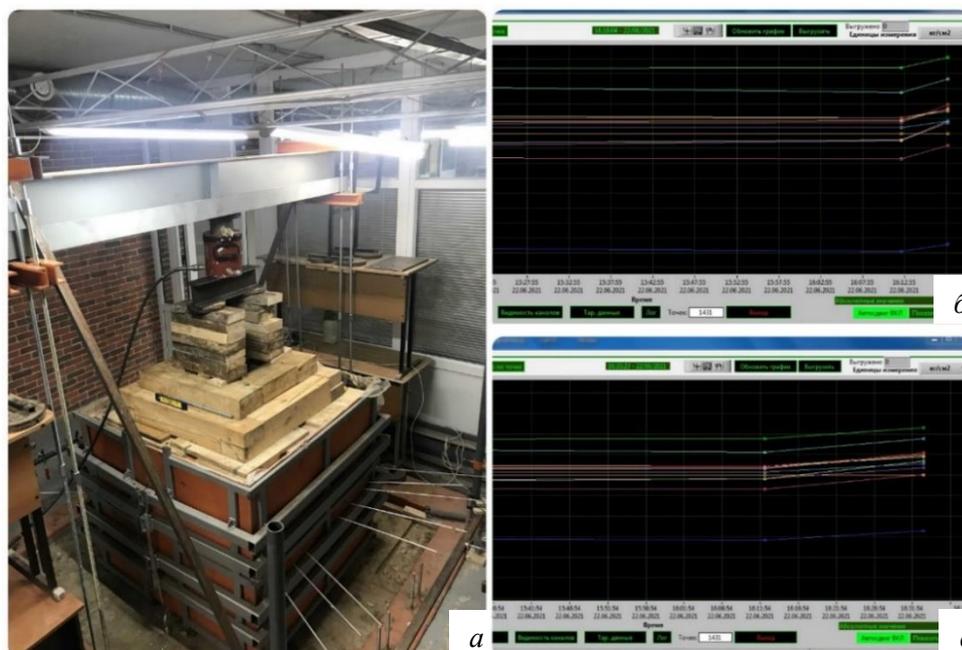


Рисунок 2.8. Схема приложения уплотняющей нагрузки на рабочую поверхность грунта:
а – общий вид; б – изменение радиальных напряжений в грунте при приложении уплотняющей нагрузки величиной 38 кПа; в - изменение радиальных напряжений в грунте при приложении уплотняющей нагрузки величиной 76 кПа.

После завершения процесса уплотнения грунта приступали к основному этапу проведения эксперимента, на котором последовательно выполнялись следующие работы:

1. Снятие уплотняющей нагрузки, извлечение обсадной трубы (рис.2.9а) и погружение в сформированную скважину фрагмента буроинъекционной сваи (рис.2.9б). После чего производилось нагнетание пескоцементного раствора при помощи инъекционного насоса БМП-6 в количестве, необходимом для полного заполнения фрагмента сваи без создания избыточного давления. Затем на поверхность грунта вновь прикладывалась уплотняющая нагрузка, что приводило к предварительному обжатию ствола сваи, заполненного пескоцементным раствором. После осуществлялось нагнетание в тело сваи дополнительного количества пескоцементного раствора (рис. 2.9в), что способствовало созданию в скважине избыточного давления опрессовки, увеличению его первоначального диаметра, изменению напряженно-деформированного состояния окружающего грунта и изменению его физико-механических характеристик. Всего было выполнено 4 серии лабораторных экспериментов:

- I серия: создание избыточного давления по стволу сваи в пределах 85-100 кПа на условной глубине 3,0 м;
- II серия: создание избыточного давления по стволу сваи в пределах 85-100 кПа на условной глубине 5,0 м;
- III серия: создание избыточного давления по стволу сваи в пределах 85-100 кПа на условной глубине 7,0 м;
- IV серия: создание избыточного давления по стволу сваи в пределах 150-160 кПа на условной глубине 3,0 м.

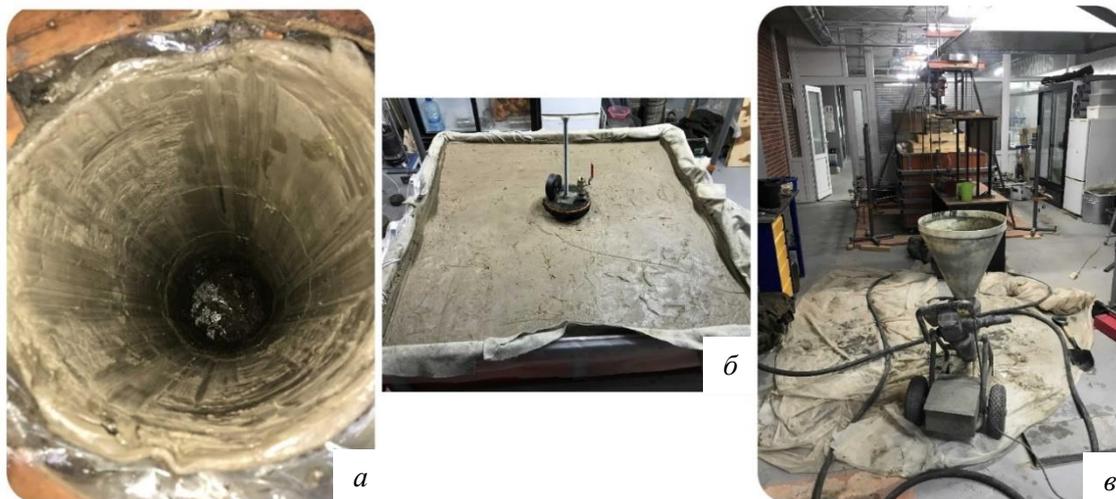


Рисунок 2.9. Процесс формирования ствола буринъекционной сваи:
а – извлечение обсадной трубы диаметром 0,2 м; б – погружение в сформированную скважину фрагмента сваи; в – нагнетание пескоцементного раствора в тело сваи.

Формирование ствола свай производилось с использованием разработанного автором инъекционного раствора на основе цементнопесчаной смеси М150 и суперпластификатора MC Power Flow 31.00, основные характеристики которого подробно представлены в научной статье [109].

2. В процессе формирования ствола буринъекционной сваи, а также в течение времени набора прочности раствором и релаксации напряжений в грунте фиксировались показания с мессдоз и глубинных марок горизонтальных перемещений.

3. После набора прочности раствором и при стабилизировавшихся напряжениях выполнялось испытание опытной сваи на действие статической вдавливающей нагрузки. Для оценки вклада в несущую способность только боковой поверхности и исключения работы пяты сваи в дне лотка предусматривалось отверстие диаметром 0,3 м (рис. 2.2), соосно с которым и выполнялось формирование фрагмента сваи.

Нагружение всех образцов свай производилось равномерно ступенями по 2 кН до срыва. На каждой ступени нагрузка выдерживалась до условной стабилизации перемещений, чему соответствовала скорость не более 0,1 мм за последние два часа наблюдений. Перемещения регистрировались двумя прогибомерами ИЧ 50.000 ПС класса точности 1 с точностью измерения до 0,01 мм. Общий вид экспериментального лотка во время проведения статических испытаний представлен на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10. Процесс испытания фрагмента сваи статической вдавливающей нагрузкой.

4. После окончания статических испытаний производилась раздвижка лотка и отбор образцов грунта для определения физических и механических характеристик. Отбор образцов осуществлялся на глубине 0,2 м, 0,5 м и 0,8 м на расстояниях 0 м, 0,1 м, 0,2 м, 0,3 м, 0,4 м и 0,5 м от грани сформированного ствола сваи. Процесс отбора образцов представлен на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11. Схема отбора образцов грунта после проведения испытаний.

5. На последнем этапе выполнялось извлечение сформированного фрагмента ствола буринъекционной сваи и определялись его фактические геометрические характеристики.

2.4. Результаты лотковых экспериментов

2.4.1. Напряженно-деформированное состояние околосвайного массива грунта

На рисунке 2.12а показано видовое окно программы *TENZO*, соответствующее моменту создания в теле сваи максимального избыточного давления опрессовки в первой серии эксперимента. На рисунке 2.12б показан характер изменения напряжений в процессе релаксации в зависимости от удаленности от ствола сваи.

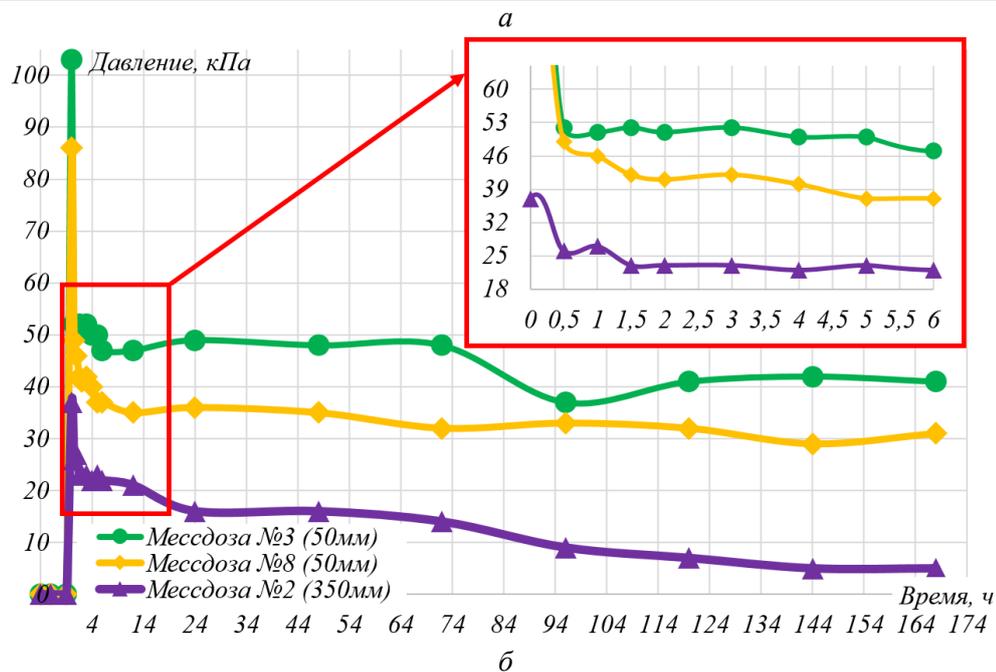


Рисунок 2.12. Изменение радиальных напряжений в первой серии эксперимента:
а – в момент создания избыточного давления; *б* – при релаксации напряжений
 (в скобках указано расстояние от ствола сваи до мессдозы).

В соответствии с данными рисунка 2.12б установлено, что радиальные напряжения контактной зоны (в пределах 0,05 м от грани ствола сваи) в течение первого часа после окончания нагнетания раствора снижаются и в среднем составляют 52% от величины давления опрессовки. В течение последующих трех часов наблюдается дальнейшее плавное падение напряжений до значения в пределах 45% первоначальной величины. По

прошествии шести часов напряжения контактной зоны практически достигают своего минимального значения и в последующем практически не меняются, а величина остаточных напряжений контактной зоны составляет в среднем 40% от величины давления опрессовки. Для сравнения, радиальные напряжения, возникающие на расстоянии 0,35 м от ствола сваи, через 1,5 часа наблюдений составляют в среднем 60% от начального значения и продолжают плавно уменьшаться в течении последующих 5 суток, после чего остаточные напряжения составляют менее 10% их максимальной величины.

В результате обработки показаний всех серий экспериментов были получены данные распределения радиальных напряжений в момент создания в теле буроинъекционной сваи максимального избыточного давления опрессовки и после релаксации напряжений (остаточные напряжения) (рис. 2.13).

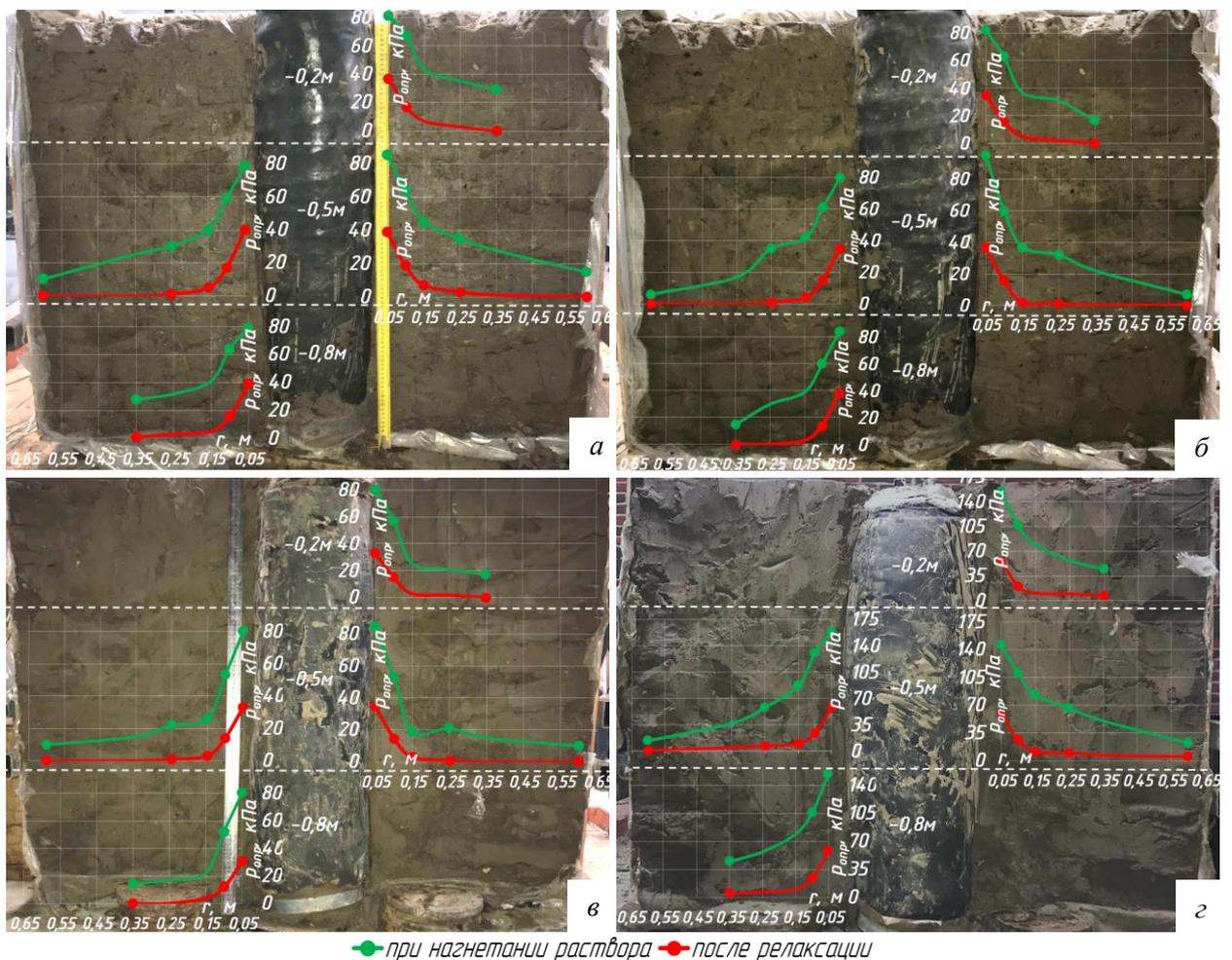


Рисунок 2.13. Изменение радиальных напряжений при устройстве БИС:
а – I серия; б – II серия; в – III серия; г – IV серия.

В соответствии с представленными графиками установлено, что максимальные контактные радиальные напряжения σ_r в процессе устройства сваи численно равны величине давления опрессовки $p_{\text{опр}}$. Зона действия максимальных радиальных контактных напряжений распространяется на величину до 0,05 м ($0,25d$), после чего начинается их

резкое падение: величина радиальных напряжений равная половине давления опрессовки распространяется на расстояние $0,80d$ в первом эксперименте, $0,65d$ во втором эксперименте, $0,55d$ в третьем эксперименте и $0,85d$ в четвертом эксперименте. Отсюда можно сделать вывод, что зона изменения напряженного состояния при одинаковом давлении опрессовки уменьшается с глубиной и незначительно возрастает в радиальном направлении при ее увеличении.

Для описания распределения радиальных напряжений при устройстве буринъекционных свай наиболее популярным подходом является использование зависимости, полученной на основании решения задачи о расчете толстостенного цилиндра при действии на него внутреннего и внешнего давлений (рис. 2.14) [52]. Указанное решение носит название «решение Лямэ» и используется для описания НДС массива грунта при устройстве свайных фундаментов [39, 127, 141]. В данном подходе применяется зависимость следующего вида:

$$\sigma_r = -\frac{1}{r_n^2 - r_e^2} \cdot \left[p_n r_n^2 \cdot \left(1 - \frac{r_e^2}{r^2} \right) + p_e r_e^2 \cdot \left(\frac{r_n^2}{r^2} - 1 \right) \right], \quad (2.1)$$

где r_n – наружный радиус, т.е. радиус, где избыточные напряжения равны нулю, r_e – внутренний радиус скважины, r – расстояние от центра скважины (ствола сваи) до рассматриваемой точки, p_e – избыточное давление опрессовки, p_n – горизонтальное давление грунта.

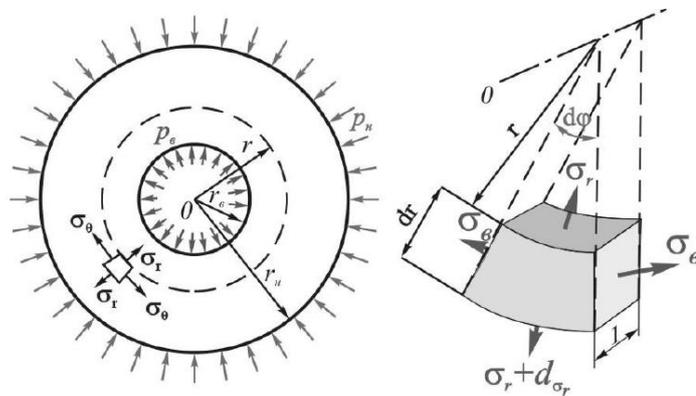


Рисунок 2.14. Расчетная схема к «решению Лямэ».

Использование формулы (2.1) для описания изменения напряженного состояния связано с определенными трудностями. Так, проблематично однозначно установить величину параметра r_n , т.е. определить зону влияния избыточного давления опрессовки при устройстве буринъекционных свай. Также использование указанной формулы при промежуточных значениях параметра r дает значения, отличающиеся от фактических величин: например, для первой серии экспериментов при $r=0,20$ м величина σ_r , вычисленная по формуле (2.1), составляет 20 кПа, при фактическом значении 62 кПа. Очевидно, это связано с тем, что в указанном решении не учитываются глубина

расположения слоя грунта, для которого вычисляются напряжения, и его физико-механические свойства, так как очевидно, что чем грунт плотнее и прочнее, тем выше его распределительная способность и напряжения быстрее затухают в радиальном направлении.

Зависимость изменения радиальных напряжений при воздействии на скважину осесимметричных напряжений в виде координатной функции была получена в работе [136] (формула (2.2)). Однако, данный подход также не учитывает глубины действия избыточного давления опрессовки и характеристик грунта. Использование же степенной функции (формула (2.3)), напротив, учитывает глубину, но не позволяет учесть величину избыточного давления опрессовки, а также требует экспериментального обоснования параметра k , зависящего от вида грунта.

$$\sigma_r = p_1 \cdot \left[-0,0184 \left(\frac{r}{r_0} \right)^3 + 0,22 \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 - 1,1946 \left(\frac{r}{r_0} \right) + 1,9477 \right], \quad (2.2)$$

$$\sigma_r = p_2 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k, \quad (2.3)$$

где r_0 – внутренний радиус скважины, r – расстояние от стенки скважины (ствола сваи) до рассматриваемой точки, p_1 – внутреннее избыточное давление, p_2 – внешнее давление грунта, k – коэффициент, определяемый экспериментальным путем, в зависимости от вида грунта и изменяющийся в пределах $k=1,5..2,5$.

Описание изменения радиальных напряжений и оценка изменения напряженного состояния в процессе устройства буроинъекционных свай в зависимости от величины действующего давления опрессовки $p_{опр}$ (кПа), глубины h (м), начального радиуса скважины R_0 (м) и радиального удаления от ствола сваи r (м) на основании экспериментальных данных, полученных для суглинка мягкопластичной консистенции ($I_L \approx 0,50-0,60$), предложено выполнять на основании зависимости следующего вида, в основу которой была положена «формула Лямэ»:

$$\sigma_r = p_{опр} \left[\alpha + \frac{\beta}{(R_0 + r)^\delta} \right] \quad (2.4)$$

где $\alpha(h)$ и $\beta(h)$ – коэффициенты, обеспечивающие скорость падения напряжений и зависящие от глубины h , δ – показатель степени, обеспечивающих согласие теоретических и экспериментальных напряжений.

Используя набор экспериментальных данных по изменению радиальных напряжений в околовсвайном массиве грунта и воспользовавшись методом наименьших квадратов определялись коэффициенты $\alpha(h)$ и $\beta(h)$, путем введения новых переменных:

$$y_i = \frac{\sigma_{ri}}{p_{onp}}, x_i = \frac{l}{(R_0 + r_i)^\delta} \quad (2.5)$$

После чего предполагаемая искомая зависимость приобретает следующий вид:

$$y = \alpha + \beta x \quad (2.6)$$

Для определения неизвестных использовалась функция следующего вида:

$$F(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^5 (y_i - \alpha + \beta x_i)^2 \rightarrow \min \quad (2.7)$$

Окончательная система уравнений для определения неизвестных принимала вид:

$$\begin{cases} \alpha \sum_{i=1}^5 1 + \beta \sum_{i=1}^5 x_i = \sum_{i=1}^5 y_i \\ \alpha \sum_{i=1}^5 x_i + \beta \sum_{i=1}^5 x_i^2 = \sum_{i=1}^5 x_i y_i \end{cases} \quad (2.8)$$

После определения коэффициентов $\alpha(h)$ и $\beta(h)$ определялось выборочное значение среднего квадратического отклонения, используемого для контроля степени адекватности полученных зависимостей.

Для нахождения показателя степени δ была написана программа, которая обеспечивает обработку экспериментальных данных с выбором показателя степени в зависимости от знаменателя при заданном значении R_0 и исходя из условия минимума среднего квадратического отклонения. На рисунке 2.15 показан интерфейс программы в ходе обработки данных первой серии эксперимента.

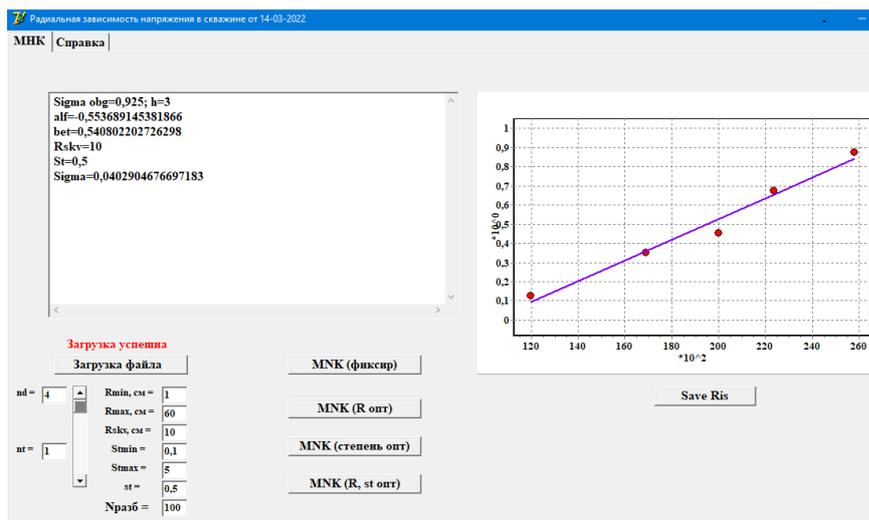


Рисунок 2.15. Интерфейс программы для обработки экспериментальных данных изменения напряженного состояния массива грунта (на примере I серии эксперимента).

Обработка экспериментальных данных в программе с учетом условия, требующего равенства известного давления опрессовки на стенку скважины и найденного по формуле (2.4), показала, что согласие теоретических и фактических значений изменения

напряженного состояния грунта в момент создания избыточного давления по стволу сваи достигается при показателе степени $\delta=0,5$, и при показателе степени $\delta=2,5$ в случае формирования остаточных напряжений.

С учетом имеющихся данных в линейном приближении была получена следующая эмпирическая зависимость по определению радиальных напряжений, возникающих в массиве грунта, в процессе устройства буроинъекционной сваи (в момент создания избыточного давления опрессовки):

$$\sigma_r = p_{опр} \left[-0,029h - 0,459 + \frac{0,004h + 0,538}{(R_0 + r)^{0,5}} \right] \quad (2.9)$$

Зависимость (2.9) была получена на основании опытных данных первых трех серий экспериментов (при действии одинакового избыточного давления опрессовки на различных глубинах) и хорошо согласуется с данными четвертой серии экспериментов при изменении величины избыточного давления опрессовки $p_{опр}$. Кроме того, используя полученную формулу (2.9) были определены напряжения для другого вида грунта и других геометрических параметров сваи (давление опрессовки $p_{опр}=100$ кПа, глубина устройства сваи в суглинке тугопластичном ($I_L=0,4$) $h=1,5$ м, начальный радиус скважины $R_0=0,03$ м) и произведено их сопоставление с данными, содержащимися в работе Самохвалова М.А. [110], на расстоянии 0,1 м, 0,2 м и 0,3 м от стенки скважины. Сравнение расчетных и фактически измеренных напряжений показало достаточно хорошее согласие угловых коэффициентов, а ошибка в их определении составила около 10%.

В соответствии с исследованиями Ермолаева А.В., выполненными под руководством профессора Мангушева Р.А., установлено, что в глинистых грунтах, находящихся в водонасыщенном состоянии, предельная величина избыточного давления опрессовки без нарушения сплошности грунта составляет 500 кПа, а оптимальная величина указанного параметра 200-300 кПа [58]. В связи с чем, используя формулу (2.9) и значения величины давления опрессовки в пределах 100...400 кПа, были получены зоны изменения напряженного состояния окружающего сваю суглинки мягкопластичного ($I_L \approx 0,50-0,60$) в зависимости от глубины ее устройства (рис. 2.16). За критерий окончания зоны изменения напряженного состояния принималась величина радиального напряжения, составляющая менее 10% давления опрессовки. Анализ данных показывает, что с увеличением давления опрессовки свыше 200 кПа зона изменения напряженного состояния увеличивается менее интенсивно (при избыточном давлении опрессовки 100 кПа зона изменения напряженного состояния на глубине 5 м распространяется в радиальном направлении r на величину $2,75d$, при 200 кПа и 300 кПа – на величину $3,25d$ и на величину $3,5d$ при избыточном давлении 400 кПа), что, вероятно, объясняется тем, что даже относительно небольшая величина

избыточного давления опрессовки (в пределах 100 кПа) способствует существенному уплотнению грунта контактного слоя, и последующее увеличение давления опрессовки не вызывает дальнейшего ощутимого уплотнения грунта, а способствует развитию гидроразрывов за счет концентрации напряжений. Также прослеживается уменьшение зоны изменения напряженного состояния от избыточного давления опрессовки с увеличением глубины устройства свай, причем при глубине более 35 м зона изменения напряженного состояния не превышает $0,25d$. Таким образом, зная величину давления опрессовки при устройстве буроинъекционных свай и глубину их устройства, используя формулу (2.9) возможно оценить зону изменения напряженного состояния грунта и тем самым подобрать шаг размещения свай в плане.

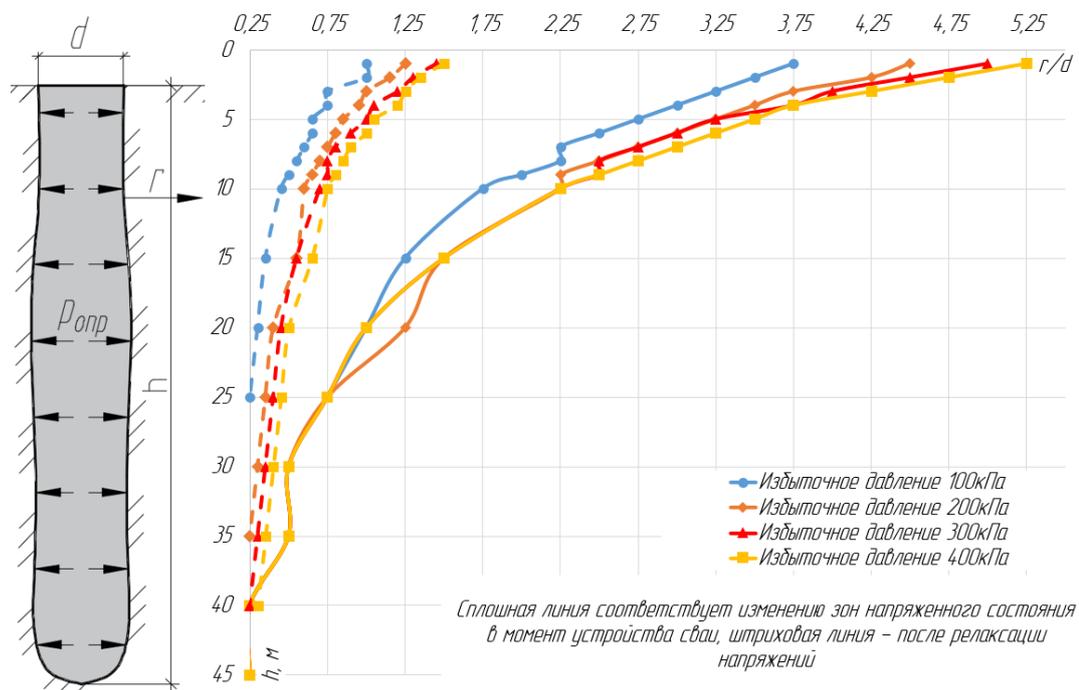


Рисунок 2.16. Зоны изменения напряженного состояния околосвайного грунта при опрессовке.

Более значимым параметром для практических целей (в частности для определения несущей способности буроинъекционных свай) является определение остаточного напряженного состояния в околосвайном грунте, возникающего после релаксации напряжений, так как именно величина остаточных радиальных напряжений увеличивает силы трения грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай. Причем, недоучет остаточного напряженного состояния может привести к существенному занижению несущей способности буроинъекционных свай, что отмечено в ряде работ отечественных и зарубежных авторов [17, 38, 101]. На основе экспериментальной обработки результатов были получены графики изменения остаточных радиальных напряжений в процессе релаксации (рис. 2.13). Зависимость, определяющую степень радиального уменьшения остаточного напряжения, можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{r,ост} = p_{опр} \left[-0,0015h - 0,028 + \frac{-0,0001h + 0,004}{(R_0 + r)^{2,5}} \right] \quad (2.10)$$

Использование формулы (2.10) также позволяет с достаточной степенью достоверности определять напряжения и для других видов глинистых грунтов. Так, сравнивая величину остаточных напряжений, вычисленных по формуле (2.10) и экспериментально установленных Самохваловым М.А. в ходе выполнения исследований в тугопластичном суглинке при $r=0,1$ м, $0,2$ м и $0,3$ м, установлено, что отличие составляет 2,5%, 25% и 20% соответственно. Сравнение с экспериментальными данными Петухова А.А. [99], проводимых в г. Томске в глинистых грунтах текучей консистенции, по измерению релаксации давления в системе «свая-грунт» показало отклонение 18% (129 кПа фактическое значение и 105 кПа расчетное).

Сравнивая формулу для определения остаточных напряжений с формулой (2.9) выявлено, что значение показателя степени δ по абсолютной величине в 5 раз больше аналогичного показателя в момент создания в скважине избыточного давления опрессовки, следовательно, скорость уменьшения остаточного напряжения с расстоянием практически в 5 раз выше. В соответствии с рисунком 2.16 установлено, что с увеличением избыточного давления опрессовки зона распространения остаточных напряжений незначительно изменяется в радиальном направлении (при избыточном давлении опрессовки 100 кПа на глубине 10 м зона изменения остаточного напряженного состояния распространяется в радиальном направлении r на величину $0,5d$ и на величину до $0,75d$ при избыточном давлении до 400 кПа), но при этом увеличение избыточного давления опрессовки способствует значительному увеличению зоны изменения остаточного напряженного состояния по глубине (до 25 м при давлении 100 кПа и до 40 м при давлении 300 кПа).

На основании экспериментальных данных было установлено, что величина остаточных напряжений, возникающих в мягкопластичном ($I_L \approx 0,50-0,60$) суглинке в контактном слое, существенно изменяется с глубиной. Так, для глубины в пределах 5 метров $\sigma_{r,ост} \approx 0,5\sigma_r$, для глубины в пределах 5 – 15 м $\sigma_{r,ост} \approx 0,45\sigma_r$, для глубины в пределах 15 – 20 м $\sigma_{r,ост} \approx 0,35\sigma_r$, для глубины в пределах 20 – 25 м $\sigma_{r,ост} \approx 0,30\sigma_r$, а для глубины более 25 м величина остаточных напряжений составляет менее 20% начальной величины напряжений, что обусловлено возрастающей с глубиной величиной горизонтального природного давления грунта. Таким образом, преимуществом формулы (2.10) является возможность определения остаточных радиальных напряжений в зависимости от величины избыточного давления опрессовки $p_{опр}$ (кПа), глубины устройства h (м), начального радиуса скважины R_0 (м) и радиального удаления от ствола сваи r (м), что позволяет более точно

определять величину дополнительного обжатия ствола буроинъекционной сваи, что важно при расчете их несущей способности. В работах ряда авторов величину остаточных напряжений предлагается определять как 30-40% от величины избыточного давления опрессовки [101, 103] без привязки к указанным факторам.

При определении радиальных напряжений в соответствии с формулами (2.9) и (2.10) они напрямую не зависят от вида грунта, что связано с тем, что лабораторные испытания выполнялись, используя один вид грунта. При проведении дополнительных исследований и получении данных для других видов грунтов выражения (2.9) и (2.10) возможно дополнить дополнительным параметром, например, удельным весом грунта γ , что позволит распространить зависимости на другие типы грунтов.

По установленным маркам горизонтальных перемещений были определены зоны изменения деформированного состояния грунта при устройстве буроинъекционных свай. На рисунке 2.17 представлены изолинии горизонтальных перемещений грунта. Зоны изменения деформированного состояния грунта составили 3,0-3,5 d в первой серии эксперимента, 3,0 d во второй серии, 2,5-3,0 d в третьей серии экспериментов и 3,5-3,75 d для четвертой. Указанные зоны изменения деформированного состояния соответствуют зонам изменения напряженного состояния (рис. 2.13 и 2.16).

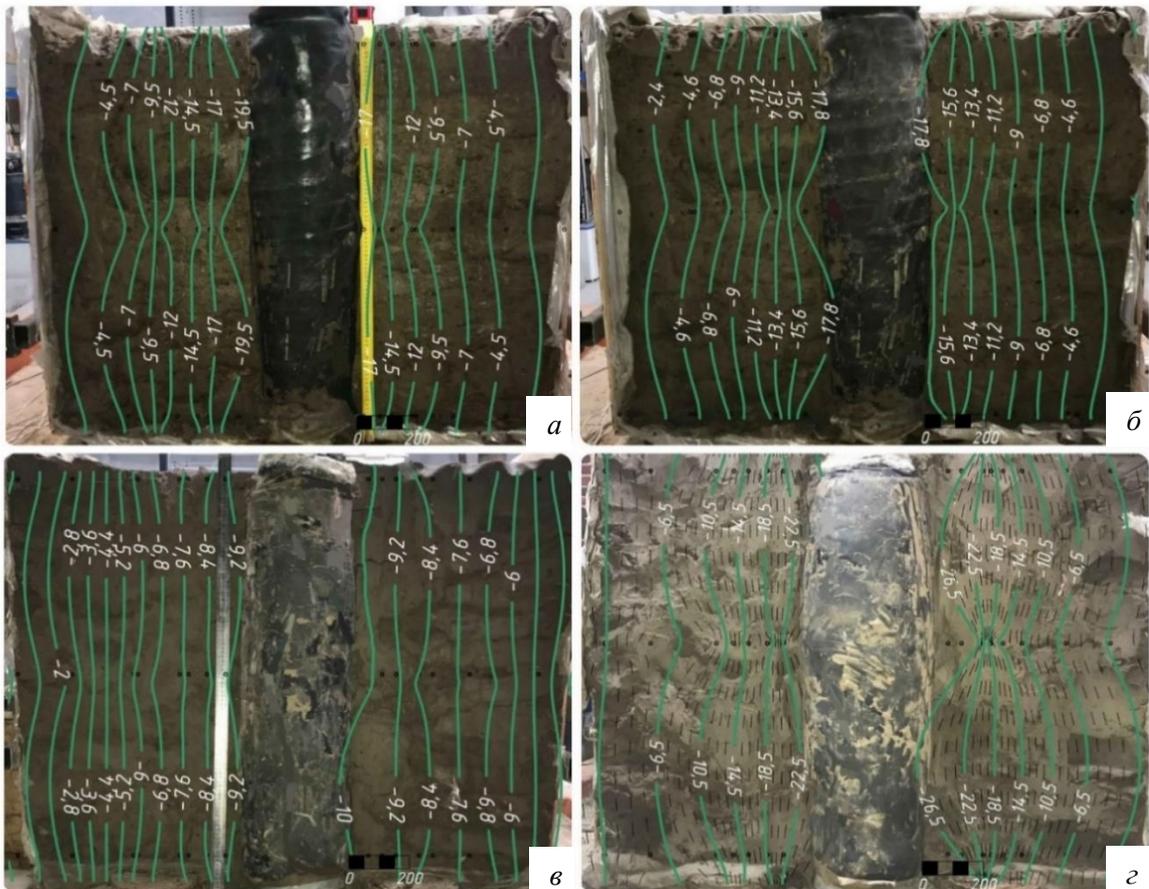


Рисунок 2.17. Изменение горизонтальных перемещений при устройстве БИС, мм:
а – I серия; б – II серия; в – III серия; г – IV серия.

В целом перемещения контактных марок соответствуют приращению первоначального диаметра буринъекционных свай, фактическое значение которого устанавливалось по результатам извлечения образцов (рис. 2.18).



Рисунок 2.18. Измерение диаметра свай при $p_{опр}=85-100$ кПа:
а – на условной глубине 3 м, б – на условной глубине 7 м.

В таблице 2.1 представлено сравнение фактического диаметра фрагментов буринъекционных свай с различными аналитическими методиками его определения. Фактическая длина фрагментов свай в каждом из 4-х опытов составила 0,9 м, 0,9 м, 0,88 м и 0,85 м соответственно.

Таблица 2.1. Методы определения диаметра буринъекционных свай.

Метод	Сущность метода	Диаметр сваи, мм			
		Отклонение от фактического диаметра			
		I серия	II серия	III серия	IV серия
-	Фактическое измерение	262,7	245,1	231,6	289,8
п. Л.3 СП 381.1325800	$D_k = d_{скв} \cdot K_d$	$\frac{280}{6,6\%}$	$\frac{280}{14,2\%}$	$\frac{280}{20,9\%}$	$\frac{280}{-3,4\%}$
ЦНИИС МинТрансСтрой	$D_k = d_{скв} + 2 \cdot 10 \text{ мм}$	$\frac{210}{-20,1\%}$	$\frac{210}{-14,3\%}$	$\frac{210}{-9,3\%}$	$\frac{210}{-27,5\%}$
EA-Pfähle (Германия) [9]	$D_k = d_{скв} + 20 \text{ мм}$	$\frac{220}{-16,3\%}$	$\frac{220}{-10,2\%}$	$\frac{220}{-5,1\%}$	$\frac{220}{-24,1\%}$
Формула 7.11 П18- 2004 [93]	$D_k = \sqrt{\frac{1,273K_n V_p}{l_k} + d^2 K_n + (1-K_n)d_i^2}$	$\frac{304,7}{16,0\%}$	$\frac{303,4}{23,8\%}$	$\frac{296,5}{28,0\%}$	$\frac{344,6}{18,9\%}$
Мишаков В.А., Раяков В.Ф. [86]	$D_k = \sqrt{\frac{1,27V_p(1+0,172m)}{(1+nm)l_k} + \frac{m(n-0,172)d^2}{(1+nm)}}$	$\frac{253,5}{-3,5\%}$	$\frac{251,7}{2,7\%}$	$\frac{241,7}{4,4\%}$	$\frac{308,4}{6,4\%}$
Петухов А.А. [99]	$D_k = 2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta V_{Ei}}{\pi z_i} + r_0^2}$	$\frac{314,5}{19,7\%}$	$\frac{303,1}{23,7\%}$	$\frac{294,9}{27,3\%}$	$\frac{350,6}{20,9\%}$
Abd Elaziz and El Naggar [8]	$D_k = d_0 \cdot (1 + 0,35V_{inc})$ $V_{inc} = \frac{V_{grout} - V_{hole}}{V_{hole}}$	$\frac{244,3}{-7,0\%}$	$\frac{242,6}{-1,1\%}$	$\frac{233,6}{0,9\%}$	$\frac{300,3}{3,6\%}$

На основании данных таблицы 2.1 установлено, что наиболее простым и в то же время достоверным методом определения диаметра буроинъекционных свай в результате их опрессовки избыточным давлением является способ, предложенный в работе *Abd Elaziz and El Naggar* [8]. Максимальное отклонение фактического диаметра сваи от расчетного составило 7,0%. Данный метод основан на учете избыточного количества рабочего раствора V_{inc} , подаваемого в скважину при опрессовке. Используемая простая эмпирическая зависимость была получена авторами посредством статистической обработки большого количества результатов натуральных измерений фактического диаметра буроинъекционных свай, которые устраивались в различных инженерно-геологических условиях. Также незначительную погрешность дают результаты по определению фактического диаметра буроинъекционных свай (максимальное отклонение составляет 6,5%) при использовании зависимости, предложенной в работе Мишакова В.А. и Раюка В.Ф. [86]. В данной зависимости помимо количества закачиваемого рабочего раствора V_p , дополнительно учитывается отношение удельных весов цемента и воды m , водоцементное соотношение n и длина зоны инъекции l_k . Зависимость была получена в результате обработки многочисленных лабораторных и полевых экспериментов по устройству буроинъекционных свай и анкером. Следует отметить, что данные две методики позволяют определить средний по всей длине диаметр буроинъекционной сваи, так как не учитывают изменение физико-механических характеристик грунта с глубиной и многослойность основания, однако, простота формулы и хорошая сходимость с фактическими данными нивелируют указанный недостаток. Более прогрессивным с этой точки зрения является метод, предложенный в работе Петухова А.А. [99], который позволяет учитывать приращение диаметра сваи по глубине в зависимости от физико-механических характеристик грунта основания. В данном подходе перемещения стенок скважины определяются на основании решения задачи о формировании цилиндрической полости в упрочняющейся разномодульной грунтовой среде (УРС) в соответствии с работами Лушников В.В., Богомолова В.А. [44, 68]. Однако, данный метод является довольно трудоемким и дает погрешность в пределах 20%.

2.4.2. Физико-механические характеристики контактного слоя грунта

Оценка и прогнозирование степени изменения физико-механических характеристик околосвайного массива грунта в процессе устройства буроинъекционных свай является важной прикладной задачей для корректного проектирования и описания характера работы свай под нагрузкой. Особенно важно знать изменение характеристик контактного слоя грунта при численном моделировании буроинъекционных свай. Очевидно, что степень

изменения данных характеристик грунта непостоянна и зависит от ряда факторов (вид грунта и глубина его расположения, степень приближения к максимальному значению, величина избыточного давления опрессовки, продолжительность воздействия избыточным давлением и т.д.). При постоянстве указанных факторов на степень изменения физико-механических характеристик будет в первую очередь влиять удаленность от ствола сваи, что связано с убыванием дополнительных напряжений в радиальном от сваи направлении (рис. 2.13). На основании ряда исследований [89, 99, 101, 122, 127, 140, 141] установлено, что при воздействии на скважину избыточным давлением опрессовки происходит увеличение ее первоначального диаметра за счет уплотнения грунта контактного слоя, сопровождающегося в первую очередь сжатием пор грунта, заполненных газом, а затем пор, заполненных водой при одновременном ее отжатии. На рисунке 2.19 представлено изменение плотности грунта в ходе лотковых экспериментов.

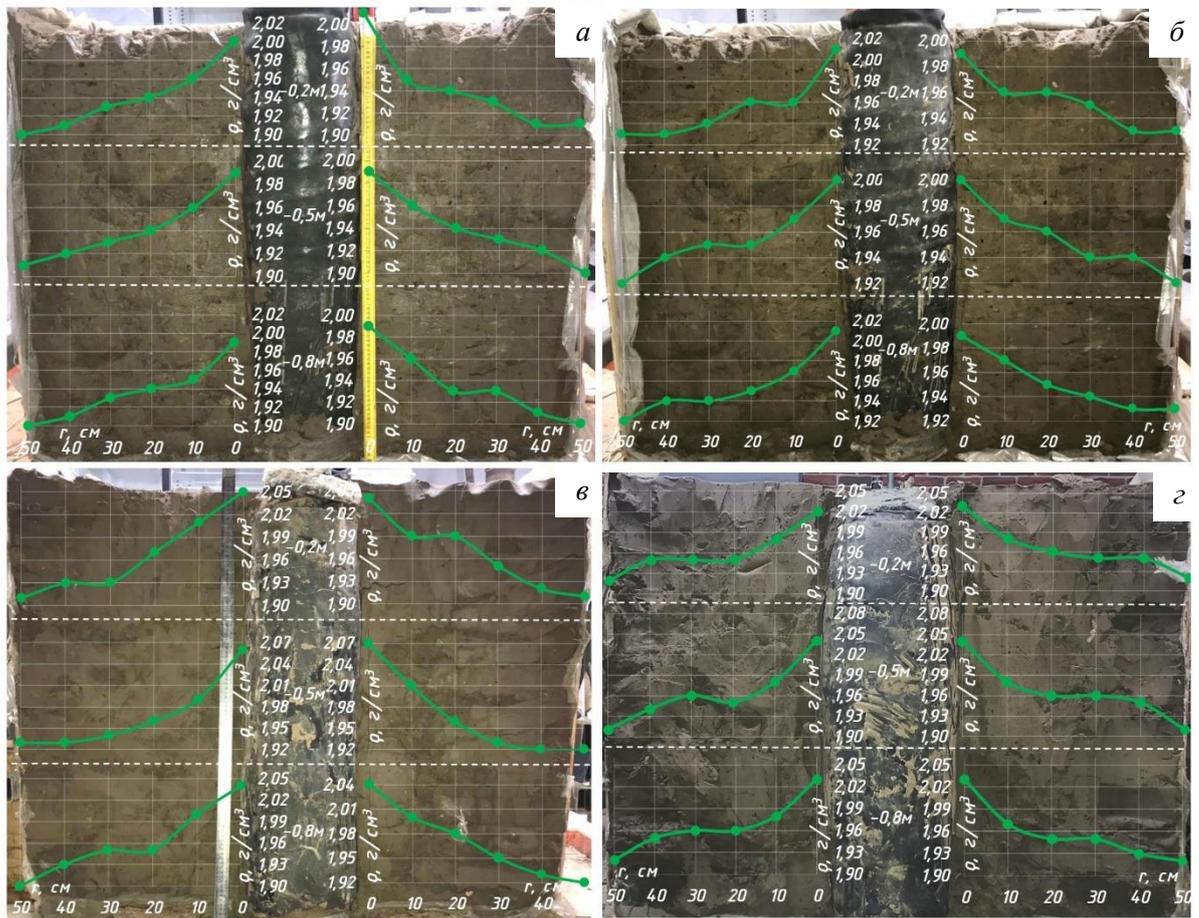


Рисунок 2.19. Изменение плотности грунта при устройстве БИС, г/см³:
а – I серия; б – II серия; в – III серия; з – IV серия.

Максимальное значение плотности грунта достигается непосредственно в контактном слое ($\approx 0,1 d$), после чего происходит резкое практически линейное уменьшение плотности на расстоянии до $1,0-1,5 d$, затем наблюдается участок шириной $0,5-0,75 d$ со стабильным значением плотности с последующим падением характеристики до начального

(природного) значения. В целом изменение плотности грунта в результате осесимметричного расширения скважины распространяется на ширину $1,5-2,5 d$, что согласуется с рядом работ [87, 89, 99]. Увеличение плотности грунта контактного слоя в зависимости от условной глубины и величины избыточного давления опрессовки в соответствии с рисунком 2.19 составило 4-7%, где нижний порог соответствует величине избыточного давления опрессовки в пределах 85-100 кПа на условной глубине 7 м, а верхний предел соответствует величине избыточного давления в пределах 150 кПа на условной глубине 3 м. Разность изменения плотности грунта в пределах одной глубины, но при разной величине избыточного давления (I и IV серия экспериментов) составила 3% (средняя максимальная плотность в I серии эксперимента $2,0 \text{ г/см}^3$ и $2,04 \text{ г/см}^3$ для IV серии), откуда можно сделать вывод, что даже при относительно небольшой величине избыточного давления (в пределах 100 кПа) происходит существенное уплотнение грунта контактного слоя, а последующее увеличение давления опрессовки не вызывает дальнейшего ощутимого изменения плотности грунта, а способствует образованию гидроразрывов.

Более высоких показателей изменения плотности грунта контактного слоя при осесимметричном расширении скважины можно добиться путем воздействия повышенным избыточным давлением в результате нагнетания раствора в герметичную оболочку [98] или в результате ступенчатой опрессовки буроинъекционных свай [97, 103], что позволяет исключить образование гидроразрывов в грунтовой среде. Самохваловым М.А. экспериментально установлено, что для суглинка мягкопластичного в зоне образования уширения в герметичной эластичной оболочке на глубине 6 м характерно увеличение плотности на 20 – 25%, в то время как вдоль ствола буроинъекционных свай изменение указанных характеристик составляет 14 – 21% [110]. Петуховым А.А. в ходе ступенчатой опрессовки с доведением максимального избыточного давления до 1 МПа для инъекционных свай длиной 1,5 – 5,0 м, расположенных в слое глинистых грунтов мягкопластичной-текучей консистенции было зафиксировано увеличение плотности грунта контактного слоя на 13,7-15,8% [99]. Однако, данные значения изменения плотности контактного слоя грунта получены при небольших глубинах устройства буроинъекционных свай и низких начальных значениях плотности: в работе Петухова А.А. природная плотность мягкопластичного суглинка составила $\approx 1,86 \text{ г/см}^3$ при коэффициенте пористости 0,9, у Самохвалова М.А. $1,84-1,88 \text{ г/см}^3$ при коэффициенте пористости 0,8-0,9, т.е. в экспериментальных исследованиях указанные слои грунта обладали существенным резервом для доуплотнения.

На основании полученных данных, а также в результате обобщения экспериментальных данных других авторов [29, 56, 89, 98, 99, 110] предложена следующая эмпирическая зависимость, характеризующая изменение плотности грунта контактного слоя при устройстве буринъекционных свай в зависимости от начального значения плотности ρ_0 , консистенции глинистого грунта I_L , глубины расположения h и величины давления опрессовки $p_{опр}$:

$$\rho_{опр} = -0,0001 + 3,982I_L + 7,45 \cdot 10^{-5}h + 0,392p_{опр} + 0,263\rho_0 + 0,131I_L^2 + 0,0003h^2 - 0,01p_{опр}^2 + \\ + 0,320\rho_0^2 - 0,017I_Lh - 0,092I_Lp_{опр} - 1,847I_L\rho_0 + 0,0004hp_{опр} + 8,14 \cdot 10^{-5}h\rho_0 - 0,135p_{опр}\rho_0 \quad (2.11)$$

В точках определения плотности грунта также была определена его влажность. Графическое представление изменения влажности грунта в результате устройства буринъекционных свай представлено на рисунке 2.20.

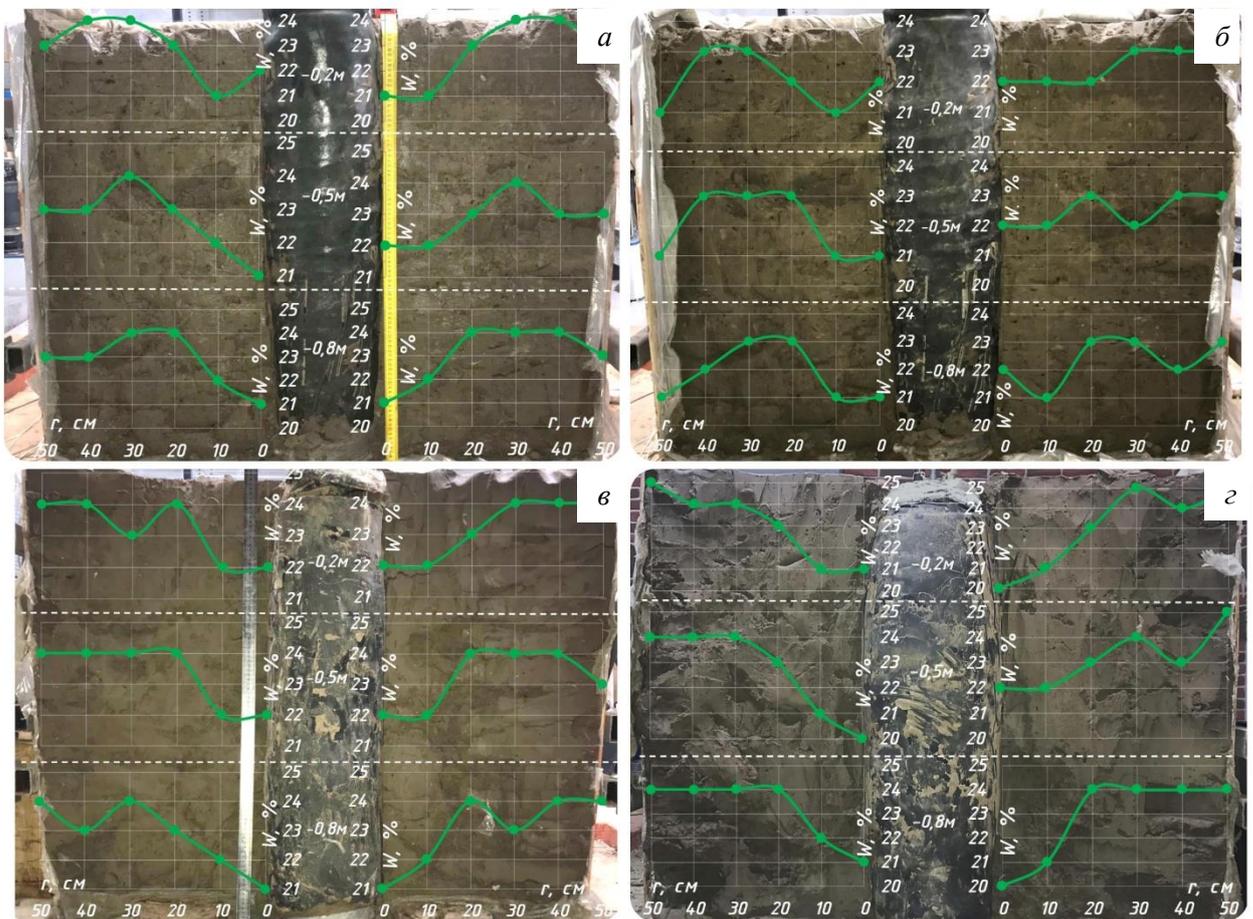


Рисунок 2.20. Изменение влажности грунта при устройстве БИС:
а – I серия; б – II серия; в – III серия; г – IV серия.

Установлено, что максимальное изменение влажности грунта характерно для контактного слоя и для выполненных опытов составило в пределах 0,07-0,21 д.ед., где нижний порог соответствует величине избыточного давления в пределах 85-100 кПа на условной глубине 7 м, а верхний предел соответствует величине избыточного давления в пределах 150-160 кПа на условной глубине 3 м. По мере удаления от контактного слоя в

результате опрессовки стенок скважины избыточным давлением происходит практически линейное увеличение влажности, вызванное отжатием воды из порового пространства, на ширину $0,75-1,5 d$ с последующей стабилизацией показателя до природного значения.

Анализ работ отечественных и зарубежных авторов [24, 28, 29, 68, 89, 99, 101, 110, 122, 140] показывает, что изменение влажности глинистого грунта при опрессовке стенок скважины избыточным давлением для различного вида грунта, глубины устройства, давления опрессовки (до 3 МПа) и продолжительности опрессовки составляет от 15% до 30%. Относительно постоянный диапазон изменения влажности грунта при переменчивости вышеуказанных факторов объясняется тем, что процесс фильтрационной консолидации в глинистых грунтах происходит медленно, соответственно для того, чтобы добиться большего изменения влажности контактного слоя грунта необходимо поддерживать в скважине постоянное избыточное давление в течение длительного промежутка времени, что на практике труднореализуемо. Таким образом, изменение влажности грунта контактного слоя при устройстве буроинъекционных свай можно оценить по следующей формуле, которая также была использована в ряде работ [89, 140]:

$$W_{опр} = (0,7-0,8)W_0 \quad (2.12)$$

где W_0 – природная влажность грунта, %.

Основываясь на результатах собственных исследований [28, 29], а также на исследованиях других авторов [5, 6, 24, 89, 99, 101, 103, 110, 140], установлено, что в результате опрессовки стенок скважины избыточным давлением основное изменение механических характеристик свойственно для модуля деформации E (до 70%) и удельного сцепления грунта C (до 50%). Изменение угла внутреннего трения φ составляет 1-3°.

Очевидно, что значения механических характеристик C , φ и E существенно зависят от физического состояния грунта контактного слоя (его плотности-влажности), изменение которого в процессе устройства буроинъекционных свай и приводит к изменению искомых величин. Значение удельного сцепления глинистого грунта контактного слоя $C_{опр}$, угла внутреннего трения $\varphi_{опр}$ и модуля деформации $E_{опр}$ глинистого грунта после опрессовки скважины избыточным давлением предлагается определять по следующему алгоритму:

1. Определяется плотность скелета сухого грунта ρ_d с учетом выражений (2.11) и (2.12) [127]:

$$\rho_d = \frac{\rho_{опр}}{1+0,01W_{опр}} \quad (2.13)$$

2. Находится коэффициент пористости контактного слоя грунта $e_{опр}$, получаемый в результате устройства буроинъекционных свай и определяемый в соответствии с общепринятой формулой [127]:

$$e_{опр} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2.14)$$

2 Используя значение коэффициента пористости $e_{опр}$ по представленным ниже выражениям, полученным в результате обработки и аппроксимации методом наименьших квадратов полиномов табличных нормативных данных, приведенных в таблицах А.2 и А.3 СП 22.13330.2021, определяются значения $C_{опр}^{норм}$, $E_{опр}^{норм}$ и $\varphi_{опр}^{норм}$:

Для супесей:

$$C_{опр}^{норм} = 39,29e_{опр}^2 - 73,575e_{опр} + 44,99 \quad (2.15)$$

$$\varphi_{опр}^{норм} = -25,70e_{опр}^2 + 11,30e_{опр} + 28,50 \quad (2.16)$$

$$E_{опр}^{норм} = 85,714e_{опр}^2 - 175,429e_{опр} + 93,90 \quad (2.17)$$

Для суглинков:

$$C_{опр}^{норм} = 95,846 - 32,485I_L - 128,695e_{опр} + 12,406I_L^2 + 51,984e_{опр}^2 + 14,688I_Le_{опр} \quad (2.18)$$

$$\varphi_{опр}^{норм} = 26,595 - 2,842I_L + 5,287e_{опр} - 3,797I_L^2 - 11,508e_{опр}^2 - 6,561I_Le_{опр} \quad (2.19)$$

$$E_{опр}^{норм} = 80,978 - 9,497I_L - 127,134e_{опр} + 4,387I_L^2 + 58,532e_{опр}^2 - 4,804I_Le_{опр} \quad (2.20)$$

Для глин:

$$C_{опр}^{норм} = 188,032 - 86,520I_L - 232,678e_{опр} - 10,789I_L^2 + 82,850e_{опр}^2 + 81,540I_Le_{опр} \quad (2.21)$$

$$\varphi_{опр}^{норм} = 14,927 + 2,828I_L + 23,334e_{опр} - 10,610I_L^2 - 22,422e_{опр}^2 - 7,786I_Le_{опр} \quad (2.22)$$

$$E_{опр}^{норм} = 51,846 - 17,384I_L - 44,726e_{опр} + 1,907I_L^2 + 7,831e_{опр}^2 + 5,041I_Le_{опр} \quad (2.23)$$

4. Получив нормативные значения $C_{опр}^{норм}$, $E_{опр}^{норм}$ и $\varphi_{опр}^{норм}$ после опрессовки скважины избыточным давлением также по зависимостям (2.15)-(2.23) определяются значения указанных величин в природном состоянии до устройства буроинъекционных свай $C_0^{норм}$, $E_0^{норм}$ и $\varphi_0^{норм}$, т.е. при $e=e_0$ и при $p_{опр}=0$.

5. Далее находятся коэффициенты K_C , K_φ и K_E , показывающие во сколько раз механические характеристики контактного слоя грунта после воздействия избыточным давлением превосходят механические характеристики до опрессовки:

$$K_C = \frac{C_{опр}^{норм}}{C_0^{норм}} \quad (2.24)$$

$$K_\varphi = \frac{\varphi_{опр}^{норм}}{\varphi_0^{норм}} \quad (2.25)$$

$$K_E = \frac{E_{опр}^{норм}}{E_0^{норм}} \quad (2.26)$$

6. Определив коэффициенты K_C , K_φ и K_E , и зная фактические начальные значения удельного сцепления грунта C_0 , угла внутреннего трения φ_0 и модуля деформации E_0 ,

определенные по результатам инженерно-геологических изысканий, вычисляют фактическое значение данных величин в контактном слое в результате опрессовки стенок скважины избыточным давлением:

$$C_{опр} = C_0 \cdot K_C \quad (2.27)$$

$$\varphi_{опр} = \varphi_0 \cdot K_\varphi \quad (2.28)$$

$$E_{опр} = E_0 \cdot K_E \quad (2.29)$$

В таблице 2.2 представлено сравнение механических характеристик, вычисленных в соответствии с представленным алгоритмом и определенных в результате лабораторных испытаний монолитов грунта.

Таблица 2.2. Определение механических характеристик глинистого грунта в результате устройства БИС.

Источник	Исходные данные	Начальное значение характеристики, $\frac{C_0, \text{кПа}}{E_0, \text{МПа}}$	Значение характеристик и по лабораторным испытаниям	Значение характеристики по предложенному алгоритму
Лабораторные испытания автора	Суглинок мягкопластичный, $H_{отбора}=3,0$ м, $p_{опр} \approx 100$ кПа	13,3/12,5	17,5/19,0	20,4/24,7
	Суглинок мягкопластичный, $H_{отбора}=5,0$ м, $p_{опр} \approx 100$ кПа	12,1/14	16,8/18,2	17,2/24,2
	Суглинок мягкопластичный, $H_{отбора}=7,0$ м, $p_{опр} \approx 100$ кПа	15,1/16,5	19,2/25,8	21,6/29,4
	Суглинок мягкопластичный, $H_{отбора}=3,0$ м, $p_{опр} \approx 150$ кПа ²	14,2/13,0	18,5/20,2	22,5/27,0
Петухов А.А. [99]	Суглинок мягкопластичный, $H_{отбора}=2,2-2,4$ м, $p_{опр} \approx 1$ МПа	13,3/-	18,3/-	22,2/-
	Суглинок текучепластичный, $H_{отбора}=2,6-2,8$ м, $p_{опр} \approx 1$ МПа	15,0/-	18,2/-	21,6/-
	Суглинок текучий, $H_{отбора}=3,4-3,6$ м, $p_{опр} \approx 1$ МПа	13,3/1,5	18,4/2,6	19,1/6,8
Степанов М.А.	Суглинок тугопластичный, $H_{отбора}=2,0$ м, $p_{опр} \approx 250-300$ кПа	18,0/10,8	34,0/25,0	26,3/18,9
	Суглинок тугопластичный, $H_{отбора}=2,5$ м, $p_{опр} \approx 250-300$ кПа	24,5/16,2	38,0/30,6	41,4/36,9
	Суглинок мягкопластичный, $H_{отбора}=3,0$ м, $p_{опр} \approx 250-300$ кПа	14,2/10,0	25,0/17,0	24,0/22,3

Анализируя данные таблицы 2.2 можно заметить, что значения характеристик, вычисленных по предложенному алгоритму, оказываются несколько выше, чем определенные по лабораторным испытаниям. Это объясняется тем, что предложенный алгоритм позволяет определять изменение механических характеристик в контактном слое грунта (как правило, в пределах $0,1d$), тогда как для лабораторных испытаний отбираются монолиты грунта, размер которых превышает размеры контактной области. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм определения механических характеристик контактного слоя грунта в результате опрессовки стенок скважины

избыточным давлением, позволяет получать хорошую сходимость с данными прямых лабораторных определений: в среднем отклонение составляет 15% при минимальном значении 2% и максимальном значении 25%.

2.4.3. Несущая способность фрагментов буринъекционных свай

После стабилизации значений напряжений производились статические испытания фрагментов буринъекционных свай на действие вдавливающей нагрузки (рис. 2.10). Результаты проведенных испытаний представлены на рисунке 2.21. Несущая способность свай формировалась только за счет боковой поверхности, т.к. экспериментальный лоток имел круглое отверстие на дне, в результате чего острие сваи не имело опирания.

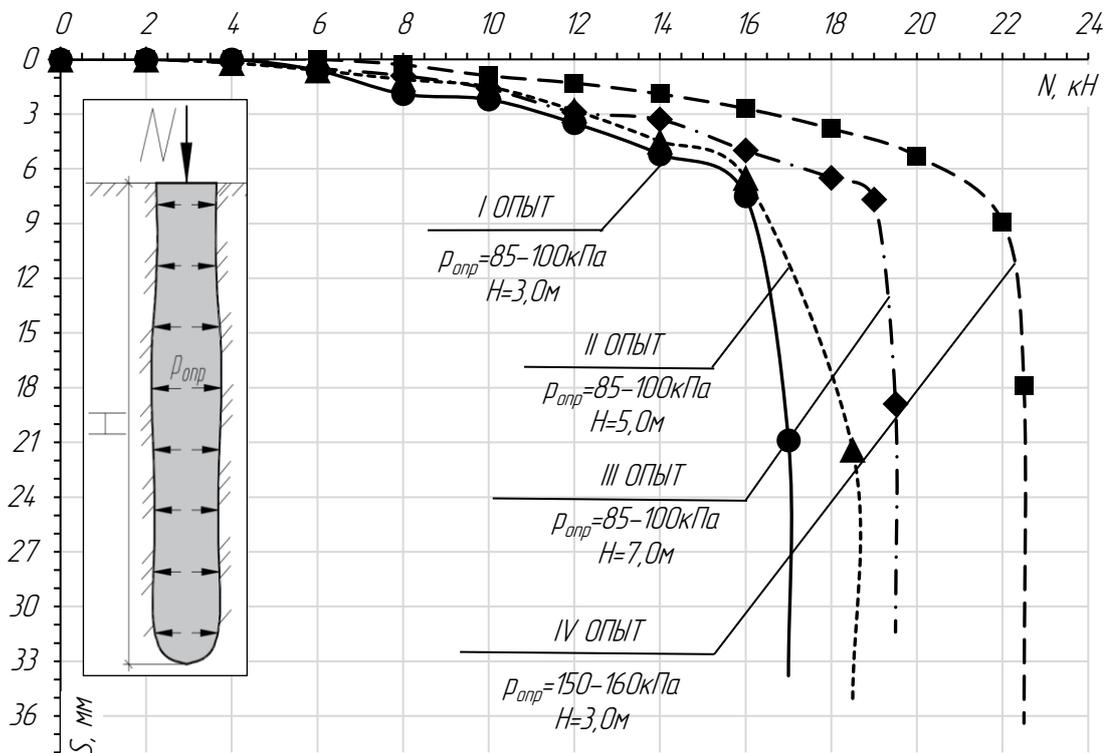


Рисунок 2.21. Результаты испытаний фрагментов БИС.

Анализ графиков «нагрузка-осадка» для всех испытанных фрагментов буринъекционных свай, отличающихся давлением опрессовки и условной глубиной устройства, позволяет выделить два характерных участка их работы:

1. **Линейный участок (I)**, характеризующийся быстро затухающими значениями осадок в пределах 0,9 – 1,9 мм и сохраняющий практически линейный характер работы до значения нагрузки, которая составляет $(0,40-0,55)N$ от максимально приложенной. В соответствии с рисунком 2.21 установлено, что графики работы фрагментов свай в первых 3-х опытах практически совпадают, а график работы в IV опыте оказался выше и линейный участок продолжительнее, откуда можно сделать вывод, что на характер

линейного участка работы буроинъекционных свай влияет только величина избыточного давления опрессовки и при увеличении продолжительность линейного участка возрастает;

2. Нелинейный участок (II), характеризующийся явным упруго-пластическим характером работы, что проявляется более интенсивным приращением осадки фрагментов свай при их продолжительной стабилизации. Окончание рассматриваемого участка работы характеризуется неограниченным ростом деформаций при постоянстве приложенной нагрузки (срыв свай). Анализ графиков показывает, что на нелинейном участке на характер работы свай дополнительно влияет и глубина их устройства. С ростом глубины увеличивается предельная нагрузка, которую может воспринимать свая: при равенстве давления опрессовки ($p_{опр}=85-100$ кПа) на условной глубине 3 м предельная нагрузка составила 16 кН, на условной глубине 5 м – 18,5 кН и 19,5 кН на условной глубине 7 м. Прирост предельной нагрузки на глубине 5 м и 7 м относительно глубины 3 м составил 8,5% и 18% соответственно. Увеличение избыточного давления опрессовки позволяет существенно увеличить их несущую способность: так, при увеличении давления опрессовки в 2 раза на условной глубине 3 м предельная несущая нагрузка увеличилась с 16 кН до 22 кН, прирост составил 30%.

Дополнительно определялась несущая способность фрагментов буроинъекционных свай в соответствии с указаниями п.7.2.10 СП 24.13330. Данные расчета представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Несущая способность буроинъекционных свай.

№ п/п	Способ определения несущей способности	Несущая способность, кН			
		Отклонение от фактического значения, %			
		I опыт	II опыт	III опыт	IV опыт
1	Статические испытания	$\frac{16}{-}$	$\frac{18,5}{-}$	$\frac{19,5}{-}$	$\frac{22}{-}$
2	По СП24.13330.2021 при $d=d_{скв}=200$ мм	$\frac{9,0}{-43,5}$	$\frac{10,9}{-39,7}$	$\frac{11,5}{-39,5}$	$\frac{8,5}{-61,2}$
3	По СП24.13330.2021 при $d=d_{факт}$	$\frac{11,9}{-25,8}$	$\frac{13,3}{-26,1}$	$\frac{13,3}{-29,9}$	$\frac{12,4}{-43,7}$

Из таблицы 2.3 видно, что в случае расчета несущей способности буроинъекционных свай по СП 24.13330, приняв диаметр свай равным первоначальному диаметру скважины, разница между расчетным и фактическим значением может составлять более 60% (до 2,5 раз). В случае, если диаметр свай принять равным фактическому диаметру (по результатам инструментального измерения в соответствии с таблицей 2.1), максимальная разница между расчетным и фактическим значением составляет в пределах 25,8-43,7%. В обоих случаях нормативный метод расчета не позволяет учесть влияние избыточного давления опрессовки на несущую способность буроинъекционных свай: для

I опыта и IV опыта несущая способность по СП24.13330 практически совпадают (незначительная разница возникает за счет разной длины фрагментов буринъекционных свай), в то время как их реальная несущая способность увеличивается в 1,4 раза (на 30%). Очевидно, что это связано с изменением третьего параметра, входящего в расчетную формулу – сопротивлением грунта по боковой поверхности свай f_i .

Зная фактические геометрические параметры фрагментов буринъекционных свай и величину предельной нагрузки, были определены фактические значения сопротивления грунта по боковой поверхности буринъекционных свай f_i в зависимости от глубины их устройства и избыточного давления опрессовки. На рисунке 2.22 представлено сравнение фактических значений f_i и значений, приведенных в таблице 7.3 СП24.13330, для суглинка мягкопластичной консистенции при $I_L=0,53$.

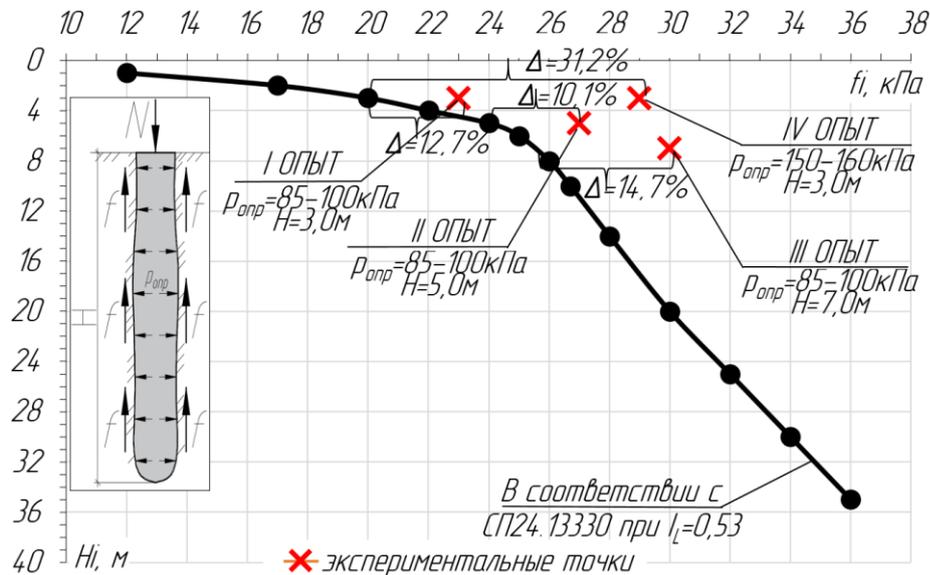


Рисунок 2.22. Изменение сопротивления грунта по боковой поверхности БИС в зависимости от глубины устройства (H) и давления опрессовки ($p_{опр}$) для суглинка при $I_L=0,53$.

В соответствии с данными рисунка 2.22 установлено, что величина фактического сопротивления грунта по боковой поверхности буринъекционных свай f_i может практически в половину отличаться от нормативной величины: при избыточном давлении опрессовки в пределах 150-160 кПа на условной глубине устройства 3 м фактическое сопротивление по боковой поверхности составило 29 кПа при нормативной величине 20 кПа. Также в соответствии с представленным графиком установлено, что на величину фактического сопротивления по боковой поверхности буринъекционных свай при $I_L=const$ влияет как глубина устройства буринъекционных свай H (аналогично нормативным значениям в соответствии с СП 24.13330), так и величина давления опрессовки $p_{опр}$ (СП 24.13330 не учитывается). Причем существенный вклад при формировании сопротивления грунта по боковой поверхности оказывает именно величина давления

опрессовки: при $p_{опр}=85-100$ кПа увеличение сопротивления по боковой поверхности по отношению к нормативным табличным данным на глубинах 3 м, 5 м и 7 м составило 13%, 10% и 15% соответственно, в то время как при $p_{опр}=150-160$ кПа на условной глубине 3 м увеличение составило 31%.

Анализируя графики изменения сопротивления по боковой поверхности глинистых грунтов в зависимости от глубины устройства и показателя текучести (рис. 2.23), построенные на основании данных СП 24.13330, можно выделить два характерных участка: выражено нелинейный (до глубины 6 м) и условно линейный (с глубины 6 м).

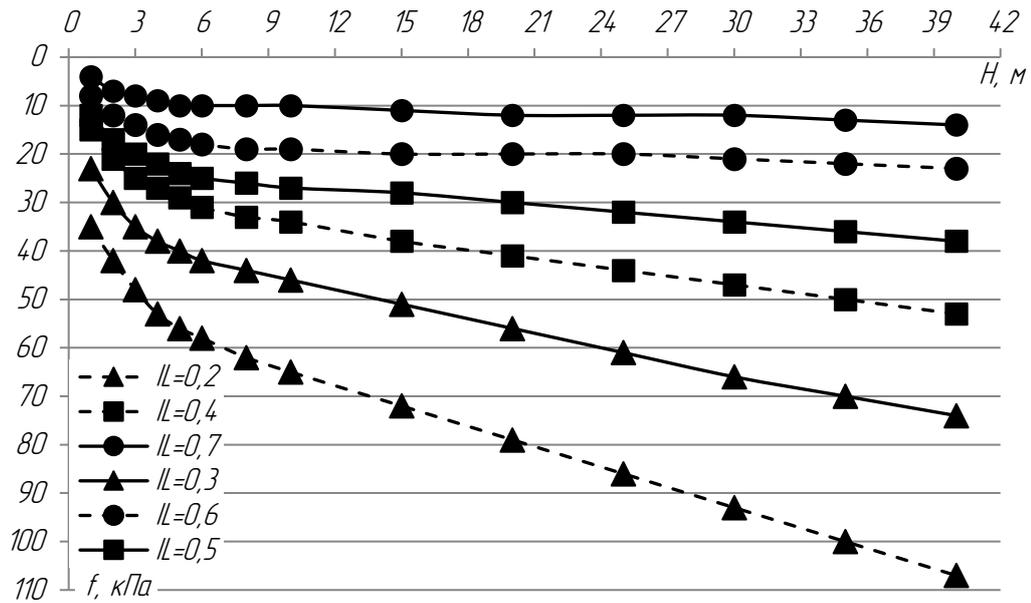


Рисунок 2.23. Изменение сопротивления грунта по боковой поверхности свай в зависимости от глубины их устройства и показателя текучести.

Нелинейный участок рассматриваемой зависимости можно представить в виде степенной функции, связывающей характер изменения величины бокового сопротивления от глубины и показателя текучести:

$$f = A(I_L)h^{\alpha(I_L)} \leftrightarrow \ln f = \ln A(I_L) + \alpha(I_L) \ln h \quad (2.30)$$

где A и α – амплитуда и показатель степени степенной функции.

На рисунке 2.24 представлены соответствующие значения амплитуды (A) и показателя степени (α) степенной функции в зависимости от показателя текучести I_L для нелинейного участка.

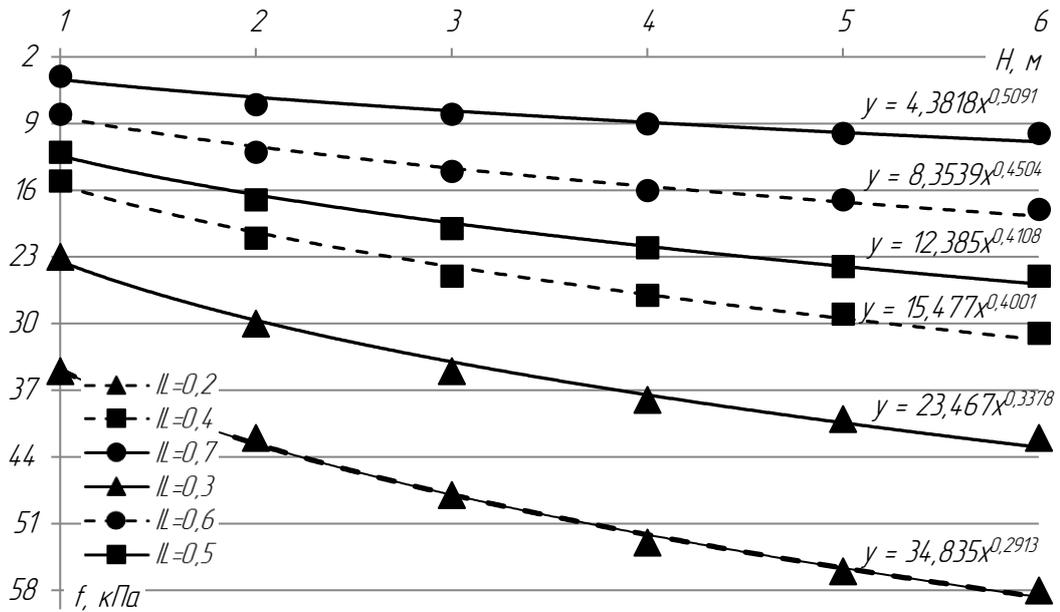


Рисунок 2.24. Изменение значения амплитуды (A) и показателя (α) степенной функции в зависимости от показателя текучести I_L .

Используя данные рисунка 2.24 определено, что зависимость показателя степени (α) степенной функции (2.30) от показателя текучести хорошо аппроксимируется линейной зависимостью следующего вида:

$$\alpha(I_L) = 0,414 I_L + 0,22 \quad (2.31)$$

В свою очередь амплитуда (A) степенной функции (2.30) достаточно хорошо определяется следующим выражением:

$$A(I_L) = e^{-3,95I_L + 4,35} \quad (2.32)$$

Линейная часть зависимости изменения сопротивления грунта по боковой поверхности глинистых грунтов в зависимости от глубины устройства и показателя текучести (рис. 2.23) может быть записана в следующей форме:

$$f = k(h - 6) \quad (2.33)$$

где угловой коэффициент k линейной части графиков (с глубины 6 м), изображенных на рисунке 2.23, определяется как отношение разности сопротивления грунта по боковой поверхности свай к соответствующей разности глубины их устройства ($k = \frac{\Delta f}{\Delta H}$).

Зависимость углового коэффициента k для линейной части величины сопротивления от показателя текучести, полученных на основе обработки нормативных данных, с достаточной степенью сходимости может быть представлена в следующем виде:

$$k = 5,9e^{-6I_L} \quad (2.34)$$

Таким образом, на основе обработки нормативных данных СП 24.13330 изменение сопротивления глинистых грунтов по боковой поверхности в зависимости от глубины устройства и показателя текучести может быть определено следующим образом:

$$f(h, I_L) = \begin{cases} e^{-3,95I_L+4,35} h^{0,414 I_L+0,22}; & \text{при } h \leq 6 \\ e^{-3,95I_L+4,35} 6^{0,414 I_L+0,22} + 5,9e^{-6I_L} (h-6); & \text{при } h > 6 \end{cases} \quad (2.35)$$

Как отмечено выше, при устройстве буроинъекционных свай существенный вклад при формировании сопротивления грунта по боковой поверхности оказывает величина избыточного давления опрессовки $p_{опр}$, так как в околосвайной зоне грунта формируется остаточное напряженное состояние $\sigma_{r,i}$, вызывающее дополнительное обжатие ствола сваи. Допустив, что характер зависимостей изменения величин бокового сопротивления (2.35) при действии избыточного давления опрессовки не изменяется, а изменяются лишь абсолютные величины показателей степеней и их амплитуды в зависимости от величины остаточных напряжений, получаем следующие выражения, основанные на экспериментальных данных (рис. 2.22):

$$\alpha_{опр} (I_L, p_{опр} \neq 0) = 0,414 I_L + 0,1 \quad (2.36)$$

$$A_{опр} (I_L, p_{опр} \neq 0) = e^{-3,95I_L+4,35+1,19 \sigma_{r,ост}^2-0,06\sigma_{r,ост}+0,4} \quad (2.37)$$

Таким образом, итоговая формула для вычисления сопротивления грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай с учетом возникающих остаточных напряжений при воздействии избыточным давлением опрессовки запишется следующим образом:

$$f(h, I_L, p_{опр} \neq 0) = \begin{cases} A_{опр} h^{\alpha_{опр}}; & \text{при } h \leq 7 \\ A_{опр} 7^{\alpha_{опр}} + 5,9e^{-6I_L} (h-7); & \text{при } h > 7 \end{cases} \quad (2.38)$$

Следует отметить, что формула (2.38) получена на основании обработки экспериментальных данных, выполнявшихся в суглинке мягкопластичной консистенции ($I_L \approx 0,5-0,6$) при избыточном давлении опрессовки в пределах $p_{опр} = 85-160$ кПа. Однако, использование данной формулы для определения несущей способности по боковой поверхности буроинъекционных свай, выполненных в суглинках и супесях с показателем текучести в пределах $0,4-1,1$ с созданием избыточного давления опрессовки по стволу до 400 кПа дает хорошую сходимость с экспериментальными данными (см. Главу IV). Использование же формулы (2.38) при определении сопротивления по боковой поверхности буроинъекционных свай, выполняемых при большем давлении опрессовки, дает завышенные результаты. Поэтому использование формулы (2.38) обосновано для глинистых грунтов с показателем текучести $I_L > 0,4$ при создании избыточного давления $p_{опр} \leq 400$ кПа. Использование формулы для глинистых грунтов другой консистенции и большего избыточного давления опрессовки требует дополнительного обоснования при проведении дополнительных экспериментальных исследований.

2.5. Выводы по главе II

1. На основании обработки результатов лабораторных экспериментов и сопоставления с исследованиями других авторов получена экспериментально-теоретическая зависимость по определению изменения радиальных напряжений в массиве грунта при опрессовке ствола буроинъекционных свай избыточным давлением. Зависимость позволяет учесть глубину расположения слоя грунта, избыточное давление опрессовки, начальные геометрические параметры скважины и удаленность от ствола свай. Установлено, что с увеличением избыточного давления опрессовки свыше 200 кПа зона изменения напряженного состояния распространяется в радиальном направлении менее интенсивно, что приводит к концентрации напряжений на стенках скважины и может привести к нарушению сплошности грунта и образованию гидроразрывов. Используя полученную зависимость возможно оценивать зону изменения напряженного состояния грунта и тем самым подбирать шаг размещения буроинъекционных свай.

2. Получена экспериментально-теоретическая зависимость по определению остаточных радиальных напряжений, вызывающих дополнительное обжатие ствола буроинъекционных свай. Зависимость позволяет учесть глубину расположения слоя грунта, избыточное давление опрессовки, начальные геометрические параметры скважины и удаленность от ствола свай. Используя зависимость возможно оценивать изменение дополнительного обжимающего давления по длине ствола свай, что важно при расчете несущей способности буроинъекционной свай. Установлено, что в мягкопластичном ($I_L \approx 0,50-0,60$) суглинке в контактном слое для глубины в пределах 5 м $\sigma_{r,ост} \approx 0,5\sigma_r$, для глубины в пределах 5 – 15 м $\sigma_{r,ост} \approx 0,45\sigma_r$, для глубины в пределах 15 – 20 м $\sigma_{r,ост} \approx 0,35\sigma_r$, для глубины в пределах 20 – 25 м $\sigma_{r,ост} \approx 0,30\sigma_r$, а для глубины более 25 м величина остаточных напряжений составляет менее 20% начальной величины, что обусловлено возрастающей с глубиной величиной горизонтального природного давления грунта.

3. Выполнена оценка изменения диаметра буроинъекционных свай в зависимости от технологических параметров их устройства и сопоставление с различными аналитическими методиками расчета. Установлено, что достаточным для инженерной практики методом определения среднего диаметра буроинъекционных свай в результате их опрессовки является использование простых методик, предложенных в работах *Abd Elaziz and El Naggar* [8] и Мишакова В.А. и др. [86], основанных на использовании количества закачиваемого объема раствора в скважину. Получаемые по расчету результаты хорошо согласуются с опытными данными: отклонение в среднем находится в пределах 5-10%.

4. Получена экспериментально-теоретическая зависимость, характеризующая изменение плотности глинистого грунта контактного слоя при устройстве буроинъекционных свай в зависимости от начального значения плотности, показателя текучести, глубины расположения и величины избыточного давления опрессовки. С использованием данной зависимости предложен алгоритм определения механических характеристик грунта контактной зоны на основании нахождения коэффициентов, показывающих во сколько раз механические после воздействия избыточным давлением опрессовки превосходят начальные величины. Предложенный алгоритм дает хорошую сходимость с данными прямых лабораторных определений.

5. Установлено, что величина фактического сопротивления грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай может до 2 раз отличаться от величины, рекомендуемой таблицами СП 24.13330. Существенный вклад при формировании сопротивления грунта по боковой поверхности свай оказывает величина избыточного давления опрессовки p_{opr} , что действующими нормами не учитывается. Для определения величины сопротивления глинистого грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай предложена зависимость (2.38) на основе закономерностей, заложенных в СП 24.13330, которая дополнительно позволяет учитывать избыточное давление опрессовки p_{opr} . Использование полученной зависимости (2.38) обеспечивает сходимость теоретических и экспериментальных величин сопротивления глинистого грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай. Зависимость справедлива для глинистых грунтов с показателем текучести $I_L > 0,4$ при величине избыточного давления $p_{opr} \leq 400$ кПа.

ГЛАВА III

НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

3.1. Цель и задачи натурных исследований

Целью проведения крупномасштабных натурных экспериментальных исследований являлось уточнение особенностей работы буроинъекционных свай в пылевато-глинистых грунтах и выявление влияния технологии изготовления на их взаимодействие с грунтовым основанием.

Для достижения поставленной цели в ходе проведения экспериментального исследования решались следующие задачи:

- определение влияния технологии устройства свай (с теряемым и извлекаемым сердечником, с опрессовкой и без опрессовки избыточным давлением) на их несущую способность в условиях статических вдавливающих и выдергивающих нагрузок;
- определение вклада в общую несущую способность буроинъекционной сваи ее боковой поверхности и пяты;
- выявление закономерностей изменения физико-механических свойств грунтов в околосвайной зоне после устройства буроинъекционных свай;
- оценка геометрических параметров стволов опытных свай.

Экспериментальные исследования выполнялись в период 09.2018 г. – 01.2022 г.

3.2. Место проведения натурального экспериментального исследования

Экспериментальная площадка №1 для проведения натурных исследований была расположена в Центральном административного округе г. Тюмени на территории реконструируемого здания МАДОУ д/с № 183 по адресу ул. Мурманская, 19. На данной площадке выполнялись сваи по технологии с теряемым (сваи «Атлант» [70]) и извлекаемым сердечником (сваи «Нормаль» [27-29, 108]) без опрессовки скважины избыточным давлением раствора. Оценивалась несущая способность свай при различных вариантах статического нагружения, а также производилась их откопка и анализ изменения физико-механических характеристик грунта и состояния стволов буроинъекционных свай.

Всего на экспериментальной площадке было выполнено 9 натурных буроинъекционных свай, схема расположения которых представлена на рисунке 3.1. Характеристика опытных свай представлена в таблице 3.1.

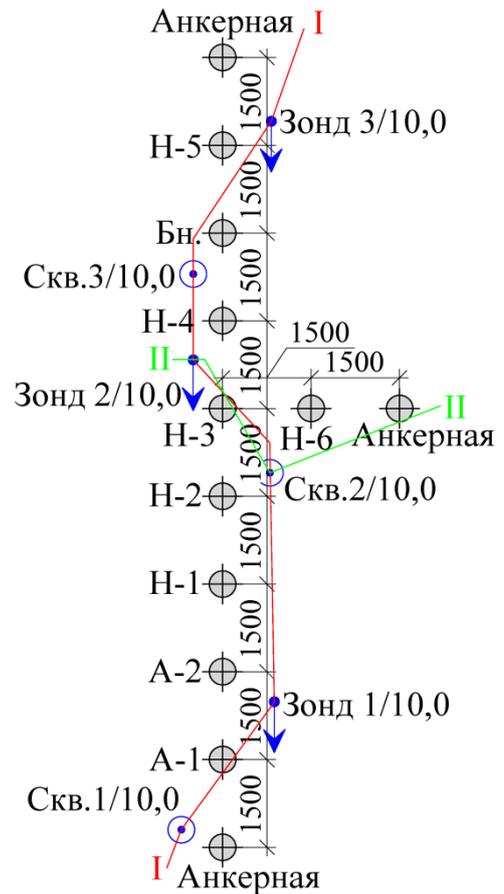


Рисунок 3.1. Схема расположения свай на площадке №1.

Таблица 3.1. Характеристика опытных буринъекционных свай на площадке №1.

№ п/п	Обозначение	Технология изготовления	Начальный диаметр, м	Длина, м	Тип армирования
1	А-1	«Атлант»	0,20	6,0	Буровые штанги Ø60
2	А-2	«Атлант»	0,20	6,0	Буровые штанги Ø60
3	Н-1	«Нормаль»	0,20	6,0	Арматурный каркас 3Ø14 А400
4	Н-2	«Нормаль»	0,20	6,0	Арматурный каркас 3Ø14 А400
5	Н-3	«Нормаль»	0,20	6,0	Арматурный стержень Ø32 А400
6	Н-4	«Нормаль»	0,20	6,0	Стальная труба Ø57х5
7	Н-5	«Нормаль»	0,34	6,0	Арматурный каркас 3Ø14 А400
8	Н-6	«Нормаль»	0,20	6,0	Без армирования
9	Бн	Буринабивная	0,20	6,0	Арматурный каркас 3Ø14 А400

В верхней части площадки развиты насыпные грунты (ИГЭ-1), представленные почвенно-растительным слоем, песком с включением растительности и черноземом. Насыпные грунты распространены с поверхности повсеместно общей мощностью 1,5 – 1,6 м. Техногенные грунты подстилаются толщей озерно-аллювиальных четвертичных отложений, которые в основном представлены глинистыми грунтами: в верхней части до глубины 2,0 м суглинками тугопластичными (ИГЭ-2), подстилаемыми суглинками

мягкопластичными (ИГЭ-3) мощностью слоя 3,6–4,9 м. С глубины 5,6–7,7 м залегает слой песка мелкого водонасыщенного средней плотности (ИГЭ-4) мощностью 0,8–2,1 м. Далее расположен слой текучей супеси (ИГЭ-5) мощностью 0,8–1,1 м, который подстилается суглинком мягкопластичным (ИГЭ-3). Грунтовые воды вскрыты на глубине 3,5 м от дневной поверхности в слое суглинка мягкопластичного. Отбор монолитов до глубины 10,0 м выполнялся в соответствии с ГОСТ 12071-2014 установкой УГБ-1ВС механическим колонковым способом «в сухую». Инженерно-геологический разрез экспериментальной площадки №1 и посадка на него опытных свай представлен на рисунках 3.2 и 3.3. Так как в процессе выполнения изысканий был вскрыт переменный уровень кровли песка мелкого средней плотности, то геологические условия площадки уточнялись посредством выполнения статического зондирования навесной установкой НУСЗ-979 к УГБ-1ВС глубиной до 10,0 м.

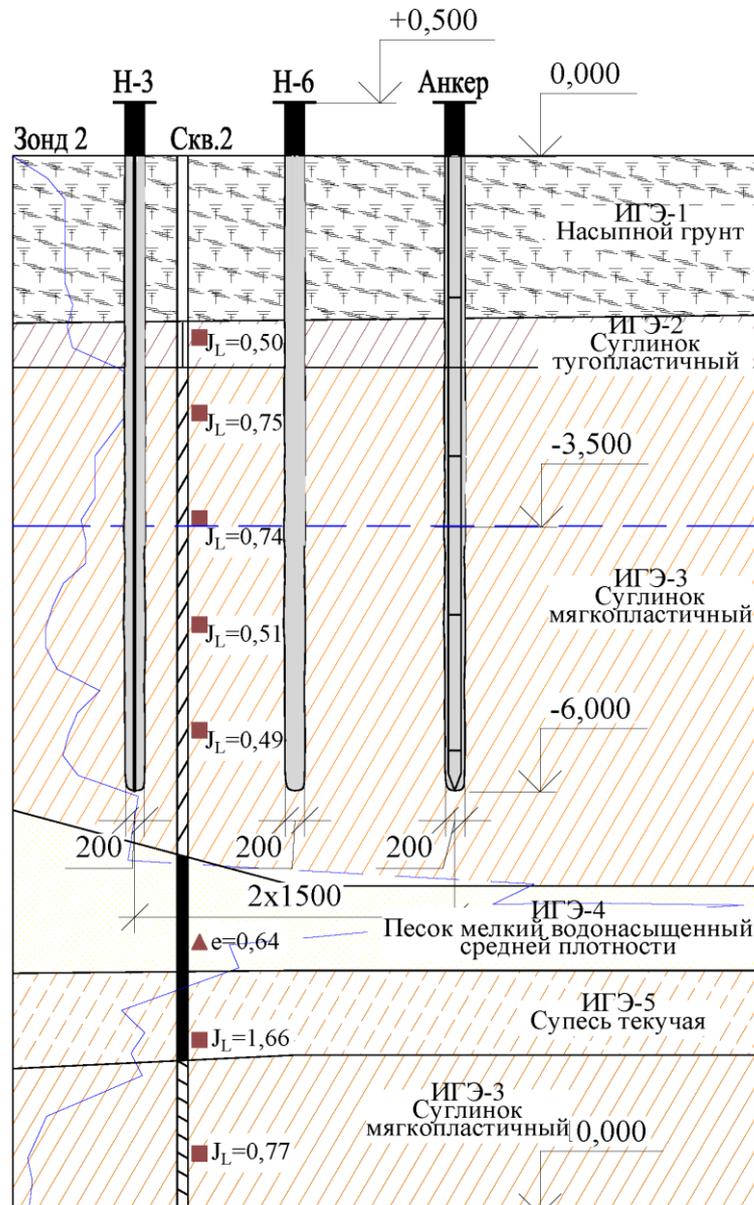


Рисунок 3.2. Посадка свай на инженерно-геологический разрез по линии II-II (площадка №1).

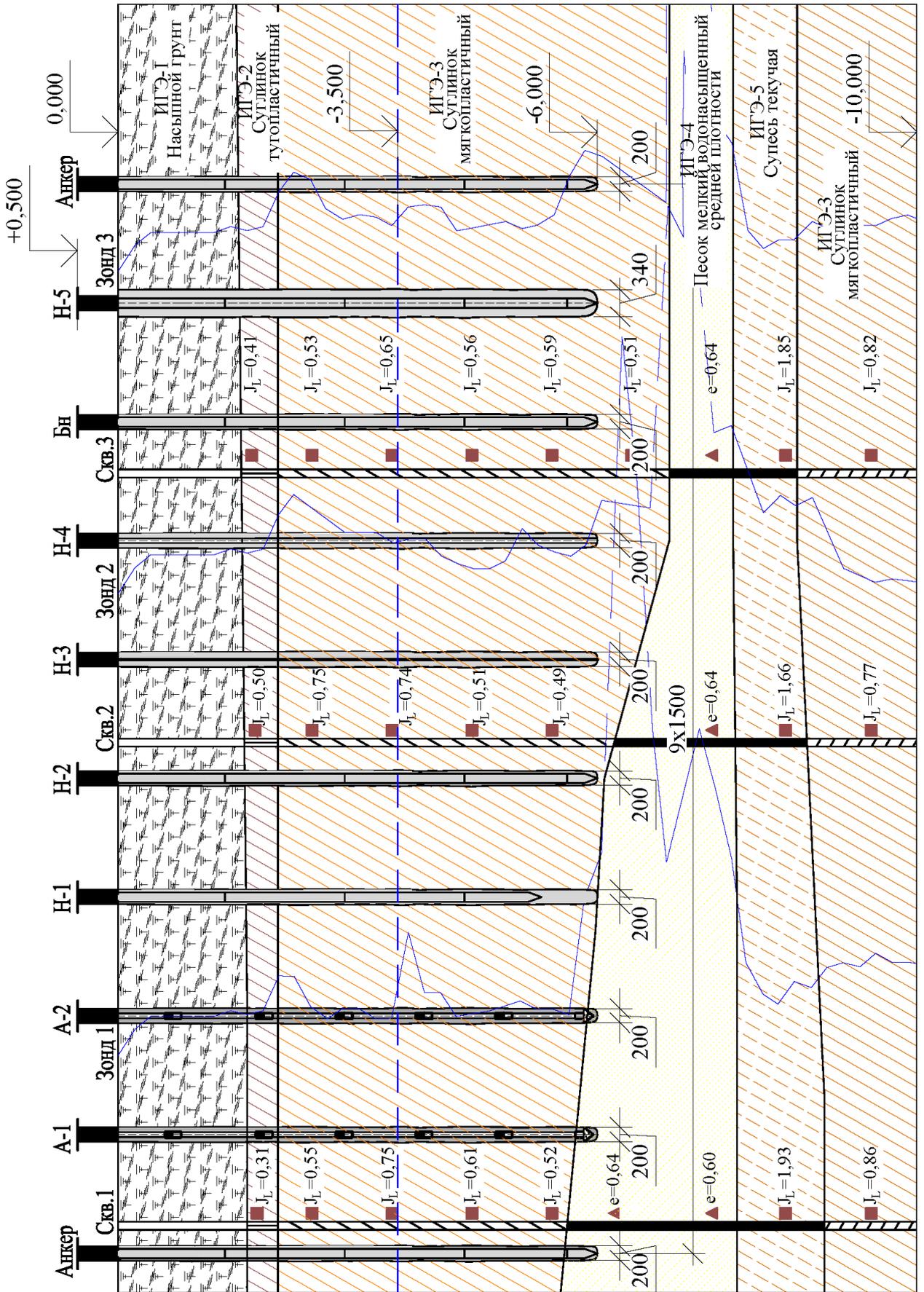


Рисунок 3.3. Посадка свай на инженерно-геологический разрез по линии I-I (площадка №1).

Определение физико-механических свойств отобранных образцов грунтов производилось на базе лаборатории геотехники и строительных материалов ФГБОУ ВО ТИУ. Осредненные физико-механические характеристики грунтов экспериментальной площадки представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Физико-механические характеристики грунтов (площадка №1).

№ ИГЭ	ИГЭ-2	ИГЭ-3	ИГЭ-4	ИГЭ-5	ИГЭ-6
Вид грунта	Суглинок тугопластичный	Суглинок мягкопластичный	Песок мелкий	Супесь текучая	Суглинок текучепластичный
W , д.ед	0,18	0,24	0,24	0,23	0,26
ρ , г/см ³	1,97	1,95	2,02	2,01	1,90
e , д.е	0,62	0,74	0,60	0,63	0,79
I_L , д.е	0,31	0,53	-	1,81	0,82
I_p , д.е	0,13	0,14	-	0,4	0,15
c , кПа	17,0	9,0	0	1,0	3,0
φ , град.	15	22	37	17	20
E_{oed} , МПа	4,9	4,4	17,9	5,5	5,4

Экспериментальная площадка №2 располагалась в Калининском административного округе г. Тюмени на территории жилого дома по адресу ул. Бабарынка, 16 Б в рамках выполнения работ по усилению фундаментов. На данной площадке выполнялись сваи по технологии с теряемым сердечником (сваи «Атлант» [70]) с созданием по стволу сваи избыточного давления опрессовки и оценивалась их несущая способность в зависимости от давления опрессовки и количества нагнетаемого в скважину количества раствора.

Всего на экспериментальной площадке было выполнено 3 натурных буроинъекционных сваи, характеристика которых представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Характеристика опытных буроинъекционных свай (площадка №2).

№ п/п	Обозначение	Начальный диаметр, м	Длина, м	Количество избыточного раствора, нагнетаемого в скважину, м ³	Давление опрессовки, кПа
1	Б-1	0,20	14,0	0,0	0,0
2	Б-2	0,20	14,0	0,10	200
3	Б-3	0,20	14,0	0,20	350

Инженерно-геологическое строение площадки №2 принято в соответствии с Техническим отчетом по результатам инженерно-геологических изысканий «8-ми этажный многоквартирный жилой дом, по адресу: г. Тюмень, ул. Бабарынка, 16Б», выполненных ООО «НПК Статика 72» в 2019 году. Посадка свай на инженерно-геологический разрез представлена на рисунке 3.4. Сваи выполнялись из подвала жилого дома, где согласно изысканиям, с поверхности до глубины 8 м залегает слой суглинка мягкопластичного (ИГЭ-1), для которого $\rho=1,78$ г/см³, $W=39,2\%$, $e=0,71$, $I_L=0,63$, $E=4,5$ МПа, $\nu=0,37$, $C=0,012$ МПа, $\varphi=13^\circ$. С глубины 8 м залегает слой суглинка тугопластичного (ИГЭ-2), для которого $\rho=1,86$ г/см³, $W=29,6\%$, $e=0,60$, $I_L=0,32$, $E=7,8$ МПа, $\nu=0,37$, $C=0,023$ МПа, $\varphi=19^\circ$.

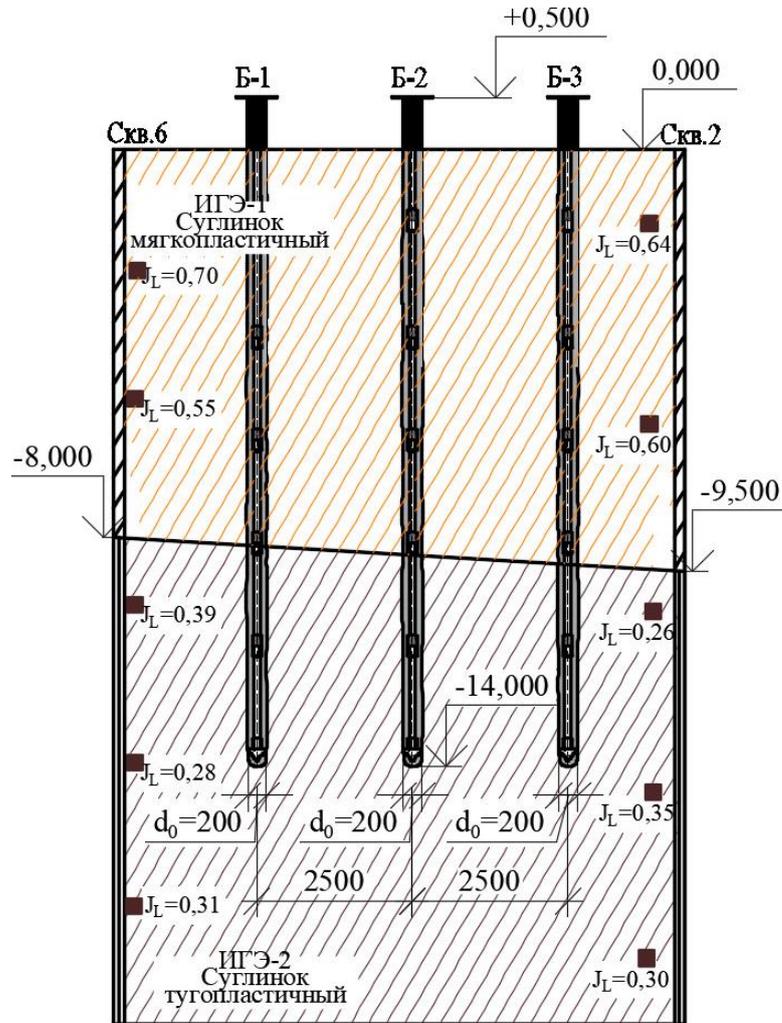


Рисунок 3.4. Посадка свай на инженерно-геологический разрез (площадка №2).

3.3. Подготовка к проведению натурального эксперимента

3.3.1. Последовательность устройства опытных буронъекционных свай

Устройство буронъекционных свай на площадке №1 выполнялось самоходной установкой на гусеничном ходу *Figaro 400*. Для приготовления и подачи под давлением растворной смеси (промывочного и рабочего раствора) использовался инъекционный комплекс *MINI* с весовым терминалом, состоящий из миксерной станции и инъекционного насоса с максимальным создаваемым давлением 10 МПа.

Технология устройства свай с извлекаемым сердечником (сваи «Нормаль») на экспериментальной площадке №1 включала выполнение следующих основных этапов:

Этап 1: разметка мест расположения свай и центрирование бурового станка над местом устройства свай;

Этап 2: бурение скважины в грунтовом основании вертикально вниз. Первая буровая штанга оснащалась буровым долотом с диаметром лопастей 0,20 м (0,34 м), имеющим сопла для подачи цементного раствора. Погружение штанги в грунтовый массив выполнялось с ее посекционным наращиванием. Подача последующих штанг в грунт

производилась с постоянной скоростью погружения не более 0,5 м/мин. Одновременно с забуриванием штанг в скважину подавался промывочный раствор, выходящий под давлением из сопел долота. В качестве промывочного раствора использовалась водоцементная суспензия, состоящая из портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н и воды, приготовленная в соотношении В/Ц=1,0. Бурение выполнялось при постоянном выходе раствора и выноса бурового шлама из устья скважины до достижения проектной глубины;

Этап 3: после достижения проектной глубины при постоянном вращении штанги 20-30 об/мин через сопла бурового долота под давлением 0,5 – 0,7 МПа нагнетался густой цементный рабочий раствор, который вытеснял буровой шлам и обеспечивал несущую способность сваи по грунту. Рабочий раствор был приготовлен в соответствии с исследованиями Самохвалова М.А. [110]: портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н и техническая вода с соотношением В/Ц=0,5..0,6 с добавлением 1 % силиката натрия. Процесс нагнетания рабочего раствора заканчивался после прекращения выноса из устья скважины бурового шлама и начала выхода темной, плотной рабочей смеси;

Этап 4: далее производилось посекционное извлечение буровых штанг из тела сваи с подачей в скважину дополнительного количества рабочего раствора для заполнения освобожденного объема;

Этап 5: по завершению извлечения всех буровых штанг в незатвердевший раствор тела сваи устанавливался армирующий элемент на требуемую глубину;

Этап 6: на последнем этапе осуществлялось погружение в тело сваи на глубину 300 мм стального оголовка Ø194x5 мм. К внутренней полости трубы предварительно приваривались 4 арматурных стержня Ø14 А500С длиной 1100 мм для анкеровки в теле сваи. Оголовок выходил из устья на высоту 500 мм и имел приваренную прямоугольную пластину размерами 340x340x10 мм для установки на нее гидравлического домкрата.

Погружение каркаса на всю длину буроинъекционной сваи является операцией трудоемкой и иногда невыполнимой по ряду причин: необходимость сварки отправочных марок арматурного каркаса (как правило, длиной не более 2,0 м) между собой; высокое сопротивление цементного раствора; малый диаметр скважины; сложность обеспечения строго вертикального погружения арматурного каркаса. Поэтому возникает вопрос в определении достаточной глубины погружения арматурного каркаса в тело буроинъекционной сваи после ее формирования.

На сегодняшний день расчет свай на изгиб производится для двух случаев: для коротких «жестких» и длинных «гибких» свай. Отнесение сваи к той или иной категории осуществляется в зависимости от приведенной глубины погружения сваи в грунт:

$$\bar{l} = l \cdot \sqrt[5]{\frac{Kb_p}{\gamma_c EI}}, \quad (3.1)$$

где l – фактическая глубина погружения сваи в грунт, м; K – коэффициент пропорциональности грунта, кН/м⁴; EI – изгибная жесткость сваи, кН·м²; γ_c – коэффициент условий работы; b_p - условная ширина сваи, учитывающая ее пространственный характер работы, м.

При $\bar{l} > 1$ сваи рассматриваются как длинные «гибкие».

В грунтовых основаниях юга Тюменской области буроинъекционные сваи диаметром до 0,30 м при глубине погружения более 1,50 м работают как длинные «гибкие».

Для определения точек теоретического обрыва арматурных стержней каркаса необходимо определить распределения изгибающих моментов по длине «гибких» свай.

Изгибающий момент M , кН·м, и поперечную силу Q , кН, в поперечном сечении сваи, возникающие на глубине z , м, от расчетной поверхности грунта можно определить в соответствии с указаниями, представленными в работе Силина К.С. и др. [113]. Расчет производится в упругой постановке и основан на использовании коэффициента постели грунта, вычислении коэффициента деформации, нахождении приведенной глубины расположения требуемого сечения сваи и определении в нем величины внутренних усилий. Расчетная схема сваи представлена на рисунке 3.5а.

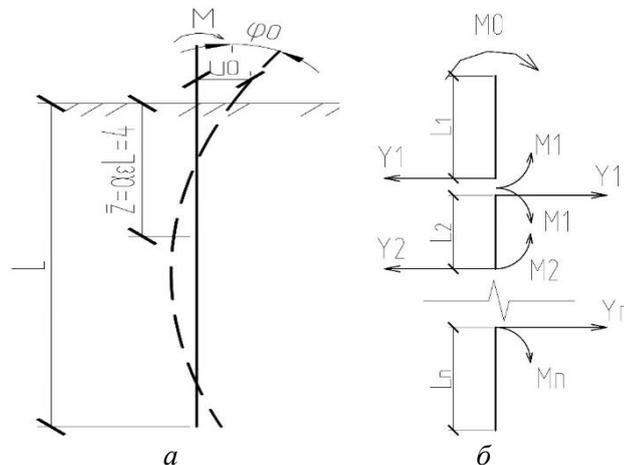


Рисунок 3.5. Схема к расчету свай по методу Силина К.С. (а) и Симвулиди И.А. (б).

В общем случае расчет выполняется по следующим формулам:

$$M_z = \alpha_c^2 EI u_0 A_3 - \alpha_c EI \phi_0 B_3 + M_1 C_3 + \frac{H_1}{\alpha_c} D_3 \quad (3.2)$$

$$Q_z = \alpha_c^3 EI u_0 A_4 - \alpha_c^2 EI \phi_0 B_4 + \alpha_c M_1 C_4 + H_1 D_4 \quad (3.3)$$

где α_c – коэффициент деформации сваи в грунте, м⁻¹; A_i , B_i , C_i , D_i – функции влияния, определяемые в зависимости от приведенной глубины сечения сваи; u_0 – горизонтальное смещение головы сваи, м; ϕ_0 – угол поворота головы сваи, град.

Формулы для нахождения соответствующих коэффициентов, функций влияния и перемещений представлены в [113]. В соответствии с методикой возможно определить изгибающие моменты и поперечные силы по длине сваи до приведенной глубины не более 4. Далее использование формул (3.2) и (3.3) дает некорректные результаты.

Для определения усилий, возникающих по всей длине сваи воспользуемся методикой, предложенной Симвулиди И.А. [114]. Расчет выполняется в условиях упругого полупространства. Расчетная схема представлена на рисунке 3.5б.

Сваю необходимо разбить сваю по длине на участки, соответствующие толще каждого инженерно-геологического элемента, и решить систему канонических уравнений:

$$\begin{cases} (-1)^{n+1} \cdot (\Omega_{n1} Y_{n-1} + \Omega_{n2} Y_n + \Omega_{n3} Y_{n+1}) + \Omega_{n4} M_{n-1} + \Omega_{n5} M_n + \Omega_{n6} M_{n+1} = 0 \\ (-1)^{n+1} \cdot (D_{n1} Y_{n-1} + D_{n2} Y_n + D_{n3} Y_{n+1}) + D_{n4} M_{n-1} + D_{n5} M_n + D_{n6} M_{n+1} = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

где n – число уравнений системы зависит от количества условно выделенных частей сваи; Y и M – неизвестные реактивные усилия и изгибающие моменты в местах расчленения сваи; Ω и D – коэффициенты системы канонических уравнений.

Формулы для нахождения коэффициентов представлены в работе [114].

По данным методикам был произведен расчет изгибающих моментов и поперечных сил по длине сваи для двух типов грунтовых условий на действие единичного момента M : однородный массив грунта, представленный текучепластичными глинами/суглинками и однородный массив грунта, представленный твердыми глинами/суглинками.

Из опыта устройства тонких буроинъекционных свай в характерных для юга Тюменской области грунтовых условиях для расчета была принята свая длиной 16,0 м, класс бетона по прочности на сжатие В25. Графическая интерпретация полученных значений приведена на рисунках 3.6-3.7.

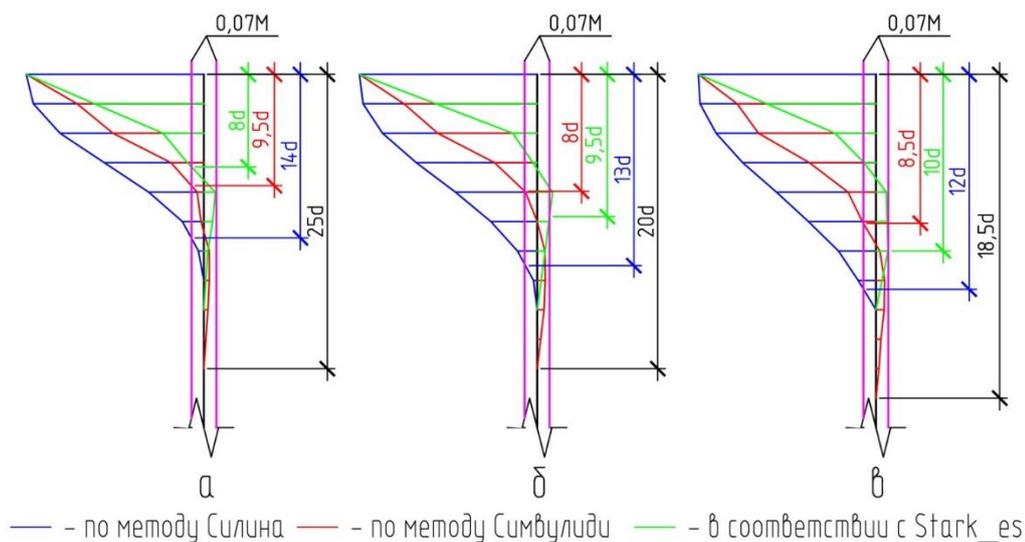


Рисунок 3.6. Распределение изгибающих моментов по длине сваи в 1 типе грунтовых условий, для свай диаметром 0,20 м (а), 0,25 м (б), 0,30 м (в).

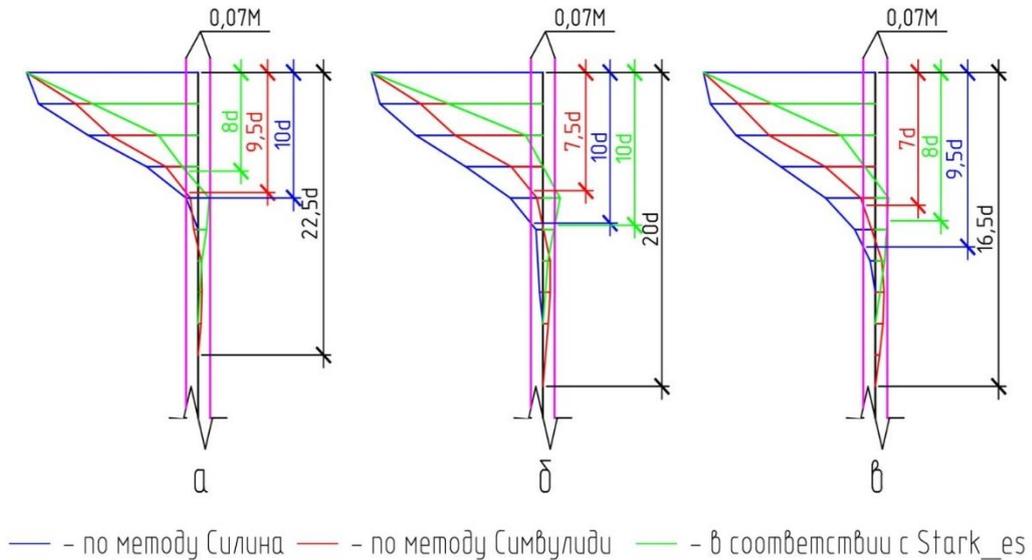


Рисунок 3.7. Распределение изгибающих моментов по длине свай в 1 типе грунтовых условий, для свай диаметром 0,20 м (а), 0,25 м (б), 0,30 м (в).

В качестве критерия для оценки максимального изгибающего момента и точек теоретического обрыва арматуры, который может воспринять сечение свай без армирования, воспользуемся отношением расчетного сопротивления бетона растяжению к сопротивлению бетона сжатию, которое в среднем составляет 7%. Данное отношение дает схожие результаты по определению точек теоретического обрыва, полученных в результате построения фактической эпюры несущей способности материала свай.

Таким образом, с достаточной степенью надежности можно принять в широком спектре грунтовых условий от текучепластичных до твердых пылевато-глинистых грунтов, глубину армирования буроинъекционных свай $14d$ для свай диаметром 0,20 м, $13d$ для свай диаметром 0,25 м и $12d$ для свай диаметром 0,30 м.

Технология устройства свай с теряемым сердечником (свай «Атлант») выполнялась в той же последовательности, что и устройство свай «Нормаль» (этапы 1-3 и 6) за исключением этапов 4 и 5, так как буровые штанги оставались в теле буроинъекционной свай в качестве армирующего элемента.

После устройства всех буроинъекционных свай производилась укладка греющего кабеля на поверхности и внутри грунта для предотвращения его промораживания и поддержания в талом состоянии на период проведения натурных экспериментальных исследований в зимнее время.

В процессе устройства опытных свай производилась фотофиксация основных этапов устройства, которые представлены на рисунке 3.8.

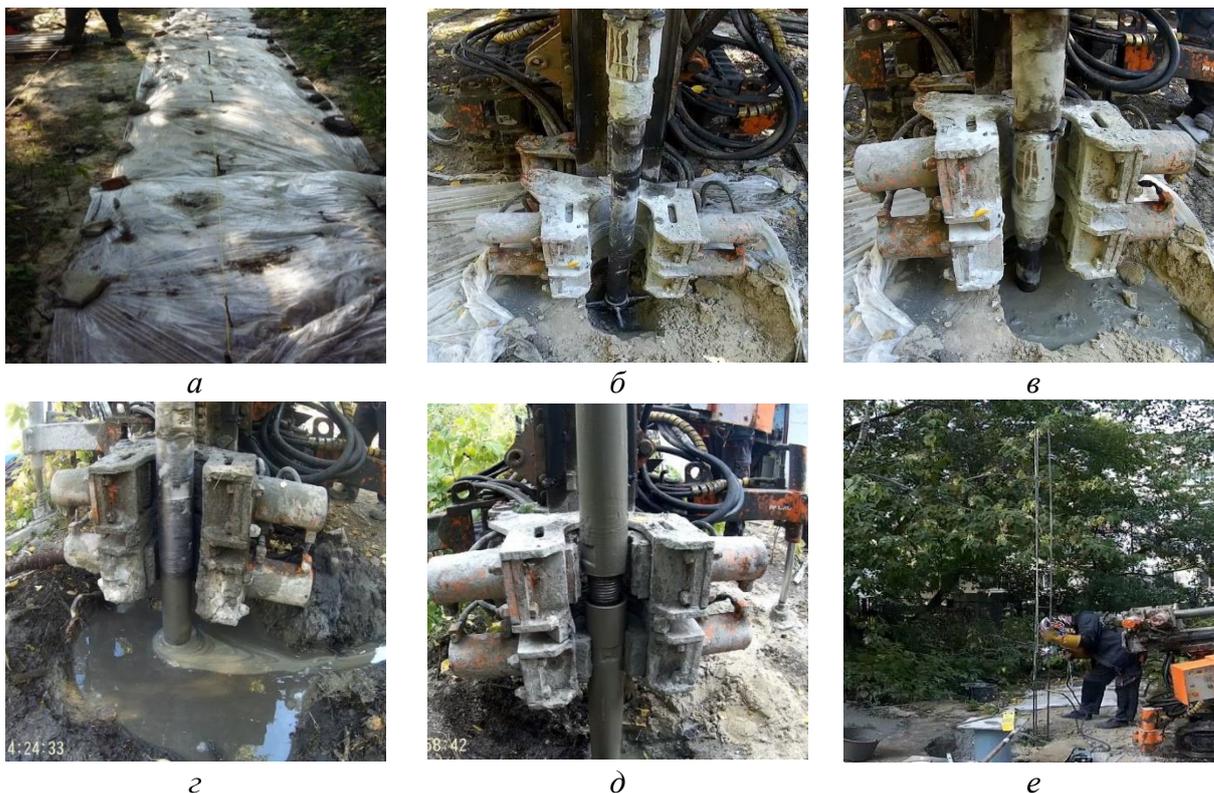


Рисунок 3.8. Процесс устройства опытных свай на экспериментальной площадке №1: *а* – разметка мест расположения свай; *б* – центрирование бурового станка и начало вертикального забуривания штанг; *в* – бурение скважины с промывочным раствором; *г* – нагнетание рабочего раствора; *д* – извлечение буровых штанг (сваи «Нормаль»); *е* – погружение в тело сваи армирующего элемента (сваи «Нормаль»).

Устройство буроинъекционных свай на экспериментальной площадке №2 выполнялось в ноябре 2021 г. по усовершенствованной автором технологии. В основу усовершенствованной технологии устройства буроинъекционных свай положены экспериментальные исследования, выполненные на площадке №1, и обнаруженные в результате дефекты и повреждения стволов свай в процессе их устройства (см. п. 3.4.4), а также анализ типичных дефектов и повреждений, характерных для буровых свай (перемешивание раствора с грунтом по периметру свай, вклинивание грунта в тело свай, приводящее к снижению прочности цементного камня, изменение сечения по высоте с возможным образованием «шеек», фильтрация воды через тело свай, расслоение бетонной смеси по высоте свай), представленных в работе Дьяконова И.П. [56].

Технический результат усовершенствованного способа устройства буроинъекционных свай состоит в повышении технологичности и качества их устройства, в обеспечении контролируемости технологических и геометрических параметров свай (расход промывочных и рабочих растворов, обеспечение заданного диаметра сваи по всей длине, давление и время опрессовки скважины), а также в повышении ее надежности и долговечности. Указанный технический результат достигается посредством:

– использования соединительных муфт, которые оснащаются винтовыми лопастями одного с буровым долотом диаметра, что способствует дополнительному разбуриванию грунта, лучшему выносу бурового шлама из скважины и обеспечению требуемого диаметра бурения по всей глубине;

– использования для формирования тела сваи разработанных автором составов рабочих растворов на основе цемента и пескоцемента [109], обладающих высокой плотностью готовой смеси, низким значением усадки и высокой прочностью цементного камня, что позволяет исключить образование дефектов по стволу буроинъекционных свай, связанных с перемешиванием и вклиниванием грунта;

– применения цветной «сигнальной пробки», сущность которой заключается в использовании красящего пигмента, добавляемого при первом замесе рабочего раствора, выход которой из скважины позволяет однозначно определить полное ее заполнение рабочим раствором;

– установки в устье скважины после выхода «сигнальной пробки» герметичной быстросъемной «тампонажной обоймы», позволяющей выполнять опрессовку скважины заданным избыточным давлением рабочего раствора, за счет чего достигается уплотнение и преднапряжение свайного основания, и обеспечивается повышение сопротивления грунта по боковой поверхности сваи.

Общий вид устраиваемой сваи представлен на рисунке 3.9. Технологическая последовательность выполнения работ по разработанной технологии следующая: в грунтовом основании 1 выполняется бурение вертикальной или наклонной скважины 2 до проектной отметки забоя. Первая трубчатая анкерная тяга 3 оснащается буровым долотом 4, имеющим сопла для подачи раствора. Погружение тяги выполняется с ее посекционным наращиванием. Анкерные тяги между собой стыкуются посредством резьбовых соединительных муфт 5, оснащенных буровыми винтовыми лопастями 14, диаметр которых равен диаметру бурового долота 4. Одновременно с забуриванием анкерных тяг в скважину подается промывочный раствор (водоцементная суспензия, состоящая из цемента и воды, приготовленная в соотношении В/Ц=0,9-1,0), выходящий под давлением. Бурение выполняется при условии постоянного выхода промывочного раствора из устья скважины.

После достижения проектной отметки забоя, при постоянном вращении анкерных тяг 3, через сопла бурового долота 4, нагнетается густой рабочий раствор с В/Ц=0,2-0,25, который вытесняет буровой шлам и обеспечивает несущую способность сваи по стволу и грунту. При первом замесе рабочего раствора в него добавляется красящий пигмент.

После выхода из скважины 2 цветной «сигнальной пробки» в устье монтируется «тампонажная обойма» 6, которая устанавливается на выпуск анкерной тяги 3 через трубу 12. При помощи трубы 12 осуществляется соединение металлического корпуса обоймы 7 с буровым механизмом, которым осуществляется закручивание «тампонажной обоймы» 6 в грунтовое основание 1. Герметичность соединения обеспечивается формой обоймы, которая по мере вкручивания распирает грунт, а также за счет наличия стальной реборды 8 на ее боковой поверхности. Далее производят нагнетание избыточного количества рабочего раствора в скважину 2, в результате чего происходит дополнительное уплотнение стенок и в грунтовом основании 1 вдоль анкерной тяги 3 образуется уширение, размеры которого можно контролировать и изменять путем регулирования объема подачи рабочего раствора и величины давления нагнетания раствора, определяемого по манометру 11. После стабилизации значения избыточного давления в скважине 2 «тампонажную обойму» 6 выкручивают и снимают.

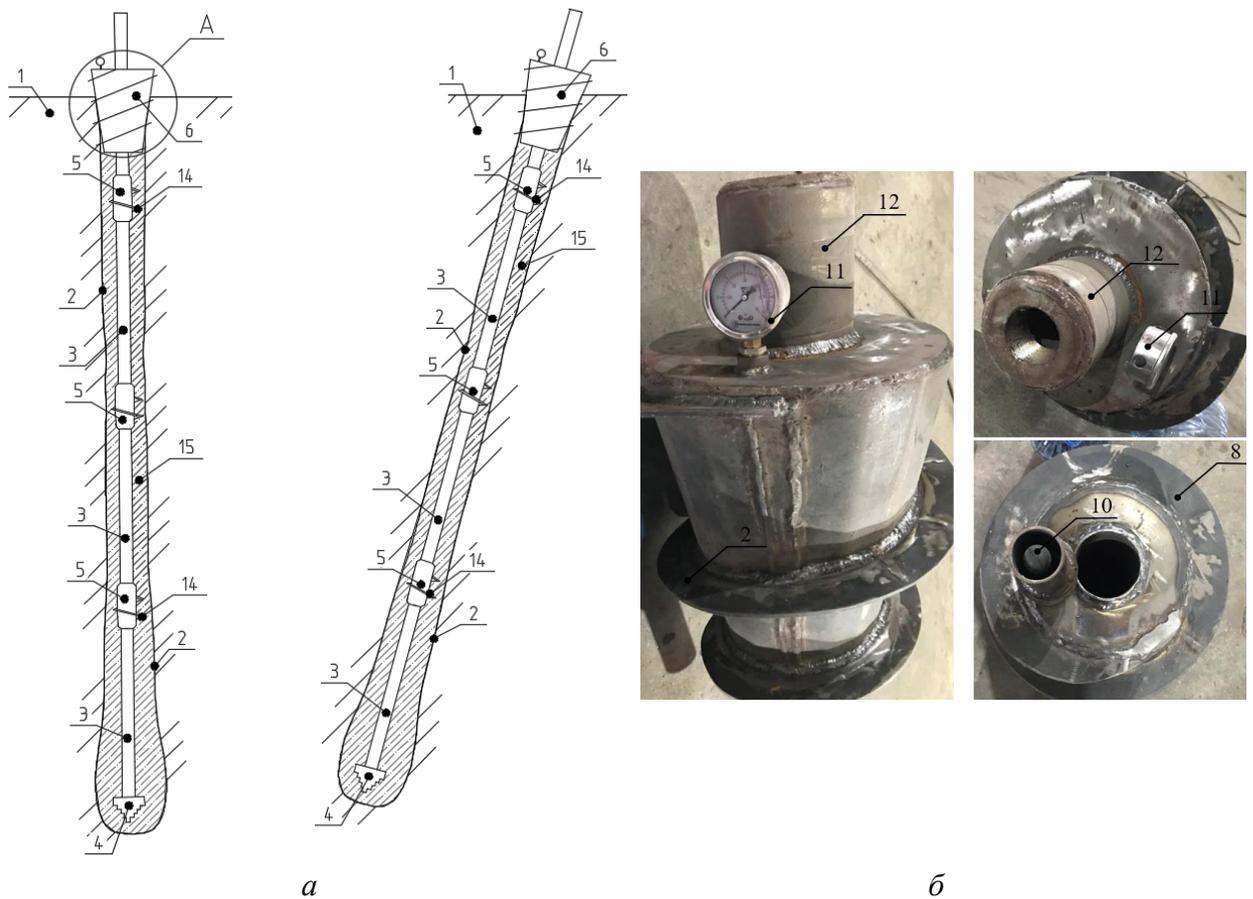


Рисунок 3.9. Общий вид устраиваемой сваи (а) и «тампонажной обоймы» (б):

1 – грунтовое основание, 2 – вертикальная или наклонная скважина, 3 – трубчатые анкерные тяги, 4 – буровое долото, 5 – резьбовая соединительная муфта, 6 – «тампонажная обойма», 7 – металлический корпус «тампонажной обоймы», 8 – стальная реборда, 9 – металлическая трубка, заполненная маслом, 10 – эластичная мембрана, 11 – манометр, 12 – труба, 13 – внутренняя коническая резьба, 14 – буровые винтовые лопасти, 15 – тело сваи

3.3.2. Программа проведения натурного эксперимента

На площадке №1 испытание опытных свай производилось на действие вдавливающей и выдергивающей нагрузки, и на действие вдавливающей нагрузки на площадке №2. Испытания выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 5686-2020. Схемы установок для каждого вида статического нагружения представлены на рис. 3.10.

Нагружение свай выполнялось с помощью гидравлического домкрата марки ДГА100П100, укомплектованного ручной масляной станцией и манометром.

При действии вдавливающей нагрузки реактивные усилия воспринимались стальной балкой (два спаренных швеллера №30), закрепленной к анкерным сваям посредством резьбовых шпилек и пластин. При действии выдергивающей нагрузки реактивные усилия воспринимались рамой (система из швеллеров №16 и пластин $t=10$ мм), которая крепилась к оголовку испытываемой сваи, и стальной балкой, закрепленной к анкерным сваям.

Нагружение свай производилось равномерно ступенями. При вдавливании осадка свай доводилась до величины не менее 40 мм. При действии выдергивающей нагрузки испытание продолжалось до выхода сваи из грунта на величину не менее 25 мм.

Перемещения свай регистрировались прогибомерами ИЧ 50.000 ПС с точностью измерения до 0,01 мм, в количестве 4 штук. На анкерные сваи устанавливалось по 1 прогибомеру. Прогибомеры крепились к реперным фермам, опоры которых устанавливались на расстоянии не менее 2,0 м от испытываемой сваи.

Испытания на площадке №1 выполнялись в следующей последовательности: испытание всех свай на действие вдавливающей нагрузки, затем испытание свай на действие выдергивающей нагрузки. В процессе испытания происходила фиксация перемещений анкерных свай и их последующее «продавливание» на величину «выхода».



Рисунок 3.10. Установки для испытания грунтов сваями: *а* – на действие статической вдавливающей нагрузки (площадка №2), *б, в* – на действие статической выдергивающей и вдавливающей нагрузки (площадка №1).

3.4. Результаты полевых экспериментальных исследований

3.4.1. Оценка несущей способности свай на экспериментальной площадке №1

В результате проведенных изысканий и посадки буринъекционных свай на инженерно-геологический разрез (рис. 3.2-3.3.) для последующей корректной интерпретации полученных результатов опытные сваи были поделены на две группы в зависимости от вида грунта, залегающего непосредственно под их пятой. Буринъекционные сваи А-1, А-2, Н-1 и Н-2 опираются на песок мелкий средней плотности или кровля данного слоя находится в непосредственной близости от их острия, а опытные сваи Н-3 – Н-6 и БН опираются на суглинок мягкопластичный.

Результаты испытаний буринъекционных свай А-1, А-2, Н-1 и Н-2 на действие статической вдавливающей (область отрицательных значений) и выдергивающей нагрузок (область положительных значений) представлены на рисунке 3.11.

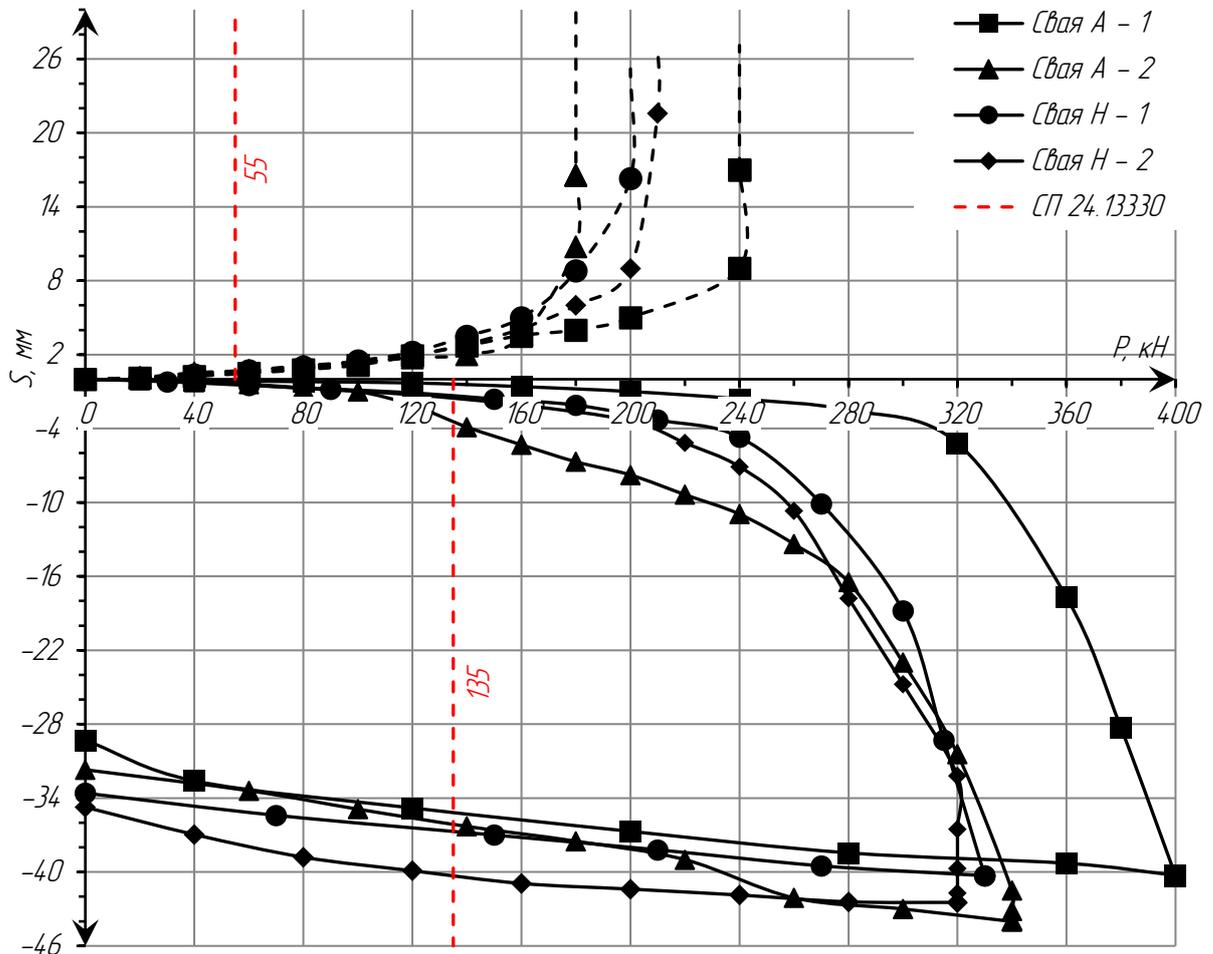


Рисунок 3.11. График «нагрузка-осадка» для свай А-1, А-2, Н-1, Н-2.

Установлено, что при вдавливании графики свай А-2, Н-1 и Н-2 практически совпадают, что доказывает, что дополнительная технологическая операция при устройстве буринъекционных свай, связанная с извлечением дорогостоящего легированного сердечника и погружением армирующего элемента, не снижает их несущей способности и

качественно не меняет их характера работы. Свая А-1 имеет несущую способность выше, что обусловлено ее максимальным заглублением в песчаный слой, а также образованием уширения по стволу сваи, так как при ее устройстве на определенном этапе бурения не было выхода раствора из устья скважины, что связано с заполнением полости в грунте.

Анализируя приведенные на рисунке 3.11 графики можно выделить 3 характерных участка работы буроинъекционных свай при действии вдавливающей нагрузки в случае их опирания в слой песка мелкого средней плотности:

1. Начальный линейный участок (I), характеризующийся практически безосадочной работой и быстрой стабилизацией осадок, который сохраняется до достижения нагрузки в пределах 25–30% от максимально приложенной, и осадке 0,3–1,0 мм. Малая величина осадки на рассматриваемом участке работы в основном обусловлена упругим сжатием материала ствола сваи. Данный участок работы характеризуется начальными деформационными характеристиками грунта (E_I и G_I);

2. Второй линейный участок (II), характеризующийся устойчивым увеличением скорости осадки, при этом стабилизация происходит также быстро, как и на первом участке работы. По продолжительности данный участок действует до приложения нагрузки 60–70% от максимально действующей, при этом осадка свай в конце участка составляет 3,5 – 11,0 мм. Очевидно, что на данном участке работы начинают формироваться локальные зоны сдвигов и происходит снижение деформационных характеристик по боковой поверхности буроинъекционных свай, в связи с чем, он характеризуется измененными деформационными характеристиками грунта (E_{II} и G_{II});

3. Нелинейный участок (III), для которого характерна выраженная упруго-пластическая зависимость осадки от действующей нагрузки. На данном участке работы происходит активное смыкание зон сдвигов, что приводит к интенсивному нарастанию осадок и их долгой стабилизации, а также к снижению деформационных характеристик грунта как по пяте буроинъекционных свай, так и по их боковой поверхности.

Также общей особенностью данных свай является отсутствие «срыва» - неограниченного роста осадки без увеличения нагрузки. Аналогичные характерные участки работы выделяет Мариничев М.Б. на основе обработки данных испытаний 118 буронабивных свай [82].

После снятия нагрузки отмечен значительный (практически линейный) выход свай, который для сваи А-1 он составил 27% от максимальной осадки, для сваи А-2 – 28%, для сваи Н-1 – 16% и 18% для сваи Н-2. Большой выход свай «Атлант» (А-1 и А-2) после снятия нагрузки объясняется большим заглублением их острия в слой песчаного грунта. По этой

же причине сваи «Атлант» имеют более выраженный линейный участок работы на графике «нагрузка-осадка».

Дополнительно были проведены испытания двух буринъекционных свай диаметром 0,2 м длиной 28,0 м (свая №1) и длиной 32,0 м (свая №2), которые нижним концом заглублялись в слой песка мелкого средней плотности мощностью более 10 м. Работы по испытанию свай производились на усиливаемом объекте, расположенном в г. Тюмени по адресу ул. Домостроителей, 34 [29, 51]. Результаты испытаний представлены на рисунке 3.12.

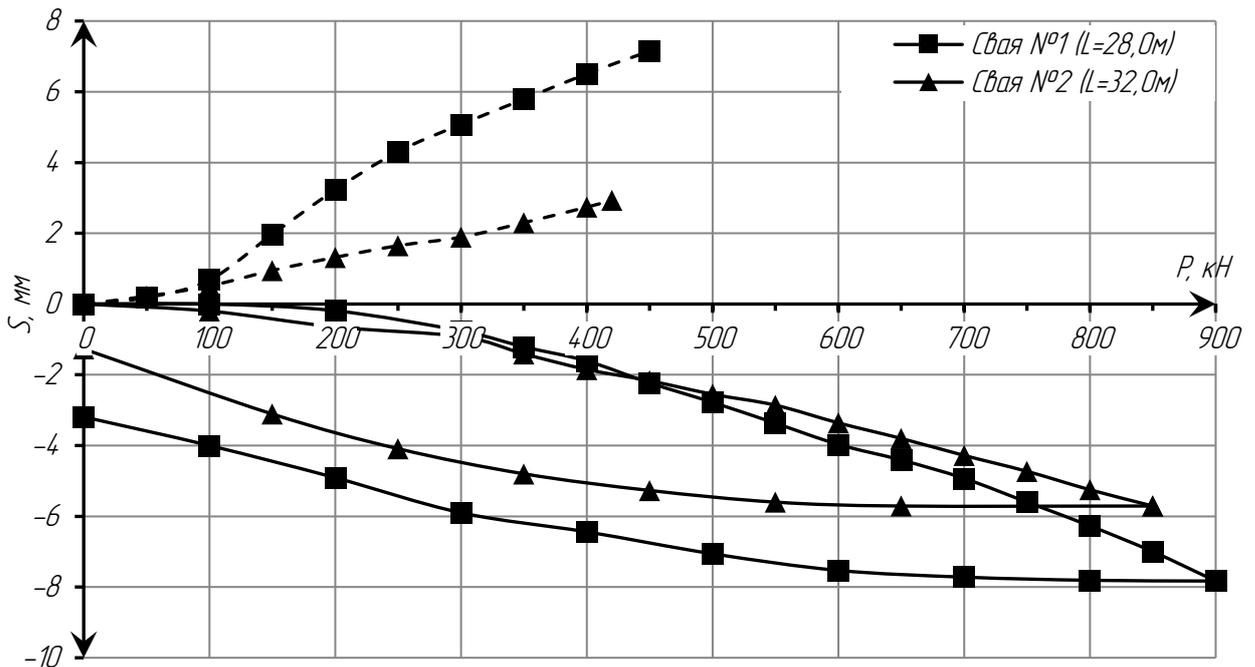


Рисунок 3.12. График зависимости «нагрузка-осадка» для свай №1 и №2.

По графикам, представленным на рисунке 3.12, также можно выделить две зоны практически линейной работы свай при действии статической вдавливающей нагрузки в случае заглубления их острия в слой песчаного грунта большой мощности. **Начальный линейный участок (I)** с практически безосадочной работой, который сохраняется до приложения нагрузки 25,0–35,0% от максимально приложенной, при осадке свай 0,2 – 0,8 мм. Малая величина осадки на рассматриваемом участке работы объясняется упругим сжатием материала ствола сваи. **Второй линейный участок (II)**, сохраняющийся до конца проведения испытания, завершение которого происходило при достижении критерия прочности материала ствола сваи. Максимальная осадка на данном участке составила 5,7 – 7,8 мм. Оба участка работы характеризуются быстрой стабилизацией осадок во времени. При снятии нагрузки отмечен значительный упругий выход свай, который составил 57,0 – 78,0 % от величины максимальной осадки. Полученные результаты хорошо согласуются с выявленными зависимостями работы буринъекционных свай на действие статической

вдавливающей нагрузки при заглублении их острия в слой песчаного грунта на экспериментальной площадке №1, что подтверждает справедливость выявленных зависимостей их работы.

По результатам испытаний свай статической вдавливающей нагрузкой определялась их несущая способность. Данные представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Несущая способность опытных свай А-1, А-2, Н-1, Н-2 при вдавливании.

	F_d , кН*	N , кН
Свая А-1	360	300,0
Свая А-2	280	233,3
Свая Н-1	260	216,7
Свая Н-2	260	216,7
Нормативный расчетный метод в соответствии с СП 24.13330	135	96,5
По результатам статического зондирования как для буровой сваи	100	80,0
По результатам статического зондирования как для забивной сваи	220	175,0

* - за несущую способность опытных свай принята нагрузка, соответствующая окончанию второго (условно-линейного) участка их работы.

Установлено, что несущая способность, определенная по результатам статических испытаний, превосходит в 1,9-2,5 раз несущую способность, определенную в соответствии с требованиями СП 24.13330. Существенная разница нормативной расчетной и фактической несущей способности буроинъекционных свай диаметром до 0,25 м при вдавливании была также отмечена в ряде работ [64, 65, 81, 87, 89, 110]. О существенном различии (порядка 5 раз) между фактической и нормативной расчетной несущей способностью буроинъекционных свай, используемых при усилении опор эстакады, говорилось на IX Научно-практической конференции «Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения» в 2018 г. в г. Санкт-Петербурге, где в результате статических испытаний несущая способность буроинъекционных свай *Titan* составила порядка 1300 кН.

Расчет несущей способности буроинъекционной сваи при вдавливании в соответствии с СП 24.13330 осуществляется по следующей формуле:

$$F_d = \gamma_c \cdot \left(\gamma_{cR} R A + u \sum \gamma_{cf} f_i h_i \right) \quad (3.5)$$

где $\gamma_{cR}=1,0$ – коэффициент условий работы грунта под нижним концом сваи; $\gamma_{cf}=0,8 - 0,9$ – коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности буроинъекционной сваи, кПа, принимаемое по таблице СП 24.13330 в зависимости от показателя текучести I_L ; R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа, принимаемое в зависимости от вида грунта под нижним концом по расчету или по таблице СП 24.13330; γ_c , A , h_i – общеизвестные обозначения.

Исходя из значительной разницы несущей способности, получаемой по результатам нормативного расчета и по данным статических испытаний, можно сделать вывод, что используемые при расчете табличные значения f_i и R существенно отличаются от реальных значений. В ходе выполнения лотковых экспериментов (глава II) доказано, что в результате опрессовки стенок скважины происходит их расширение, приводящее к формированию дополнительных обжимающих напряжений и изменению физико-механических свойств грунта, что способствует повышению сопротивления трения грунта по боковой поверхности, а также дополнительному его уплотнению в забое скважины. В главе I было отмечено, что γ_{cR} и γ_{cf} не отражают действительного характера работы буроинъекционных свай, занижая их фактическую несущую способность.

Несущая способность буроинъекционных свай также определялась по данным статического зондирования по алгоритму буровой (п.7.3.12 СП 24.13330) и забивной сваи (п.7.3.10 СП 24.13330). Разница в определении несущей способности по алгоритму буровой сваи и результатам статических испытаний составляет 2,6–3,6 раз, что очевидно обусловлено тем, что при расчете несущей способности буровой сваи по результатам статического зондирования сопротивление грунта по муфте трения не учитывается, а косвенно определяется по лобовому сопротивлению, т.е. сопротивление грунта по боковой поверхности буроинъекционной сваи напрямую не учитывается, что не отвечает действительному характеру ее работы.

В случае расчета несущей способности буроинъекционных свай по алгоритму забивной сваи ее несущая способность отличается от данных статических испытаний в 1,2–1,6 раз. Большая несущая способность буроинъекционной сваи по результатам статического зондирования, определенная по алгоритму забивной сваи, по отношению к алгоритму буровой сваи, обусловлена в первую очередь учетом сопротивления трения по боковой поверхности, а также большей уплотненной зоной в уровне острия сваи, вовлекаемой в расчет.

В случае приложения к сваям статической выдергивающей нагрузки можно выделить два выраженных участка работы (рис. 3.12):

- 1. Линейный участок (I)**, характеризующийся минимальными быстро затухающими значениями перемещений (до 1,5 мм) и сохраняющий линейный характер работы до значения нагрузки, которая в среднем составляет 30% от максимально приложенной. Границы линейной зависимости перемещения сваи от выдергивающей нагрузки сопоставимы с результатами, полученными при действии на эти сваи

вдавливающей нагрузки. Данный участок работы буроинъекционных свай, как и в случае действия вдавливающей нагрузки, характеризуется своими начальными деформационными характеристиками грунта (E_I и G_I);

2. **Нелинейный участок (II)**, имеющий выраженный упруго-пластический характер работы, характеризующийся интенсивным приращением деформаций и медленной их стабилизацией. Перегиб кривой на графиках (рис. 3.12) свидетельствует о росте пластических деформаций сдвига и снижении деформационных характеристик вдоль ствола сваи, что приводит к ее срыву.

В таблице 3.5 представлена несущая способность сваи при действии статической выдергивающей нагрузки.

Таблица 3.5. Несущая способность опытных свай А-1, А-2, Н-1, Н-2 при выдергивании.

	F_d , кН*	N , кН
Свая А-1	200	166,7
Свая А-2	160	133,3
Свая Н-1	160	133,3
Свая Н-2	160	133,3
Нормативный расчетный метод в соответствии с СП 24.13330	55	39,2

* - за несущую способность опытных свай принята величина нагрузки, предшествующая «срыву».

Установлено, что разница в определении несущей способности по результатам статических испытаний и по СП 24.13330 составляет до 3,5 раз. Значительная разница в определении несущей способности буроинъекционных свай по результатам выдергивающих испытаний по отношению к нормативному расчетному методу приводится в работах Федоровского В.Г., Соловьева Д.Ю. и др. [142] (разница до 3 раз), Никитенко М.И. [89] (разница до 3,5 раз) и др.

Расчет несущей способности буроинъекционной сваи при выдергивании в соответствии с СП 24.13330 осуществляется как:

$$F_d = \gamma_c u \sum \gamma_{cf_i} f_i h_i \quad (3.6)$$

Обозначения в формуле (3.2) те же, что и в формуле (3.1). Причины отличия расчетной и фактической несущей способности при выдергивании те же, что были приведены при анализе работы опытных буроинъекционных свай при вдавливании.

Результаты испытаний второй группы буроинъекционных свай Н-3 – Н-6 и БН представлены на рисунке 3.13.

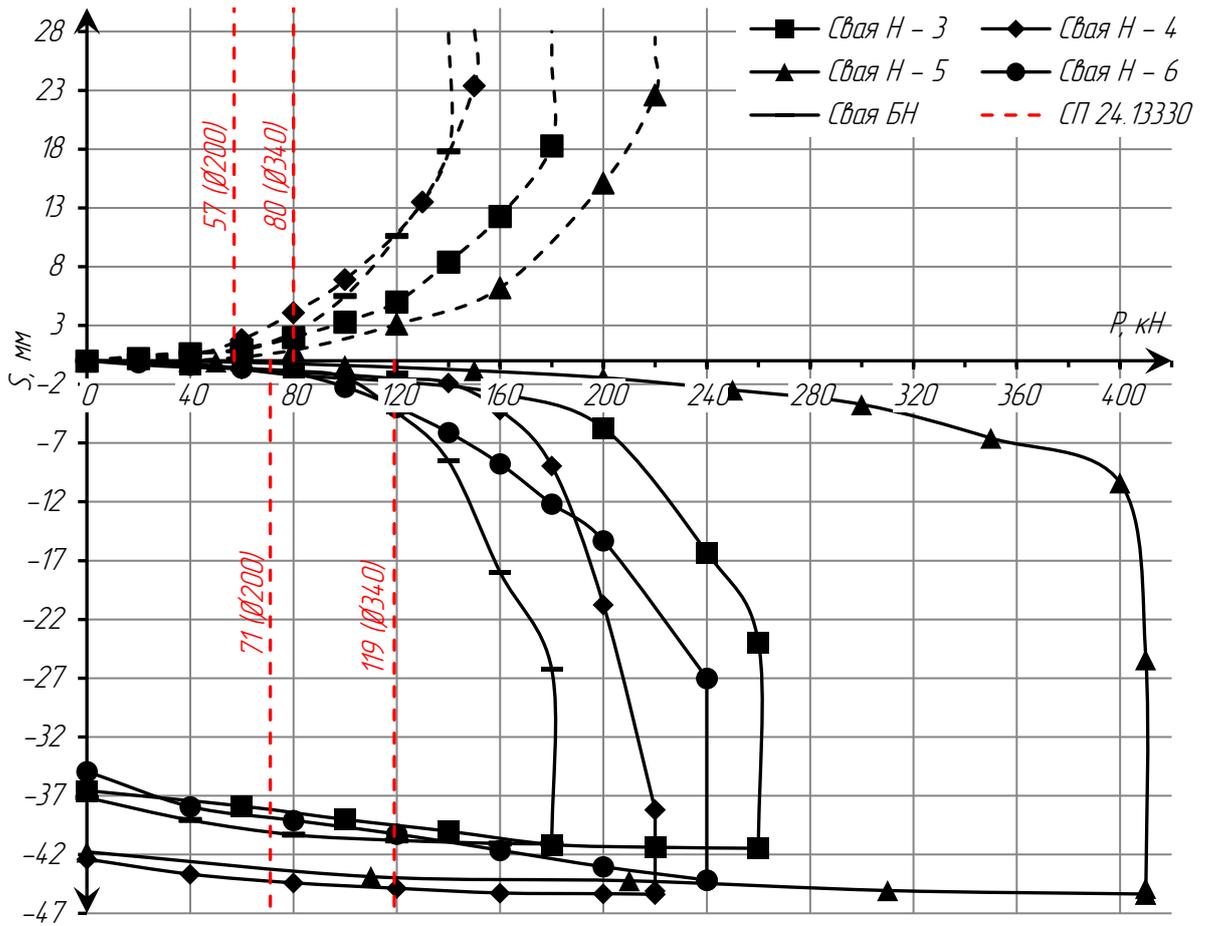


Рисунок 3.13. График «нагрузка-осадка» для свай Н-3 – Н-6 и БН.

Анализируя приведенные на рисунке 3.13 графики можно выделить 2 характерных участка работы буроинъекционных свай при действии вдавливающей нагрузки в случае их опирания в слой пылевато-глинистого грунта пластичной консистенции:

1. **Линейный участок (I)**, имеющий незначительную величину осадок (в пределах 2 мм), для которых характерна быстрая стабилизация. Линейный участок работы сохраняется до достижения нагрузки, которая составляет 45–60%. По графику работы свай Н-6 можно выделить два участка линейной работы: первый участок до нагрузки 80 кН (33,3% от максимальной нагрузки) и второй участок до нагрузки 200 кН (80% от предельной нагрузки). Изменение угла наклона графика с сохранением линейной зависимости «нагрузка-осадка» могло произойти в результате наличия в уровне острия свай прослойки более плотного грунта. В целом линейный участок работы буроинъекционных свай характеризуется своими начальными деформационными характеристиками грунта (E_1 и G_1);

2. **Нелинейный участок (II)**, для которого характерна выраженная упруго-пластическая зависимость осадки от величины действующей нагрузки. На данном участке работы происходит активное развитие (в начале участка) и последующее смыкание зон

сдвигов, что приводит к интенсивному нарастанию осадок и их долгой стабилизации, а также к снижению деформационных характеристик грунта. Участок заканчивается срывом сваи – незатухающим развитием осадки без увеличения действующей нагрузки.

После снятия нагрузки упругий выход для сваи Н-3 составил 12% от максимальной осадки, зафиксированной при срыве сваи, для сваи Н-4 7%, для сваи Н-5 9%, для сваи Н-6 20% и 10% для сваи БН. Величина упругого выхода свай при отсутствии их опирания в слой песка средней плотности оказалась значительно ниже, чем для свай А-1, А-2, Н-1 и Н-2. По характеру работы и величине упругого выхода свая Н-6 сопоставима со сваем А-2, что еще раз указывает на залегание в уровне острия сваи прослойки более плотного грунта.

Отмечено, что буроинъекционные сваи имеют бóльшую несущую способность по отношению к буронабивной свае БН, что объясняется технологической особенностью их устройства, в результате чего происходит проникание раствора в контактный слой грунта и образование «грунтовой рубашки», а также уплотнение стенок скважины. В таблице 3.6 представлена несущая способность свай.

Таблица 3.6. Несущая способность опытных свай Н-3 – Н-6, БН при вдавливании.

	F_d , кН*	N , кН
Свая Н-3	240	200,0
Свая Н-4	200	166,7
Свая Н-5	400	333,3
Свая Н-6	200	166,7
Свая БН	160	133,3
Нормативный расчетный метод в соответствии с СП 24.13330	71 (Ø200)	50,7 (Ø200)
	119 (Ø340)	85,0 (Ø340)
По результатам статического зондирования как для буровой сваи	77 (Ø200)	61,6 (Ø200)
	130 (Ø340)	104,0 (Ø340)
По результатам статического зондирования как для забивной сваи	168 (Ø200)	134,4 (Ø200)
	390 (Ø340)	312,0 (Ø340)

* - за несущую способность опытных свай принята величина нагрузки, предшествующая «срыву».

В соответствии с представленными данными установлено, что несущая способность, определенная по результатам статических испытаний вдавливающей нагрузкой при заглублении острия буроинъекционных свай в слой глинистого грунта пластичной консистенции, превосходит в 2,8–3,4 раза несущую способность, определенную нормативным расчетным методом, а также по алгоритму буровой сваи по данным статического зондирования. Несущая способность буроинъекционных свай, определенная по алгоритму забивной сваи по результатам статического зондирования меньше фактического значения в 1,1 – 1,4 раза.

Установлено, что при увеличении диаметра буроинъекционной сваи в 1,7 раз (с 0,20 м до 0,34 м) несущая способность при действии вдавливающей нагрузки возросла:

- в 1,7 – 2,0 раза по результатам статических испытаний;

- в 1,7 раз по табличному расчету в соответствии с СП 24.13330;
- в 1,7 – 2,3 раз по результатам статического зондирования.

Сопоставляя несущую способность всех опытных свай с результатами расчетов по СП 24.13330 и данным статического зондирования, можно сделать вывод, что ввиду отсутствия утвержденной нормативной методики определения несущей способности буроинъекционных свай при вдавливании, хорошо согласующейся с данными полевых испытаний, для предварительных расчетов можно использовать методику определения несущей способности по результатам статического зондирования по алгоритму забивной сваи. Разница в полученных значениях составляет до 35% в запас несущей способности.

В таблице 3.7 представлена несущая способность свай при действии статической выдергивающей нагрузки.

Таблица 3.7. Несущая способность опытных свай Н-3 – Н-6, БН при выдергивании.

	F_d , кН*	N , кН
Свая Н-3	160	133,3
Свая Н-4	130	108,3
Свая Н-5	200	166,7
Свая БН	120	100,0
Нормативный расчетный метод в соответствии с СП 24.13330	57 (Ø200)	40,7 (Ø200)
	80 (Ø340)	57,1 (Ø340)

* - за несущую способность опытных свай принята величина нагрузки, предшествующая «срыву».

Выявлено, что разница в определении несущей способности по результатам статических испытаний при действии выдергивающей нагрузки и по СП 24.13330 составляет до 3,5 раз.

В таблице 3.8 представлены данные по несущей способности свай, формируемой отдельно за счет сопротивления грунта по боковой поверхности и по пяте сваи. Несущая способность по пяте сваи определена по результатам натуральных испытаний как разница несущей способности при вдавливании и выдергивании.

Таблица 3.8. Распределение несущей способности по боковой поверхности и пяте.

№ сваи	Несущая способность по боковой поверхности, кН	Несущая способность по пяте, кН	% от общей несущей способности	
			По боковой поверхности	По пяте
Заглубление пяты в песчаный слой грунта средней плотности				
А-1	200	160	55	45
А-2	160	120	55	45
Н-1	160	100	60	40
Н-2	160	100	60	40
Заглубление пяты в пластичный глинистый грунт				
Н-3	160	80	70	30
Н-4	130	70	65	35
Н-5	200	200	50	50
БН	120	40	75	25

Основываясь на данных таблицы 3.9 установлено, что пята буринъекционных свай вносит существенный вклад в общую несущую способность сваи: до 45% в случае опирания в песчаный слой грунта средней плотности и до 35% в случае опирания в пластичный глинистый грунт и нельзя ее недоучитывать. Данный факт также подтверждается исследованиями как отечественных, так и зарубежных авторов [2, 8, 11, 17, 26, 65, 81, 83, 89, 142].

Анализ графиков работы буринъекционных свай (рис.3.11, 3.13) позволяет сделать вывод о том, что пята сваи вступает в работу после 4–6 ступени нагружения (40-60% от максимальной нагрузки), что практически совпадает с окончанием линейной зависимости «нагрузка-осадка» для буринъекционных свай. Для буронабивных свай вступление пяты в работу характерно после 2–3 ступени приложения нагрузки (20-30% от максимальной нагрузки) [57, 91]. Данный факт подтверждает большую несущую способность по боковой поверхности буринъекционных свай по отношению к буронабивным сваям, что еще раз указывает на необходимость совершенствования нормативного расчетного метода определения несущей способности буринъекционных свай.

3.4.2. Оценка несущей способности свай на экспериментальной площадке №2

Результаты испытаний буринъекционных свай Б-1, Б-2, и Б-3 на действие статической вдавливающей нагрузки представлены на рисунке 3.14. Характеристика опытных свай представлена в таблице 3.3

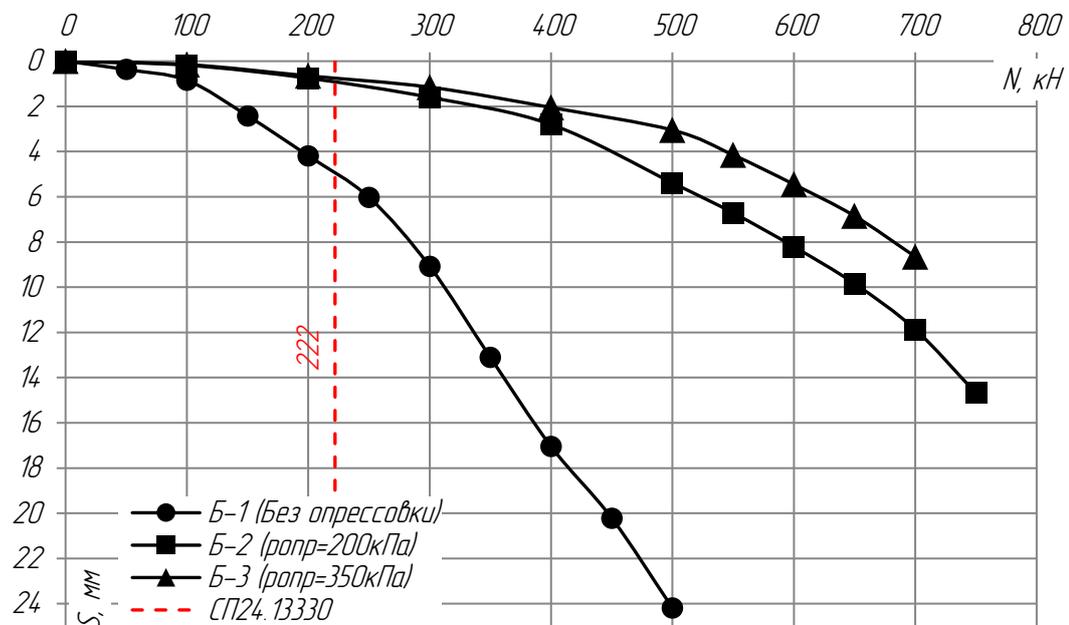


Рисунок 3.14. График «нагрузка-осадка» для свай Б-1 – Б-3.

Установлено, что дополнительная технологическая операция при устройстве буринъекционных свай, связанная с опрессовкой стенок скважины избыточным давлением, позволяет существенно повысить их несущую способность. Исходя из

технического состояния объекта усиления проектом была определена допустимая дополнительная осадка величиной 10 мм, поэтому за несущую способность сваи принималась величина нагрузки, которая соответствовала данной осадке. Данный подход определения несущей способности свай без наступления их срыва был использован в ряде работ [99, 103, 140]. Несущая способность для сваи Б-1 (без опрессовки) составила ≈ 300 кН, для сваи Б-2 (величина давления опрессовки 200 кПа) 650 кН, для сваи Б-3 (величина давления опрессовки 350 кПа) ≈ 700 кН. Прирост несущей способности сваи Б-2 по отношению к свае Б-1 составил 55%, сваи Б-3 к Б-1 60%. Прирост несущей способности сваи Б-3 по отношению к свае Б-2 составил только 10% при увеличении давления опрессовки в 1,8 раз. Исходя из этого можно сделать вывод, что повышение несущей способности буроинъекционных свай происходит при относительно небольших величинах избыточного давления опрессовки (в пределах 100-200 кПа) и дальнейшее повышение давления опрессовки приводит к значительно меньшему эффекту прироста несущей способности. Однако, увеличение давления опрессовки может существенно снижать осадку сваи: осадка сваи Б-2 при величине нагрузки 700 кН составила 12 мм, а для сваи Б-3 9 мм, разница составляет 25%. Аналогичный вывод был получен при проведении лабораторных экспериментальных исследований (см. Главу II).

По графикам, представленным на рисунке 3.14, также можно выделить две зоны практически линейной работы буроинъекционных свай при действии статической вдавливающей нагрузки при заглублении их острия в слой суглинка тугопластичной консистенции (прочный слой грунта). Для сваи Б-1 (без опрессовки) начальный линейный участок (I), характеризующийся практически безосадочной работой, который сохраняется до приложения нагрузки 20 % от максимально приложенной, при осадке до 1,0 мм. Как было выявлено ранее, малая величина осадки на рассматриваемом участке работы объясняется упругим сжатием материала ствола сваи. Второй линейный участок (II), который на площадке №2 сохраняется до конца испытания. Оба участка работы характеризуются быстрой стабилизацией осадок во времени и границы участков совпадают с данными, полученными на экспериментальной площадке №1, где сваи также выполнялись без опрессовки.

В случае опрессовки скважины избыточным давлением отмечено увеличение первого линейного (практически безосадочного) участка работы: для сваи Б-2 он сохраняется до приложения нагрузки 40 % от максимально приложенной при испытании и до 55% для сваи Б-3 при осадке обеих свай в пределах 2 мм. Откуда можно сделать вывод, что на характер первого линейного участка работы буроинъекционных свай влияет величина давления опрессовки и при ее увеличении осадка сваи уменьшается, а продолжительность линейного характера работы возрастает. Аналогичные результаты

были получены при проведении лотковых испытаний буринъекционных свай без учета сопротивления грунта по пяте (см. главу II).

Также установлено, что несущая способность, определенная по результатам статических испытаний, существенно превосходит несущую способность, определенную в соответствии с требованиями СП 24.13330: для свай Б-1 (без опрессовки) разница составила 2,3 раза, для свай Б-2 (величина давления опрессовки 200 кПа) и Б-3 (величина давления опрессовки 350 кПа) разница составила до 3,5 раз, при том, что срыва свай при натурных испытаниях достигнуто не было. Откуда можно сделать вывод, что нормативная методика определения несущей способности буринъекционных свай по СП 24.13330 не позволяет получать достоверных результатов, а также не учитывает эффект опрессовки, приводящий к дополнительному обжатию и преднапряжению стенок скважины.

В таблице 3.9 представлено сравнение стоимости устройства буринъекционной сваи длиной 14 м и начальным диаметром 0,2 м по разработанному усовершенствованному способу с учетом опрессовки избыточным давлением и в соответствии с технологией «Атлант» [70], принятой за прототип, без опрессовки. При устройстве свай «Атлант» использовались разработанные автором растворы, что и по усовершенствованной технологии.

Таблица 3.9. Расчет стоимости буринъекционной сваи.

Сравниваемый параметр	Технология «Атлант»			Усовершенствованная технология*		
	Наименование	Расход	Стоимость на конец IV кв. 2022 г., руб.	Наименование	Расход	Стоимость на конец IV кв. 2022 г., руб.
Конструктивное решение	Анкерная тяга	14 шт.	29388,38	Анкерная тяга	14 шт.	29388,38
	Муфта уплотнительная	13 шт.	23660,00	Муфта уплотнительная с винтовыми лопастями	13 шт.	29250,00
	Долото буровое	1 шт.	5396,30	Долото буровое	1 шт.	5396,30
Состав промывочного раствора	Портландцемент М500 Д0 (ЦЕМ I 42,5Н)	2,1 т.	14350,00	Портландцемент М500 Д0 (ЦЕМ I 42,5Н)	2,1 т.	14350,00
	Вода техническая	2,1 м ³	1050,00	Вода техническая	2,1 м ³	1050,00
Состав рабочего раствора	Смесь пескоцементная М150	0,7 т.	4463,20	Смесь пескоцементная М150	1,0 т.	6376,00
	Пластификатор MC-POWER FLOW	1,1 л.	224,51	Пластификатор MC-POWER FLOW	1,5 л.	306,15
	Вода техническая	0,14 м ³	70,00	Вода техническая	0,2 м ³	100,00
	Пигмент тертый	2 кг.	122,56	Пигмент тертый	2 кг.	122,56
ИТОГО:	78 724,95 руб.			86 339,39 руб.		

* - при расчете стоимость «тампажной обоймы» не учитывается, так как является оборачиваемой, многократноиспользуемой конструкцией.

В соответствии с данными таблицы 3.9 установлено, что в расчете на одну сваю разработанный усовершенствованный способ устройства буринъекционных свай имеет

стоимость на 9% выше по отношению с распространенной технологией «Атлант». Однако, воздействие избыточным давлением опрессовки позволяет до 2,5 раз увеличить несущую способность сваи (рис.3.14) и тем самым сократить общее число свай. Так, допустив что при устройстве по технологии «Атлант» требуется 100 свай, то при устройстве по разработанному усовершенствованному способу с опрессовкой грунтового основания ориентировочное количество свай составит 60 шт. Экономическая эффективность за счет использования усовершенствованной технологии при этом составит 30% (2 692 131,6 руб). Дополнительно следует отметить, что конструктивное решение и технологические особенности разработанного способа позволяют повысить качество и технологичность устройства свай, а также исключить образование дефектов, характерных для буринъекционных свай, что повышает надежность свайного фундамента.

3.4.3. Оценка изменения физико-механических свойств грунта после устройства буринъекционных свай

После проведения всего комплекса испытаний буринъекционных свай статическими нагрузками на экспериментальной площадке №1 производилась откопка опытной сваи Н-5 и рядом расположенной анкерной сваи (рис. 3.1). В процессе откопки свай выполнялось определение физико-механических характеристик околоствайного грунта, а также фактических размеров ствола сваи.

Три режущих кольца диаметром 56 мм располагались в двух взаимно перпендикулярных плоскостях для сваи Н-5 и в одной плоскости для анкерной сваи. Схема расположения колец-пробоотборников вдоль стволов свай представлена на рисунке 3.15. Грунт кольцами-пробоотборниками отбирался поярусно. Дополнительно вдоль стволов сваи производился отбор образцов грунта для определения его деформационных и прочностных характеристик.

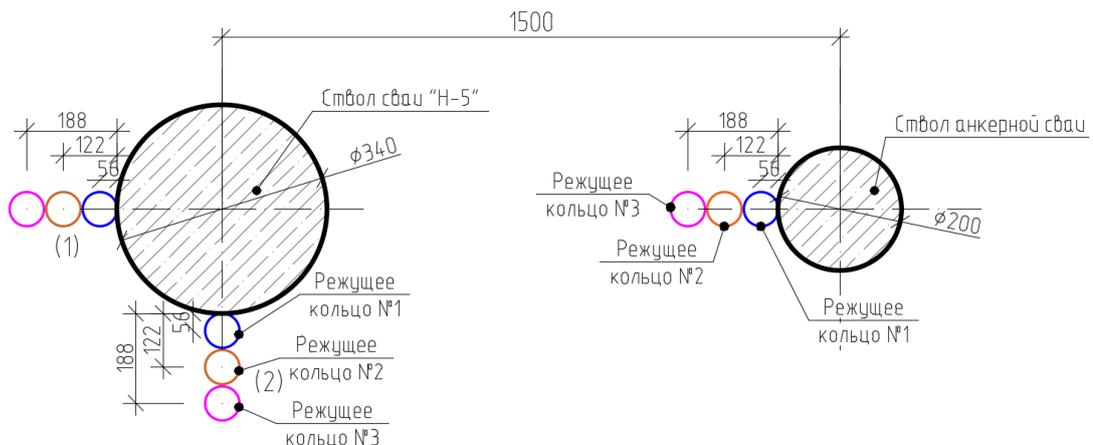


Рисунок 3.15. Схема расположения колец-пробоотборников.

В связи с тем, что при проведении инженерно-геологических изысканий был вскрыт слой техногенного грунта мощностью до 1,6 м, то дополнительно устраивался шурф для отбора проб грунта в естественном состоянии (рис. 3.16).



Рисунок 3.16. Поярусный отбор проб грунта в естественном состоянии из шурфа.

В результате в верхнем уровне площадки были дополнительно выявлены следующие напластования: 0,3 м – слой чернозема темно-черного цвета; 0,7 м – слой насыпного песка; 0,1 м – глинистая прослойка; 0,4 см – слой техногенного грунта с включением чернозема, плавно переходящий в нижележащие напластования, вскрытые при изысканиях.

В таблице 3.10 представлены физические характеристики техногенного слоя грунта.

Таблица 3.10. Физические характеристики техногенного грунта до устройства свай.

Глубина отбора, м	W, %	ρ , г/см ³	e, д.е
0,6	10	1,67	0,78
0,9	13	1,65	0,85
1,2	23	1,67	0,99
1,5	16	1,96	0,59

Данные по результатам определения физических характеристик грунта вдоль опытных свай представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11. Физические характеристики грунта после устройства опытных свай.

Свая Н-5 (1)												
Глубина отбора, м	W, %				ρ , г/см ³				e, д.ед.			
	Природная	Режущее кольцо			Природная	Режущее кольцо			Природная	Режущее кольцо		
		№1	№2	№3		№1	№2	№3		№1	№2	№3
0,35	-	33	29	30	-	1,72	1,64	1,64	-	1,09	1,12	1,14
0,55	10	20	16	16	1,67	1,75	1,67	1,69	0,78	0,85	0,88	0,85
0,75	10	22	19	21	1,67	1,72	1,65	1,66	0,78	0,92	0,95	0,97
0,85	13	20	21	20	1,65	1,74	1,69	1,65	0,85	0,86	0,93	0,96
1,00	13	17	19	17	1,65	1,81	1,72	1,75	0,85	0,75	0,87	0,81
1,10	23	21	20	16	1,67	1,76	1,69	1,7	0,99	0,86	0,92	0,84
1,60	16	24	21	21	1,96	2,00	1,96	1,96	0,60	0,67	0,67	0,67
1,90	16	22	19	19	1,97	2,03	1,94	1,96	0,59	0,62	0,66	0,64
2,20	25	23	21	15	1,90	2,01	1,92	1,94	0,78	0,65	0,70	0,60
2,50	21	24	25	24	1,92	1,99	1,94	1,90	0,70	0,68	0,74	0,76
2,80	21	23	25	23	1,92	1,98	1,95	2,01	0,70	0,68	0,73	0,65
3,10	21	20	20	22	1,92	1,97	1,98	1,97	0,70	0,64	0,64	0,67
3,40	21	20	20	23	1,97	1,99	1,96	2,00	0,66	0,63	0,65	0,66

Свая Н-5 (2)												
Глубина отбора, м	W, %				ρ , г/см ³				e, д.ед.			
	Природная	Режущее кольцо			Природная	Режущее кольцо			Природная	Режущее кольцо		
		№1	№2	№3		№1	№2	№3		№1	№2	№3
0,35	-	35	35	32	-	1,71	1,62	1,61	-	1,13	1,25	1,21
0,55	10	19	16	16	1,67	1,73	1,69	1,68	0,78	0,86	0,85	0,86
0,75	10	22	17	15	1,67	1,73	1,66	1,68	0,78	0,90	0,90	0,85
0,85	13	20	23	23	1,65	1,75	1,65	1,67	0,85	0,85	1,01	0,99
1,00	13	18	17	18	1,65	1,77	1,75	1,69	0,85	0,80	0,81	0,89
1,10	23	19	21	22	1,67	1,73	1,69	1,67	0,99	0,86	0,93	0,97
1,60	16	22	22	22	1,96	1,99	1,96	1,93	0,60	0,66	0,68	0,71
1,90	16	24	21	20	1,97	1,99	1,95	1,93	0,59	0,68	0,68	0,68
2,20	25	24	23	23	1,90	1,98	1,90	1,93	0,78	0,69	0,75	0,72
2,50	21	24	25	22	1,92	2,02	1,91	1,91	0,70	0,66	0,77	0,72
2,80	21	23	23	21	1,92	1,97	1,93	1,93	0,70	0,69	0,72	0,69
3,10	21	20	18	16	1,92	1,96	1,96	1,95	0,70	0,65	0,63	0,61
3,40	21	21	22	21	1,97	1,98	1,99	1,99	0,66	0,65	0,66	0,64
Анкерная свая												
Глубина отбора, м	W, %				ρ , г/см ³				e, д.ед.			
	Природная	Режущее кольцо			Природная	Режущее кольцо			Природная	Режущее кольцо		
		№1	№2	№3		№1	№2	№3		№1	№2	№3
1,60	16	22	18	23	1,96	1,95	1,94	1,94	0,60	0,69	0,64	0,68
1,90	16	20	21	24	1,97	1,96	1,95	1,97	0,59	0,65	0,68	0,67
2,20	25	22	23	22	1,90	1,92	1,92	1,91	0,78	0,72	0,73	0,64
2,50	21	21	21	24	1,92	1,95	1,92	1,92	0,70	0,68	0,70	0,71
2,80	21	21	21	23	1,92	2,01	1,95	1,91	0,70	0,63	0,68	0,67
3,10	21	20	20	22	1,92	1,96	1,94	1,91	0,70	0,65	0,65	0,66
3,40	21	20	22	23	1,97	1,95	1,93	1,95	0,66	0,66	0,71	0,64

Анализируя данные таблицы 3.11 можно заметить, что для анкерной сваи начальным диаметром 0,20 м характерно увеличение плотности грунта в диапазоне глубин 2,2 – 3,1 м. На остальных исследуемых глубинах для анкерной сваи изменения плотности грунта не отмечено. Для сваи Н-5 начальным диаметром 0,34 м выявлена стабильная тенденция увеличения плотности грунта в границах режущего кольца №1 на всех исследуемых глубинах. Причем до глубины 1,5 м происходит значительное увеличение плотности окружающего сваю грунта с максимальным приростом 10% на глубине 1,0 м (с 1,65 г/см³ до 1,81 г/см³). Ниже прирост плотности грунта в пределах режущего кольца №1 составляет до 5%, что объясняется тем, что до глубины 1,5 м залегают техногенные грунты с низкой плотностью и высоким коэффициентом пористости (табл. 3.10), а ниже залегают более плотные глинистые грунты. Также следует отметить, что для сваи Н-5 большего диаметра

характерно бóльшее увеличение плотности по отношению к анкерной свае меньшего диаметра. Плотность грунта в пределах режущих колец №№2-3 (на расстоянии до 190 мм от ствола сваи) для обеих опытных свай практически не изменяется по отношению к первоначальной. Таким образом по результатам откопки установлено, что после устройства буроинъекционных свай происходит изменение (увеличение) плотности грунта на расстоянии до 60 мм от ствола сваи. Данный факт объясняется спрессовыванием и цементированием частиц грунта и проникновением цементного раствора в контактную область грунта (рис. 3.17) при устройстве свай, что способствует уменьшению коэффициента пористости и увеличению удельного веса грунта контактной области.

Относительно низкая зона изменения плотности грунта в радиальном направлении и абсолютная величина изменения плотности обусловлена свободным выходом раствора из устья скважины в процессе устройства свай, тогда как при использовании «тампонажных обойм» происходит бóльшее обжатие грунта и изменение его характеристик в радиальном направлении на расстоянии до 5 радиусов скважины при увеличении плотности окружающего грунта до 17%, что было установлено автором при проведении лотковых экспериментов (глава II), а также рядом других исследователей [29, 56, 89, 97-99, 110].



Рисунок 3.17. Включения цементного камня в грунт в пределах режущего кольца №1.

Для сваи Н-5 начальным диаметром 0,34 м отмечено увеличение влажности в пределах отбора проб грунта по отношению к природному значению. Причем, в пределах залегания техногенных грунтов увеличение влажности максимально (до 2 раз). Высокое увеличение влажности техногенных грунтов объясняется в первую очередь действием сезонных факторов: откопка опытных свай выполнялась в марте месяце, чему предшествовало таяние снежного покрова и инфильтрация поверхностных вод в верхние слои основания. Далее с глубины 1,6 м (кровля глинистых грунтов) отмечен прирост влажности до 1,1-1,4 раз. Начиная с глубины 3,0 м (установившийся уровень залегания грунтовых вод) изменения влажности грунта не зафиксировано.

Для анкерной сваи начальным диаметром 0,20 м в пределах глубин 1,5-2,0 м также характерно увеличение влажности грунта с максимальным значением до 1,35 раз. Далее на

исследуемых глубинах изменения влажности околосвайного грунта практически не происходит.

Увеличение влажности грунта в пределах залегания глинистых грунтов может объясняться достаточно высоким водоцементным отношением ($В/Ц=0,5-0,6$), используемым для приготовления рабочих составов для формирования ствола буроинъекционных свай, тогда как для гидратации цемента необходимо $В/Ц=0,20-0,25$ [89], в результате чего, в силу наличия избыточной воды, происходит ее дренирование в контактный слой грунта. В связи с низким коэффициентом фильтрации глинистых грунтов и снижением пористости грунта за счет коагуляции пор цементным раствором, процесс консолидации окружающего буроинъекционную сваю грунта занимает продолжительное время. Дополнительной причиной увеличения влажности контактного слоя грунта вдоль буроинъекционных свай является их устройство без дополнительной опрессовки скважины избыточным давлением раствора, которое способствует отжатию влаги из контактной зоны в радиальном направлении, что было установлено автором при проведении лотковых экспериментов (глава II), а также по наблюдениям других исследователей [29, 56, 89, 97-99, 110].

Дополнительно были отобраны монолиты посредством внедрения в грунт цилиндра диаметром 100 мм и высотой 300 мм вплотную к стволу сваи Н-5 на глубине 2,5 м и 3,0 м от поверхности земли для определения механических характеристик. После проведения испытаний в компрессионном приборе установлено, что модуль деформации грунта на глубине 2,5 м составил 5,6 МПа, а на глубине 3,0 м 5,0 МПа. Увеличение модуля деформации по отношению к первоначальному значению (4,4 МПа) составило 21% и 12% соответственно. Изменения угла внутреннего трения отмечено не было. Значение удельного сцепления грунта возросло на 11 % по отношению к первоначальному значению и составило 10 кПа для отобранных монолитов. Величина изменения механических характеристик грунта контактного слоя также оказались ниже, чем при устройстве буроинъекционных свай с опрессовкой скважины: основываясь на результатах собственных исследований, а также на исследованиях других авторов [5, 6, 24, 89, 99, 103, 110, 140] установлено, что в результате опрессовки стенок скважины избыточным давлением происходит увеличение модуля деформации до 70% и удельного сцепления грунта до 50%, изменение угла внутреннего трения происходит в пределах 1-3°.

3.4.4. Оценка состояния стволов буроинъекционных свай

В процессе откопки свай оценивалось изменение диаметра по глубине и наличие дефектов. При обследовании сваи Н-5 в пределах глубины откопки (до 4,0 м) отмечено

увеличение диаметра в зоне залегания техногенных грунтов (до глубины 1,5 м) по отношению к диаметру сваи в зоне залегания глинистых грунтов (рис. 3.18). Выраженных изменений диаметра анкерной сваи не зафиксировано.



Рисунок 3.18. Обследование свай в процессе откопки.

Стволы обеих свай прямолинейные, без наличия видимых дефектов и повреждений. По периметру свай располагается «грунтовая рубашка», которая четко отражает напластование инженерно-геологических элементов, вскрытых при проходке скважины (рис. 3.18-3.19).



Рисунок 3.19. «Грунтовая рубашка» по периметру стволов опытных свай при поярусной откопке.

После освидетельствования стволов сваи извлекались из грунта. В результате распила стволов извлеченных свай установлено, что диаметр сваи Н-5 после ее устройства в зоне залегания техногенных грунтов составил 0,355 мм по отношению к диаметру скважины равной 0,340 мм (рис. 3.20). Увеличение диаметра сваи составило 4,5%.



Рисунок 3.20. Сечение сваи Н-5.

При обследовании извлеченного ствола анкерной сваи обнаружены зоны локальных уширений на участках длиной до 0,150 м на глубине 1,5 м, что соответствует границе «техногенный грунт-глинистый грунт» и на глубине 3,0 м, что соответствует уровню залегания грунтовых вод. Диаметр зоны уширений составляет 0,28 м и 0,30 м, что на 28% и 33% соответственно больше первоначального диаметра скважины 0,20 м. Диаметр анкерной сваи на остальных участках равен первоначальному диаметру скважины 0,20 м (рис. 3.21).



Рисунок 3.21. Уширения ствола анкерной сваи.

Наличие зон локальных уширений на выявленных участках можно объяснить, используя принцип электродинамических аналогий при формировании инъекционных тел, предложенный Соболевским Д.Ю. [117, 118]. В соответствии с данным принципом на границах двух сред с сильно отличающимися показателями коэффициента фильтрации и водопроницаемости происходит сгущение линий фильтрационных сил с рассеиванием в стороны и по глубине, что способствует уширению инъекционного тела по направлению наибольших градиентов напора. Также увеличению диаметра свай могло способствовать «закупоривание» устья скважины разбуренным грунтом (рис. 3.23в) и, как следствие, повышение давления в скважине в процессе устройства свай. На рисунке 3.22 представлено графическое изображение стволов извлеченных буринъекционных свай с участками изменения первоначального диаметра скважины.

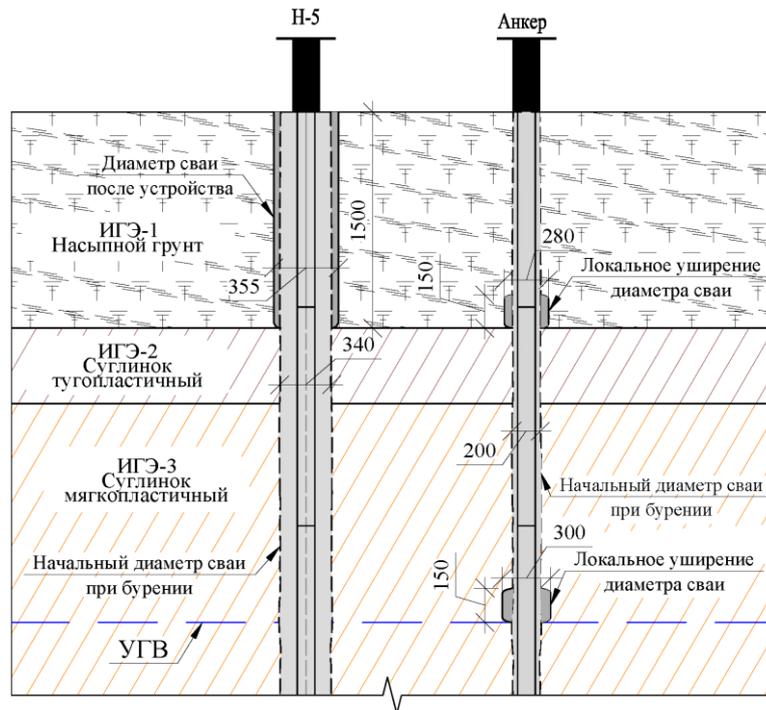


Рисунок 3.22. Фактические диаметры извлеченных свай.

Также в результате распила и обследования извлеченных буроналивных свай были выявлены следующие дефекты их стволов (рис. 3.23): перемешивание раствора с грунтом по периметру свай; вклинивание грунта в тело свай; обильное вклинивание грунта у устья скважины (верха свай).

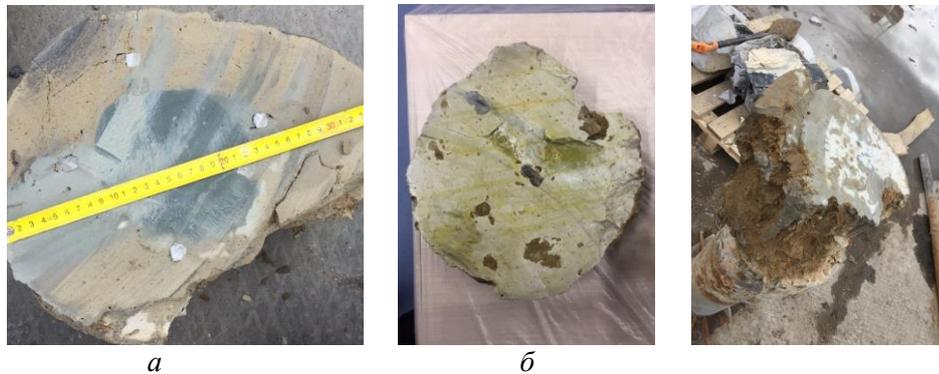


Рисунок 3.23. Дефекты, возникшие при устройстве буроналивных свай:

а - перемешивание раствора с грунтом по периметру свай; *б* - вклинивание грунта в тело свай; *в* - обильное вклинивание грунта у устья скважины.

Дьяконов И.П. в результате проведенного обследования большого количества свай дополнительно выделяет следующие основные дефекты и повреждения, характерные для буровых свай: вклинивание грунта в тело свай, приводящее к снижению прочности цементного камня, изменение сечения по высоте с возможным образованием «шеек», фильтрация воды через тело свай, расслоение бетонной смеси по высоте свай и т.д. [56].

Появление выявленных дефектов свай в первую очередь связано с использованием при формировании тела свай растворов (цемент-вода-жидкое стекло), которые обладают невысокой плотностью готовой смеси ($1,5-1,7 \text{ г/см}^3$), достаточно большой усадкой (до 15 мм на 1 м.п. длины свай) и незначительной прочностью (рис. 3.24).

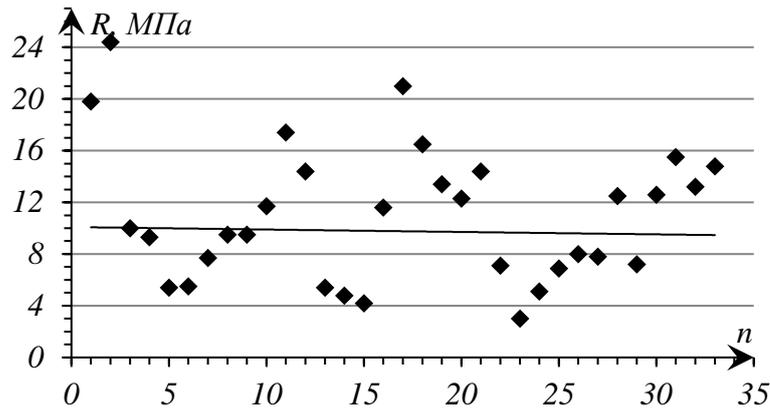


Рисунок 3.24. Прочность при сжатии отобранных кубических образцов раствора.

Данный состав для устройства буроинъекционных свай был принят в соответствии с исследованиями Самохвалова М.А. [110]. Очевидно, что данный состав для устройства буроинъекционных свай удовлетворяет технические требования в случае нагнетания в мембран-стакан, когда отсутствует необходимость вытеснения грунта раствором [97, 110]. В случае же использования рабочего раствора для вытеснения грунта из пробуренной скважины его плотности и прочности недостаточно, что приводит к образованию выявленных дефектов (рис. 3.23). После распиловки свай были отобраны керны раствора из центральной и периферийной зон, которые после испытания показали, что прочность раствора в центральной части согласуется с данным, представленными на рисунке 3.24, а в периферийной зоне за счет обильного перемешивания с грунтом прочность цементного камня не превышает 4,0 МПа (рис. 3.25).



Рисунок 3.25. Отбор кернов из тела опытных буроинъекционных свай.

На площадке №2 для формирования буроинъекционных свай были использованы рабочие растворы на основе цемента и пескоцемента с добавкой суперпластификатора, разработанные автором [109]. Было установлено, что замена добавки в виде жидкого стекла на суперпластификатор позволяет на 25% повысить плотность готовой смеси на основе цемента (до 2,0 г/см³) и на 37,5% на основе пескоцемента (до 2,20 г/см³), что способствует качественному очищению скважины от размолотого грунта и его выносу из устья, так как в данном случае средняя плотность грунта ниже плотности рабочего раствора. Выявлено, что использование добавки-суперпластификатора для растворов на основе цемента и пескоцемента значительно повышает прочность тела буроинъекционных свай: регулируя водоцементное соотношение и количество суперпластификатора для растворов на основе

цемента можно получить марку по прочности на сжатие в пределах В20-В30, а для растворов на основе пескоцемента марка по прочности на сжатие соответствует В35. Более подробная информация о разработанных растворах представлена в научной статье [109].

3.5. Выводы по главе III

1. По результатам испытаний установлено, что буроинъекционные сваи, выполняемые по технологии с теряемым и извлекаемым сердечником, имеют одинаковый характер работы, работают в схожем диапазоне нагрузок и деформаций. Таким образом, установлено, что дополнительная технологическая операция, связанная с извлечением высокопрочного сердечника и погружением в тело сваи армирующего элемента, не снижает ее несущей способности и не меняет характера работы при нагружении статической вдавливающей и выдергивающей нагрузкой. Определено, что в широком спектре грунтовых условий от текучепластичных до твердых пылевато-глинистых грунтов, достаточная глубина армирования буроинъекционных свай составляет $14d$ для свай диаметром 0,20 м, $13d$ для свай диаметром 0,25 м и $12d$ для свай диаметром 0,30 м.

2. В случае заглубления нижних концов буроинъекционных свай, устраиваемых без опрессовки избыточным давлением, в слой плотного грунта наблюдаются три характерных участка работы при действии вдавливающей нагрузки. Первый линейный участок, сохраняющийся до достижения нагрузки 25–30% от максимально приложенной, на котором в основном происходит упругое сжатие материала ствола сваи. Вторым линейным участком, действующим до приложения нагрузки 60–70% от максимальной, для которого характерно большее нарастанием величины осадки при их быстрой стабилизации. Третий нелинейный участок, характеризующийся выраженной упруго-пластической зависимостью осадки от величины действующей нагрузки. При заглублении нижних концов буроинъекционных свай в пылевато-глинистые грунты пластичной консистенции отмечено два участка работы: линейный участок, продолжающийся до достижения нагрузки 45–60% от максимальной, и нелинейный участок, сохраняющийся вплоть до потери несущей способности.

3. В случае заглубления нижних концов буроинъекционных свай, устраиваемых с опрессовкой избыточным давлением, в плотные слои грунта выделено две зоны практически линейной работы при действии вдавливающей нагрузки. Установлено, что на характер первого линейного участка существенно влияет величина избыточного давления опрессовки и при ее увеличении осадка сваи уменьшается, а продолжительность линейного участка работы возрастает и действует до приложения нагрузки 55% от максимальной.

4. Установлено, что дополнительная технологическая операция при устройстве буроинъекционных свай, связанная с опрессовкой скважины избыточным давлением, позволяет существенно (до 60%) повысить их несущую способность. Повышение несущей способности происходит при относительно небольших величинах давления опрессовки (в пределах 100–200 кПа), а дальнейшее повышение давления опрессовки приводит к меньшему эффекту прироста несущей способности, однако, до 25% снижает осадку сваи.

5. При действии выдергивающей нагрузки выделяется линейный участок работы свай, характеризующийся минимальными быстро затухающими значениями осадок и сохраняющийся до приложения нагрузки, составляющей 30% от максимально приложенной. Линейный участок по продолжительности сопоставим с линейным участком работы при действии вдавливающей нагрузки, что свидетельствует о том, что на начальных этапах нагружения пята свай не участвует в работе. Нелинейный участок, имеющий выраженный упруго-пластический характер работы, характеризующийся интенсивным приращением деформаций и медленной их стабилизацией вплоть до срыва свай.

6. Отмечено расхождение фактической и нормативной расчетной несущей способности буроинъекционных на действие вдавливающей и выдергивающей нагрузок до 3,5 раз. Причиной является неучет действительного характера работы свай по боковой поверхности вследствие изменения физическо-механических характеристик грунта контактного слоя и формирования особого напряженно-деформированного состояния вокруг ствола свай, в частности при опрессовке скважины избыточным давлением. Установлено, что пята буроинъекционных свай вносит существенный вклад в общую несущую способность: до 45 % в случае опирания в плотные слои грунта и до 35 % в случае опирания в пластичный глинистый грунт. Острые свай вступает в работу после 4–6 ступени нагружения (40-60% от максимальной нагрузки), что практически совпадает с окончанием линейной зависимости «нагрузка-осадка» для свай.

7. При устройстве буроинъекционных свай без опрессовки избыточным давлением отмечено увеличение плотности контактного слоя грунта (на расстоянии до $0,3d$) до 10% в пределах залегания техногенных грунтов и до 5% в пределах залегания глинистых грунтов естественного сложения за счет спрессовывания частиц грунта и проникновения цементного раствора в его поры. Отмечено увеличение влажности грунта контактного слоя до 50% в пределах залегания глинистых грунтов, что обусловлено высоким $B/C=0,5-0,6$ и наличием избыточной воды, отжимаемой в слабофильтрующий глинистый грунт. При устройстве буроинъекционных свай без опрессовки избыточным давлением выявлено повышение модуля деформации глинистого грунта контактной области до 21% и удельного сцепления до 11%.

8. Установлены основные дефекты стволов буроинъекционных свай, которые могут возникнуть при неправильном подборе составов рабочих растворов. Наиболее «уязвимой» с точки зрения обеспечения качества структуры монолитного цементного тела является верхняя часть свай до 2-3 диаметров. В результате усовершенствована технология устройства буроинъекционных свай малого диаметра (до 0,3 м) применительно к основаниям, преимущественно сложенным слабыми пылевато-глинистыми грунтами. Технологическое и конструктивное решение усовершенствованной технологии способствует повышению качества, надежности и технологичности устройства свай, и позволяет исключить образование характерных для них дефектов и повреждений.

ГЛАВА IV СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ

4.1. Определение несущей способности буроинъекционных свай

Основной этап проектирования буроинъекционных свай – это определение их несущей способности. В соответствии с СП 24.13330 под несущей способностью сваи подразумевается «предельное сопротивление основания сваи по условию ограничения развития в нем деформаций сдвига в соответствии с заранее заданным условием». На рисунке 4.1 представлены два характерных графика, отражающие работу под нагрузкой сваячей сваи и сваи-стойки. Особенностью работы сваячей свай на вдавливание является то, что по мере увеличения нагрузки происходит исчерпание резерва предельного сопротивления грунта как по боковой поверхности сваи, так и по ее пяте, что сопровождается резким и незатухающим во времени нарастанием осадки сваи без дальнейшего увеличения нагрузки (срыв сваи) [69, 78, 79, 99, 103, 122, 137, 140]. В данном случае за несущую способность сваи, как правило, принимают величину нагрузки, предшествующую ее срыву или величину нагрузки, соответствующую определенной величине осадки сваи. Сваи-стойки, как правило, работают только за счет сопротивления грунта по пяте, имеют гораздо меньшую величину осадки, а зависимость «величина нагрузки-осадка сваи» имеет практически линейный характер. В связи с чем, за несущую способность сваи, как правило, принимают максимальную величину нагрузки, которая не превосходит нагрузки, вызывающей разрушение материала ствола сваи, или нагрузку, соответствующую определенной величине осадки.

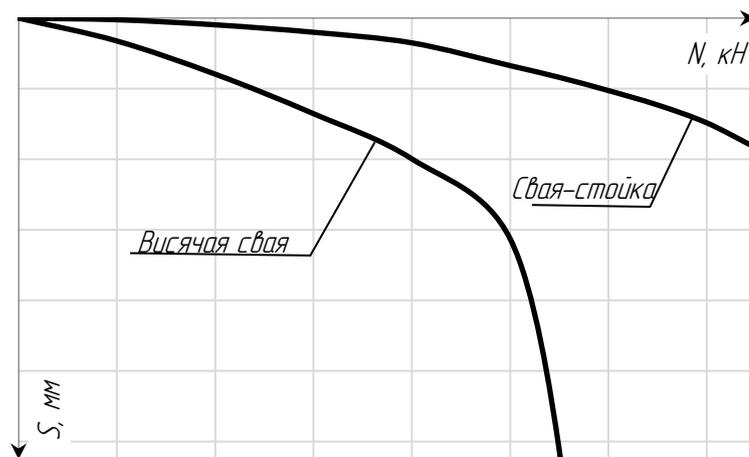


Рисунок 4.1. Характер работы свай под нагрузкой.

При определении несущей способности буроинъекционных свай традиционным и общепринятым является подход, основанный на предположении, что суммарная несущая способность сваи складывается из несущей способности за счет сопротивления грунта под

пятой сваи и по ее боковой поверхности. Данный подход заложен в действующие нормативные документы по проектированию свай и свайных фундаментов и неоднократно использован в ряде отечественных и зарубежных работ [32, 36, 37, 38, 39, 69, 82, 89, 99, 103, 110, 122, 127, 128, 137, 139-141].

Несущую способность одиночной буроинъекционной сваи на действие вдавливающей нагрузки как и по СП 24.13330 предлагается определять по следующей формуле:

$$F_d = u \sum_{i=1}^n \gamma_{cf,i} f_i h_i + \gamma_{cR} R A \quad (4.1)$$

где u – периметр боковой поверхности ствола буроинъекционной сваи, м, f_i – расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности сваи, кПа, h_i – мощность слоя, для которого определяется величина f_i , R – расчетное сопротивление грунта под пятой буроинъекционной сваи, кПа, A – площадь опирания острия сваи на грунтовое основание, м², $\gamma_{cf,i}$ и γ_{cR} – коэффициенты условий работы грунта по боковой поверхности и под пятой сваи соответственно.

В Главе III было показано, что использование коэффициентов работы грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай в пределах 0,8...0,9 не отвечает особенностям их устройства (особенно выполняемых с созданием по стволу избыточного давления опрессовки) и не позволяет в полной мере использовать резервы сопротивления грунта для расчета несущей способности. Аналогичные выводы получены в ряде работ [89, 99, 103, 122, 140]. Поэтому в формуле (4.1) значения коэффициентов $\gamma_{cf,i}$ и γ_{cR} предлагается принимать равными единице. Использование повышающих коэффициентов условия работы требует проведения дополнительных исследований.

Во II главе было установлено, что простым и в тоже время достоверным методом определения среднего диаметра буроинъекционных свай, сформировавшегося в результате опрессовки избыточным давлением является способ, предложенный в работе *Abd Elaziz and El Naggat* [8]. Способ определения диаметра сваи основан на учете избыточного количества рабочего раствора $V_{inc} = V_{смеси} - V_{скв}$, подаваемого в скважину при опрессовке. Используемая простая эмпирическая зависимость была получена авторами посредством статистической обработки большого количества результатов натурных измерений фактического диаметра буроинъекционных свай, которые устраивались в различных инженерно-геологических условиях. Средний периметр боковой поверхности буроинъекционной сваи u и площадь опирания острия сваи на грунтовое основание A в результате опрессовки определяется как:

$$u = \pi d_0 \left(1 + 0,35 \frac{V_{\text{смеси}} - V_{\text{скв.}}}{V_{\text{скв.}}} \right) \quad (4.2)$$

$$A = \pi \frac{\left(d_0 \left(1 + 0,35 \frac{V_{\text{смеси}} - V_{\text{скв.}}}{V_{\text{скв.}}} \right) \right)^2}{4} \quad (4.3)$$

где d_0 – начальный диаметр скважины, равный диаметру бурового инструмента, м, $V_{\text{смеси}}$ – объем нагнетаемого в скважину рабочего раствора, м³, $V_{\text{скв.}}$ – объем скважины, м³.

Из формул (4.2) и (4.3) видно, что в случае если буроинъекционная свая выполняется по технологии со свободным выходом раствора из устья скважины (без опрессовки избыточным давлением), то периметр и площадь сечения сваи зависят только от начального диаметра бурения скважины. Экспериментально было выявлено, что при отсутствии опрессовки увеличение первоначального диаметра буроинъекционных свай составляет до 5% и расчетом может не учитываться (см. Главу III).

Учитывая вышеприведенное, сопротивление грунта по боковой поверхности буроинъекционной сваи f_i предлагается определять в соответствии с полученным уравнением (см. глава II, формула 2.38) с учетом возникающих остаточных напряжений при опрессовке скважины, которое позволяет учесть глубину устройства буроинъекционной сваи, величину избыточного давления опрессовки и физические характеристики грунта контактного слоя (см. главу II).

Для более точного определения величины расчетного сопротивления грунта по боковой поверхности буроинъекционной сваи f_i также необходимо учитывать избыточное давление, которое оказывает на стенки скважины рабочий раствор (мелкозернистый бетон). Анализ подходов, описывающих характер распределения давления от бетонной смеси на стенки скважины по глубине и способы определения данного давления подробно выполнен Шулятьевым О.А. [141]. Лапшиным Ф.К. было получено следующее уравнение для расчета давления бетонной смеси на стенки скважины [66]:

$$\sigma_{b,i} = 0,36d\gamma_b \left(1 - e^{-2,8\frac{h}{d}} \right) \quad (4.4)$$

Позже Дзаговым А.М. была представлена формула для нахождения контактных напряжений от давления бетонной смеси на 28 сутки твердения [55]:

$$\sigma_{b,i} = 0,6d\gamma_b \left(1 - e^{-0,6\frac{h}{d}} \right) \quad (4.5)$$

где d – диаметр скважины, γ_b – плотность бетонной смеси, h – глубина расположения точки, для которой определяется давление бетонной смеси, от уровня устья скважины.

Использование формул (4.4) и (4.5) показывает, что распределение давления бетонной смеси на стенки скважины с глубиной сильно отличается от гидростатического:

используя уравнение Лапшина Ф.К., установлено, что давление остается неизменным по глубине при $h > 2d$ и при $h > 3d$ по формуле Дзагова А.М.

Последующие экспериментальные исследования Мамонова В.М. и Ерошкина П.М. [75] по изучению давления бетонной смеси на стенки скважины при устройстве буровых свай путем установки контактных мессдоз показали, что характер распределения указанных напряжений на начальном этапе бетонирования близок к гидростатическому. Сразу после укладки бетонной смеси наблюдается практически линейное возрастание давления с глубиной, причем напряжения составляют в среднем 80% от гидростатического закона распределения, затем происходит их постепенная релаксация в результате твердения бетонной смеси и на 28 суток величина напряжений составляет в среднем 20% от начального давления. Графики распределения напряжений в разные периоды твердения бетона в соответствии с исследованиями [75] представлены на рисунке 4.2.

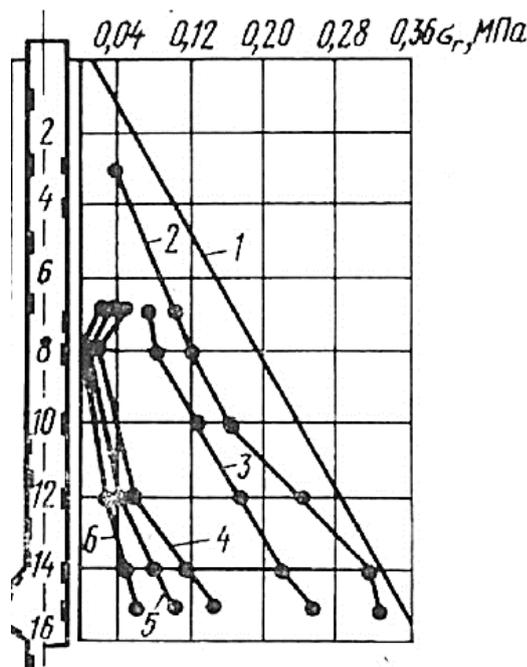


Рисунок 4.2. Изменение давления бетонной смеси в скважине по глубине [75]:
 1 — по гидростатическому закону; 2 — после укладки смеси; 3 — спустя 2,5 часа после укладки смеси; 4 — спустя 12 часов; 5 — спустя 7 суток; 6 — спустя 28 суток.

Давление бетонной смеси на стенки скважины в начальный момент бетонирования можно определять, как давление, воспринимаемое опалубкой от свежееуложенного бетона. Расчетные методики определения давления бетонной смеси в соответствии с отечественными и зарубежными нормами обобщены Анпиловым С.М. [41] и представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Методики определения давления бетонной смеси

Стандарт	Давление бетонной смеси, $p_{бет}$	Условные обозначения	Пример расчета*, кПа
СП 371.1325800	<p>при $v < 0,5$ м/ч и $h \leq R$ $p_{бет} = \gamma h$ при $v \geq 0,5$ м/ч и $h \geq 1,0$ $p_{бет} = \gamma \cdot (0,27v + 0,78) K_1 K_2$</p>	v -скорость бетонирования, м/ч; h -глубина бетонирования, м; R -радиус действия вибратора, м; γ -удельный вес смеси, кН/м ³ ; K_1 -коэффициент, зависящий от подвижности смеси: 0,8..1,2; K_2 -коэффициент, зависящий от температуры смеси: 0,85..1,5	163,2
DIN 18218 (Германия)	$p_{бет} = \gamma \cdot (0,48v + 0,74) k_2 K_2$ $K_2 = \frac{145 - 3t}{100}$	v -скорость бетонирования, м/ч; γ -удельный вес смеси, кН/м ³ ; k_2 -коэффициент, учитывающий добавки: 1,0..1,8; K_2 -коэффициент, зависящий от температуры смеси: 0,85..1,5; t -температура свежей смеси	193,4
CIRIA-108 (Великобритания)	$p_{бет} = \gamma \cdot \left(k_1 \sqrt{v} + k_2 K_2 \sqrt{h - k_1 \sqrt{v}} \right)$ $K_2 = \left(\frac{36}{t + 16} \right)^2$	v -скорость бетонирования, м/ч; γ -удельный вес смеси, кН/м ³ ; k_1 -коэффициент поперечного сечения: для опор $k_1 = 1,5$; k_2 -коэффициент, учитывающий добавки: 0,3..0,45; K_2 -коэффициент, зависящий от температуры смеси: 0,85..1,5; t -температура свежей смеси	176,1
CIB-FIB-CEB (Франция)	Определяется по таблицам в зависимости от глубины бетонирования h , диаметра опоры d , величины осадки смеси и температуры смеси t		150
ACI 347 R	$p_{бет} = 7,19 + \frac{785v}{17,78 + t}$ но не более 143,7 кН/м ²	v -скорость бетонирования, м/ч; t -температура свежей смеси	143,7

* - расчет выполнен для глубины устройства свай $h = 15$ м при условии, что скорость бетонирования в среднем составляет $v = 20$ м/ч, температура формовочной смеси $t = 20^\circ\text{C}$.

Как видно из данных таблицы 4.1 в начальный момент бетонирования буринъекционных свай рабочим раствором давление на стенки скважины на глубине 15 м может достигать 143,7...193,4 кПа в зависимости от метода определения, в связи с чем дополнительно следует учитывать давление бетонной смеси при определении сопротивления грунта по боковой поверхности свай.

Таким образом, в уравнение (2.38) с учетом исследований Мамонова В.М. и Ерошкина П.М. [75] вводится дополнительный параметр, учитывающий остаточное давление бетонной смеси на стенки буринъекционной свай $\sigma_{b,i}$:

$$\sigma_{b,i} = 0,2 p_{бет} \quad (4.6)$$

где $p_{бет}$ определяется по одной из методик, представленных в таблице 4.1.

Однако, данный параметр следует использоваться только в пределах глубины ствола буронагнетательных свай, где давление бетонной смеси на стенки скважины в момент их устройства превышает бытовое давление грунта на стенки скважины, т.е. при $p_{бет} > \sigma_{x(y)}g$.

Тогда радиальные обжимающие напряжения в формуле (2.38) определяются как:

$$\sigma_{r,i} = \sigma_{r\text{ осн},i} + \sigma_{b,i} \quad (4.7)$$

Следует отметить, что буронагнетательные сваи довольно часто используются при усилении оснований и фундаментов зданий и сооружений, а также применяются при строительстве в стесненных городских условиях, когда их устройство выполняется в непосредственной близости к существующим объектам. В случае, когда указанные объекты выполнены на фундаментах мелкого заложения, т.е. передают нагрузку на верхние слои грунтового основания, при определении расчетного сопротивления по боковой поверхности буронагнетательных свай f_i необходимо также учитывать дополнительные обжимающие напряжения, вызванные давлением от рядом расположенных фундаментных конструкций $\sigma_{p,i}$.

Задача о нахождении величины бокового давления на стенки скважины от расположенных в непосредственной близости зданий и сооружений на фундаментах мелкого заложения была рассмотрена в работе Кайгородова М.Д. [61]. На рисунке 4.3 представлены два характерных варианта расположения буронагнетательных свай при усилении фундаментов зданий и сооружений, а также при строительстве новых объектов в стесненных условиях.

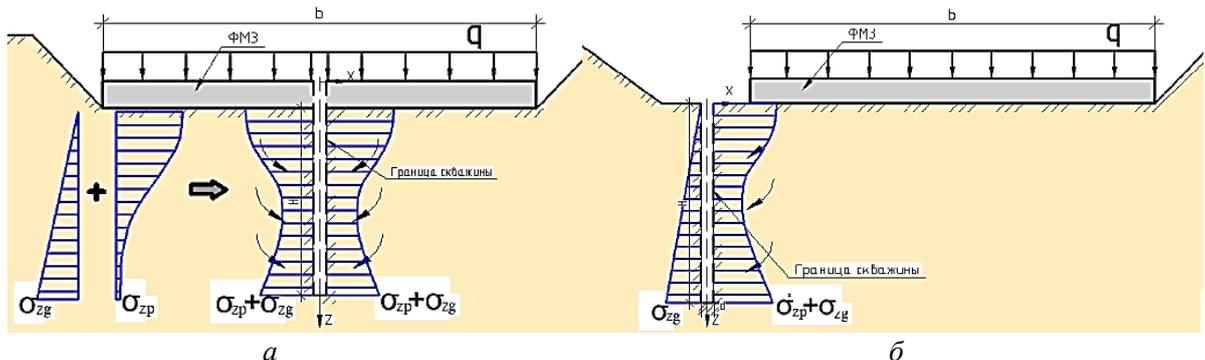


Рисунок 4.3. Расположение скважины (свай) относительно существующего фундамента [61]: а – скважина (свая) под плитой фундамента; б – скважина (свая) вне контура фундамента.

Решения Кайгородова М.Д. направлены на нахождение обжимающих напряжений в окрестности устраиваемой скважины, в то время как для расчета сопротивления грунта по боковой поверхности буронагнетательных свай следует использовать дополнительные обжимающие напряжения непосредственно на стенках скважины. С учетом вышесказанного дополнительные обжимающие напряжения $\sigma_{p,i}$ на сваи, устраиваемые под плитой фундамента следует определять как:

$$\sigma_{p,i} = \frac{q}{1-q} \sigma_{zp} \quad (4.8)$$

Дополнительные обжимающие напряжения $\sigma_{p,i}$, в случае устройства свай вне контура фундамента, находятся как:

$$\sigma_{p,i} = (\sigma_3 \cos \alpha + \sigma_1 \sin \alpha) \quad (4.9)$$

где ν – коэффициент Пуассона грунта, σ_{zp} – напряжения от действия фундамента на рассматриваемой глубине, σ_1 и σ_3 – главные вертикальные и горизонтальные напряжения от действия фундамента.

На боковой поверхности свай главные напряжения σ_1 и σ_3 определяются в соответствии с решениями Митчела [120]:

$$\sigma_{1,3} = \frac{p}{\pi} (\alpha \pm \sin \alpha) \quad (4.10)$$

где p – давление под подошвой фундамента, кПа, α – угол видимости.

Таким образом, радиальные обжимающие напряжения в формуле (2.38) с учетом дополнительных обжимающих напряжений, вызванных давлением от рядом расположенных фундаментных конструкций, определяются как:

$$\sigma_{r,i} = \sigma_{r\text{ осм},i} + \sigma_{b,i} + \sigma_{p,i} \quad (4.11)$$

Итоговая формула для определения расчетного сопротивления грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай f_i принимает следующий вид:

$$f(h, I_L, p_{\text{онп}} \neq 0) = \begin{cases} A_{\text{онп}} h^{\alpha_{\text{онп}}}; \text{ при } h \leq 7 \\ A_{\text{онп}} 7^{\alpha_{\text{онп}}} + 5,9 e^{-6I_L} (h-7); \text{ при } h > 7 \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\alpha_{\text{онп}}(I_L, p_{\text{онп}} \neq 0) = 0,414 I_L + 0,1 \quad (4.13)$$

$$A_{\text{онп}}(I_L, p_{\text{онп}} \neq 0) = e^{-3,95I_L + 4,35 + 1,19 \sigma_{r,i}^2 - 0,06 \sigma_{r,i} + 0,4} \quad (4.14)$$

Следует отметить, что использование данного подхода по определению сопротивления грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай оправдано в случаях, когда при опрессовке скважины избыточным давлением сохраняется ее сплошность и не происходит образование неконтролируемых гидроразрывов.

В первой главе было отмечено, что при проектированииисячих буроинъекционных свай вклад пяты в общую несущую способность, как правило, не учитывается. Однако, в последнее время многими исследователями отмечается, что нельзя недоучитывать несущую способность по пяте таких свай, так как в ряде случаев она может достигать 50% от общей величины [8, 17], что было подтверждено экспериментальными исследованиями (см. Главу III).

Профессором Тер-Мартirosяном З.Г. было показано, что расчетное сопротивление грунта R под нижним концом сваи зависит не только от прочностных характеристик грунта и глубины устройства сваи (нормативный подход), но также и от его деформационных характеристик, а недоучет данного обстоятельства может вызывать отличие величины до 7 раз и более [123]. Известно, что грунт основания сопротивляется перемещению в стороны как за счет сил трения и сцепления, так и в результате упругого сжатия, что приводит к возникновению упругого отпора грунта. В связи с чем, профессором Тер-Мартirosяном З.Г. было предложено при расчете сопротивления грунта R под острием сваи дополнительно учитывать величину упругого отпора окружающего грунта, возникающего вследствие сжатия и упругого отжатия грунта вниз и в стороны. Механизм взаимодействия свай с окружающим грунтом при их нагружении вдавливающим усилием представлен на рисунке 4.4.

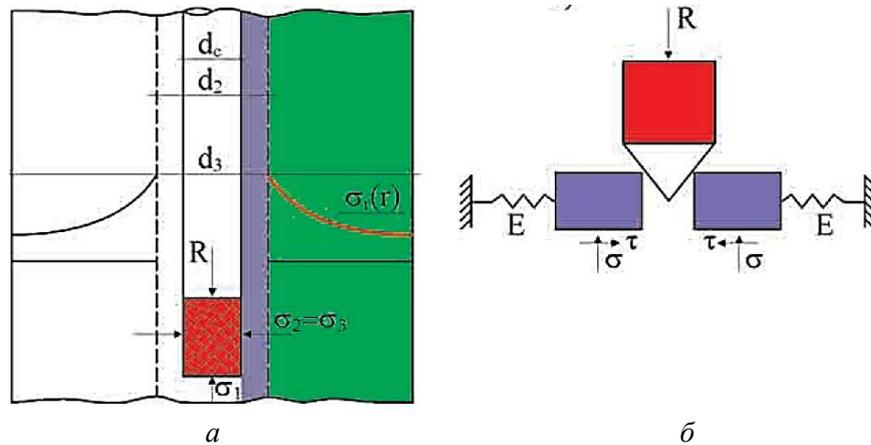


Рисунок 4.4. Схема предельного равновесия под нижним концом сваи при ее нагружении (а); механизм взаимодействия сваи с окружающим грунтом (б) [123].

Формула для определения расчетного сопротивления грунта R под нижним концом сваи с учетом принятого механизма выглядит следующим образом:

$$R = p_2 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2c \cdot \cos \varphi + 2\gamma H \xi_0 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4.15)$$

где H – глубина залегания нижнего конца сваи, м, γ – удельный вес грунта, кН/м^3 , ξ_0 – коэффициент бокового давления грунта, определяемый в зависимости от коэффициента Пуассона ν , p_2 – реактивное напряжение, оказывающее сопротивление боковому расширению грунта при нагружении сваи, кПа .

Реактивное напряжение p_2 Тер-Мартirosяном З.Г. определено исходя из рассмотрения напряженно-деформированного состояния грунтового цилиндра, имеющего внутренний диаметр $2r_c$, равный диаметру забивной сваи, и внешний диаметр $2r_3 = 2kr_c$ (где k – коэффициент влияния забивной сваи, $k=3 \dots 6$). Расчетная схема представлена на рисунке 4.5а.

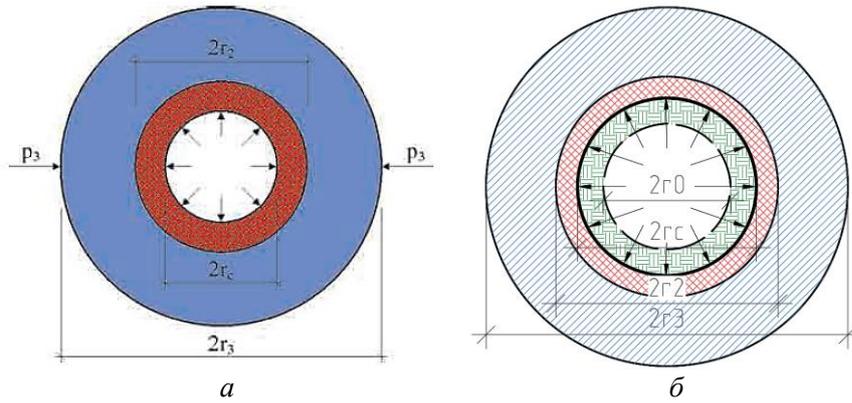


Рисунок 4.5. Расчетная схема к определению НДС вокруг сваи:
a – для забивной сваи по Тер-Мартirosяну З.Г.[123], *б* – для буроинъекционной сваи.

Решение по указанной расчетной схеме известно как «решение Лямэ» и в перемещениях имеет следующий вид:

$$u(r) = Ar_c + \frac{B}{r} \quad (4.16)$$

где $A = \frac{p_2 r_c^2 - p_3 r_3^2}{r_3^2 - r_c^2} \cdot \frac{1 - \nu}{E}$, $B = \frac{(p_2 - p_3) r_c^2 r_3^2}{r_3^2 - r_c^2} \cdot \frac{1 + \nu}{E}$, $u(r) = r_2 - r_c$, r_2 – радиус, формируемый в результате упругого отжатия грунта в стороны при устройстве сваи, $p_3 = \gamma H \zeta_0$.

Приращение радиуса $u(r)$ за счет упругого отжатия грунта при устройстве забивных свай определяется исходя из предположения о равенстве объема грунта в цилиндре диаметром $2r_c$ и условном полом цилиндре с толщиной стенки $(r_2 - r_c)$. Однако, в силу технологических особенностей устройства буроинъекционных свай на первом этапе формируется скважина начальным диаметром $2r_0$, при этом грунт разбуривается, и буровой шлам полностью удаляется из скважины. На втором этапе происходит нагнетание в скважину мелкозернистой бетонной смеси под избыточным давлением, что способствует уплотнению и расширению стенок скважины и формированию окончательного диаметра буроинъекционной сваи $2r_c$. Диаметр $2r_2$ формируется в результате увеличения первоначального диаметра скважины за счет упругого отжатия грунта в стороны. Расчетная схема в данном случае представлена на рисунке 4.5б. В соответствии с указанной расчетной схемой приращение радиуса $u(r)$ за счет упругого отжатия грунта можно определить из допущения о равенстве объемов грунта в условном полом цилиндре с толщиной стенки $(r_c - r_0)$ и условном полом цилиндре с толщиной стенки $(r_2 - r_c)$.

С учетом формулы (4.2) получаем следующую зависимость для определения радиуса сваи после опрессовки скважины:

$$r_c = r_0 \left(1 + 0,35 \frac{V_{\text{смеси}} - V_{\text{скв.}}}{V_{\text{скв.}}} \right) \quad (4.17)$$

Введем переменную $z = \left(1 + 0,35 \frac{V_{\text{смеси}} - V_{\text{скв.}}}{V_{\text{скв.}}} \right)$ и получим следующую зависимость:

$$r_2 = r_0 \cdot \sqrt{2z^2 - 1} \quad (4.18)$$

Учитывая, что $r_3 = kr_c = kr_0z$ и $u(r) = r_2 - r_c$ приведем выражение (4.16) к следующему виду:

$$r_0 \sqrt{2z^2 - 1} - r_0z = r_0z \frac{p_2 - p_3 k^2}{k^2 - 1} \cdot \frac{1 - \vartheta}{E} + r_0z \frac{(p_2 - p_3)k^2}{k^2 - 1} \cdot \frac{1 + \vartheta}{E} \quad (4.19)$$

Откуда получаем зависимость для определения реактивного напряжения, оказывающего сопротивление боковому расширению грунта при нагружении сваи вдавливающим усилием:

$$p_2 = \frac{(Ek^2 - E)\sqrt{2z^2 - 1} + [(2p_3 - E)k^2 + E]z}{z[(k^2 - 1)\vartheta + k^2 + 1]} \quad (4.20)$$

В формуле (4.20) коэффициент влияния k следует назначать в зависимости от глубины погружения нижнего конца сваи, вида грунта и величины давления опрессовки с учетом отдыха сваи и релаксации напряжений. Зависимость коэффициента k от указанных параметров представлена в главе II.

На рисунке 4.6 представлено изменение расчетного сопротивления грунта под пятой буроинъекционных свай длиной 5 м, 10 м и 15 м для суглинка с показателем текучести $I_L = 0,5$, определенного в соответствии с выражением (4.15) и по СП 24.13330, при различной величине нагнетаемого в скважину раствора формировочной смеси ($V_{смеси}$). Физико-механические характеристики грунта в формуле (4.15) приняты в соответствии с приложением А СП 22.13330 при $I_L = 0,5$.

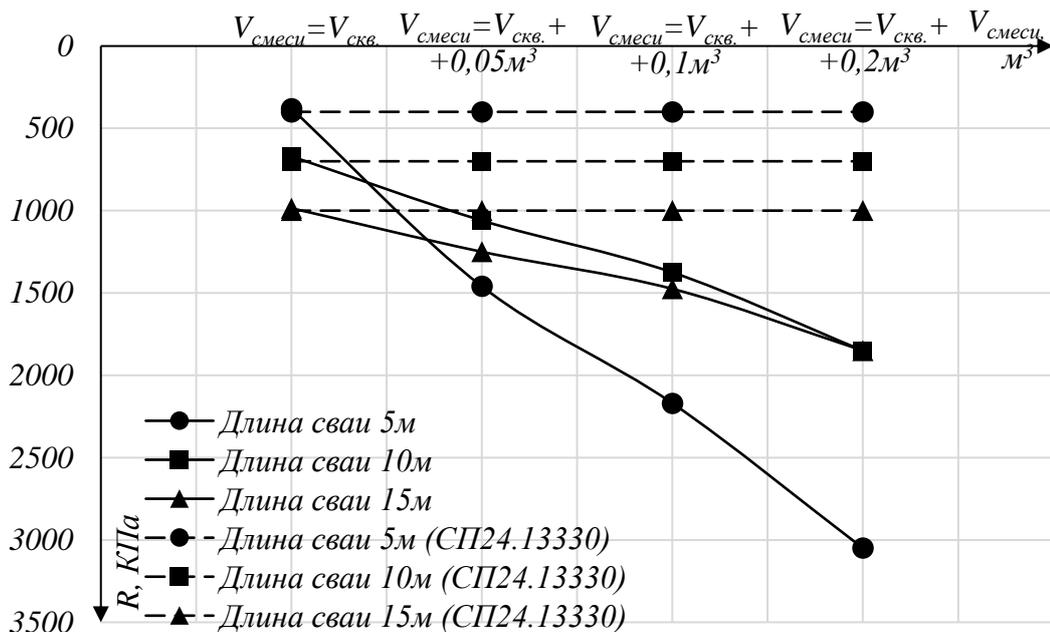


Рисунок 4.6. Расчетное сопротивление грунта по пяте буроинъекционных свай при $I_L = 0,5$.

В соответствии с данными рисунка 4.6 можно сделать вывод, что преимуществом использования формулы (4.15) с учетом выражения (4.20) для определения расчетного сопротивления грунта под пятой буроинъекционных свай является то, что появляется возможность учитывать количество избыточного формировочного раствора, подаваемого в скважину при устройстве свай. Очевидно, что чем больше количество избыточного раствора, нагнетаемого в скважину, тем выше давление опрессовки, которое способствует большему уплотнению и расширению стенок скважины, и тем выше величина расчетного сопротивления грунта R . Использование табличных данных СП 24.13330 для определения расчетного сопротивления грунта под пятой буроинъекционных свай не позволяет учесть данного фактора. Предложенный подход определения расчетного сопротивления грунта под пятой буроинъекционной сваи позволяет получать данные в том числе и для глинистых грунтов с показателем текучести $I_L > 0,6$ и учитывать вклад пяты сваи в общую несущую способность. Необходимость учета данного обстоятельства подтверждается рядом экспериментальных работ [99, 103, 122, 140], в которых было установлено, что пята сваи вносит вклад в формирование общей несущей способности инъекционных свай в глинистых грунтах при $I_L > 1$. Дополнительно следует отметить, что использование данного подхода оправдано в случаях, когда при опрессовке скважины избыточным давлением сохраняется ее сплошность и не происходит образование неконтролируемых гидроразрывов.

В таблице 4.2 приведено сравнение расчетной несущей способности буроинъекционных свай по нижнему концу $F_{d,R, \text{расч}}$, определенной автором с учетом полученных зависимостей (4.1), (4.3) и (4.15), с экспериментально-теоретическими исследованиями Петухова А.А. [99], Шалгинова Р.В. [140], Тарасова А.А. [122] и Полищука А.И. [103], обозначаемыми как $F_{d,R, \text{эсп}}$. Указанными авторами величина несущей способности по пяте свай получена на основе экспериментальных исследований, а также в результате аналитического расчета в предположении о том, что «...расчетное сопротивление грунта R под нижним концом свай соответствует величине давления, когда горизонтальное давление грунта в уровне пяты сваи равно боковому реактивному давлению грунта...» на основе уравнений, полученных Бахолдиным Б.В. [103, 122, 140] В таблице 4.2 маркировка свай принята в соответствии со спецификацией авторов. Экспериментальные сваи выполнялись с созданием избыточного давления в пределах 300-1000 кПа.

Таблица 4.2. Сопоставление расчетной несущей способности свай по нижнему концу с экспериментальными данными.

Марка свай	Длина свай, м	d_0 , м	$V_{смеси}$, м ³	C , кПа	φ , град.	E , МПа	γ , кН/м ³	k	$F_{d,R, расч}$, кН	$F_{d,R, эксп}$, кН	Δ , %
ИС-4	5,00	0,148	0,60	14,0	16	1100	18,6	2,0	92,6	95,2	3
ИС-6	5,00	0,188	0,70	14,0	16	1100	18,6	2,0	87,4	81,6	-7
ИС-9	3,50	0,078	0,20	14,0	16	1100	18,6	2,5	67,0	70,9	6
ИС-10	3,50	0,078	0,20	14,0	16	1100	18,6	2,5	67,0	70,9	6
ИС-11	3,50	0,100	0,30	14,0	16	1100	18,6	2,5	93,6	90,1	-4
ИС-13	1,50	0,188	0,05	6,0	22	4500	20,3	3,0	12,5	15,0	17
ИС-14	1,50	0,188	0,06	6,0	22	4500	20,3	3,0	19,4	16,6	-14
С-7	4,50	0,188	0,17	13,7	27	8700	19,8	2,0	77,1	96,3	20
С-12	4,70	0,188	0,19	13,7	26	4400	19,9	2,0	86,8	103,0	16

Анализируя данные таблицы 4.2 можно сделать вывод, что несущая способность буроинъекционных свай по нижнему концу, определенная автором в соответствии с формулами (4.1), (4.3) и (4.15), имеет хорошую сходимость с экспериментально-теоретическими данными: в среднем отклонение составляет 12% при максимальном значении 20% и минимальном 3%.

В таблице 4.3 представлены данные по определению расчетной несущей способности рассматриваемых свай и их сопоставление с экспериментальными данными Петухова А.А. [99], Шалгинова Р.В. [140], Тарасова А.А. [122] и Полищука А.И. [103]. Следует отметить, что формула (4.14) для определения несущей способности по боковой поверхности буроинъекционных свай обоснована для глинистых грунтов с показателем текучести $I_L > 0,4$ при создании избыточного давления $p_{опр} \leq 400$ кПа, в связи с чем несущая способность по боковой поверхности свай ИС-4...ИС-11 не определялась, так как при их устройстве величина давления опрессовки составила 600...1000 кПа. В таблице 4.3 маркировка свай принята в соответствии со спецификацией авторов.

Таблица 4.3. Сопоставление несущей способности свай, определенной по формуле (4.1), с экспериментальными данными.

Марка свай	$F_{d,R, расч}$, кН	$F_{df, расч}$, кН	$F_d, расч$, кН	$F_d, эксп$, кН	Δ , %
ИС-4	92,6	-	-	200,0	-
ИС-6	87,4	-	-	280,0	-
ИС-9	67,0	-	-	137,5	-
ИС-10	67,0	-	-	137,5	-
ИС-11	93,6	-	-	187,5	-
ИС-13	12,5	89,4	101,9	90,0	-11
ИС-14	19,4	93,4	112,8	90,0	-20
С-7	77,1	170,3	247,4	287,0	14
С-12	86,1	174,8	260,9	287,0	10

На основании данных таблицы 4.3 можно сделать вывод, что предложенный в настоящей работе усовершенствованный метод определения несущей способности буроинъекционных свай, устраиваемых с созданием избыточного давления раствора, позволяет получать хорошую сходимость с экспериментальными данными: отклонение составляет до 20%.

4.2. Расчет осадки буроинъекционных свай

Оценкой эффективности используемого типа свайного фундамента помимо несущей способности одиночной сваи является также его осадка. Причем, величина осадки одиночной сваи и свайного фундамента зачастую является определяющим показателем эффективности.

В соответствии с действующей нормативной базой осадка буроинъекционной сваи определяется по указаниям СП 24.13330, как и осадка любого другого типа свай. Осадка определяется в упругой постановке (на основе модели линейно-деформируемой среды) и график «нагрузка-осадка» носит явно выраженный линейный характер, что соответствует фактическому поведению работы свай под нагрузкой только на начальном этапе приложения нагрузки..

На сегодняшний день существует большое разнообразие аналитических и численных решений, направленных на нахождение осадки одиночной сваи с учетом поэтапности ее загрузки статической вдавливающей нагрузкой. Большой вклад в развитие методов определения осадки одиночной сваи внесли Акулецкий А.С., Барвашов В.А., Бартоломей А.А., Бартоломей Л.А., Бахолдин Б.В., Березанцев В.Г., Бобровский Я.М., Богомолов А.Н., Богомолов В.А., Герсеванов Н.М., Голубков В.Н., Готман А.Л., Готман Н.З., Григорян А.А., Далматов Б.И., Дегиль Г.О., Джантимиров Х.А., Динь Хоанг Нама, Егоров А.И., Зарецкий К.Ю., Знаменский Б.В., Ильичев В.А., Конюшков В.В., Клейнер И.М., Лапшин Ф.К., Луга А.А., Лушников В.В., Малинин А.Г., Малоян Э.Л., Малышев М.В., Мангушев Р.А., Мариничев М.Б., Маршалка А.Ю., Мишаков В.А., Никитенко М.И., Никитина Н.С., Никифорова Н.С., Нуждин Л.В., Огранович А.Б., Петухов А.А., Полищук А.И., Пономарев А.Б., Попова О.В., Пронозин Я.А., Раюк В.Ф., Россихин Ю.В., Самарин Д.Г., Самохвалов М.А., Сахаров И.И., Сбитнев А.В., Семенов И.В., Смолин Б.С., Соболевский Д.Ю., Соболевский Ю.А., Сорочан Е.А., Тарасов А.А., Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Улицкий В.М., Фадеев А.Б., Федоров Б.С., Федоровский В.Г., Чернявский Д.А., Цытович Н.А., Шалгинов Р.В., Шашкин А.Г., Шулятьев О.А., Varley A.D., Bruce D.A., Bustamante M.,

Estephan R., Gomez J., Katzenbah R., Lahuta H., Lei W., Lizzi F., Ostermayer H.I., Randolph M.F., Spencer I.M., Telford W. и другие.

В настоящей работе определение осадки буроинъекционных свай предлагается выполнять в соответствии с данными исследований, выполненных Акулецким А.С. под руководством профессора Тер-Мартirosяна З.Г. [38]. В основе определения осадки свай лежит расчетная схема, основанная на предположении о раздельной работе свай по боковой поверхности и по пяте (рисунке 4.7). Данная расчетная схема взаимодействия свай с многослойным основанием для определения ее осадки неоднократно применялась в ряде других работ [43, 103, 125, 126, 128, 129].

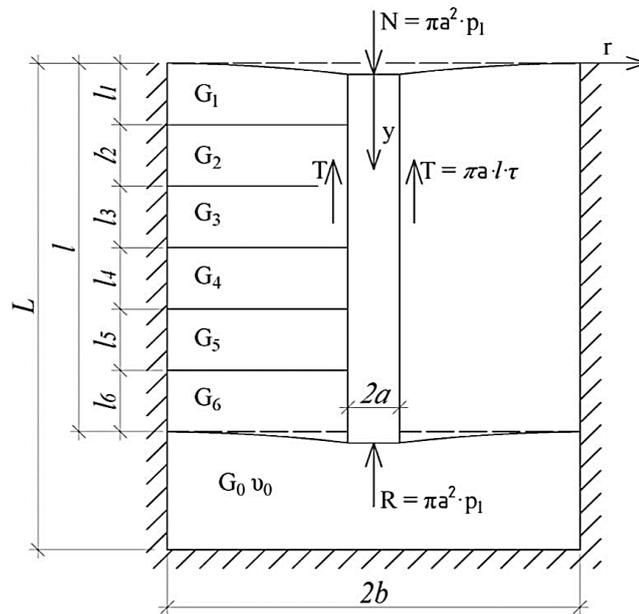


Рисунок 4.7. Расчетная схема взаимодействия свай с многослойным основанием [38].

В качестве основных допущений при расчете осадки принято, что свая имеет постоянный средний диаметр по всей длине ствола, а ее боковая поверхность имеет гладкие стенки, а не волнообразные, формируемые при устройстве свай. Процесс деформирования грунта происходит за счет сдвиговых деформаций, объемные деформации грунта не учитываются, также не учитывается сжатие ствола свай.

Осадка нижнего конца свай S_R , мм, зависит от уровня действующих напряжений p_R , кПа, приходящихся на пяту свай в результате ее нагружения вертикальной нагрузкой N , кН, и предельного уровня напряжений p_R^* , кПа, которые может воспринимать грунт под пятой свай. Осадку нижнего конца свай, когда грунты основания обладают упругопластическими свойствами, можно определять как осадку круглого жесткого штампа путем введения поправочного коэффициента K_l , учитывающего глубину расположения пяты свай [38, 50, 103 131]. Очевидно, что $K_l < 1$, тогда:

$$S_R = p_R \cdot \frac{\pi r (1 - \vartheta_R) \omega K_l}{4 G_R} \cdot \frac{p_R^*}{p_R^* - p_R} \quad (4.21)$$

где r – радиус сваи, м, ϑ_R и G_R – коэффициент Пуассона и модуль сдвига несущего слоя грунта, кПа, p_R – напряжения под нижним концом сваи, кПа, p_R^* – предельные напряжения по пяте сваи, кПа, ω – коэффициент формы, принимаемый для круглого сечения равным единице [50].

Во II главе было установлено, что простым и достоверным методом определения сформировавшегося среднего радиуса буроинъекционных свай в результате опрессовки избыточным давлением является способ, предложенный в работе *Abd Elaziz and El Naggar* [8]. Способ основан на учете избыточного количества рабочего раствора $V_{inc} = V_{смеси} - V_{скв.}$, подаваемого в скважину при опрессовке. Таким образом, средний радиус сваи r в результате ее инъекционной опрессовки определяется как:

$$r = r_0 \left(1 + 0,35 \frac{V_{смеси} - V_{скв.}}{V_{скв.}} \right) \quad (4.22)$$

Предельные напряжения по пяте сваи p_R^* есть расчетное сопротивление R несущего слоя грунта, которое зависит не только от прочностных характеристик грунта основания и глубины устройства сваи (нормативный подход), но также и от его деформационных характеристик и определяется по формуле (4.15) [123].

Реактивное напряжение, оказывающее сопротивление боковому расширению грунта при нагружении буроинъекционной сваи p_2 , кПа, определяется в соответствии с расчетной схемой, представленной на рисунке 4.5б, по формуле (4.20).

Модуль сдвига несущего слоя грунта G_R , кПа, определяется в зависимости от модуля деформации E_R , кПа, и коэффициента Пуассона грунта ϑ_R [127]:

$$G_R = \frac{E_R}{2(1 + \vartheta_R)} \quad (4.23)$$

Доказано, что в процессе устройства буроинъекционных свай происходит изменение физико-механических характеристик контактного слоя грунта в результате уменьшения его пористости. Поэтому в формуле (4.23) следует использовать значение модуля деформации E_R , получаемого в результате опрессовки скважины избыточным давлением и вычисляемого в соответствии с алгоритмом, представленным в Главе II по (2.29). Данный подход по использованию измененных характеристик контактного слоя грунта, получаемых в результате опрессовки скважины избыточным давлением, при определении несущей способности и осадки свай успешно использовался в ряде работ [89, 99, 110, 122, 137, 140, 141].

Деформация грунта по боковой поверхности сваи (сдвиговая деформация) $\gamma(x)$ с учетом упругопластических свойств может быть описана уравнением, предложенным Тимошенко С.П. [132] и актуализированным применительно к грунтам профессором Тер-Мартirosяном З.Г. [38]:

$$\begin{cases} \gamma(x) = \frac{\tau(x)}{G} \cdot \frac{\tau^*}{(\tau^* - \tau(x))} \\ \gamma(x) = -\frac{dS_T}{dx} \end{cases} \quad (4.24)$$

где G – средневзвешенный модуль сдвига многослойного основания, кПа, $\tau(x)$ – действующие по горизонтальной координате x касательные напряжения, кПа, τ^* – средневзвешенные предельные касательные напряжения, кПа, S_T – деформация грунта по боковой поверхности сваи (осадка), мм.

Средневзвешенный модуль сдвига G многослойного основания определяется как [130]:

$$G = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n G_i l_i \quad (4.25)$$

где l – длина сваи, м, $i=1, 2..n$ – номер слоя, G_i – модуль сдвига i -го слоя грунта, кПа.

Модуль сдвига i -го слоя грунта G_i определяется в соответствии с выражением (4.23), при этом значение модуля деформации E_i принимается по (2.29) с учетом опрессовки стенок скважины избыточным давлением раствора.

Предельные касательные напряжения по боковой поверхности буроинъекционной сваи τ^* , кПа, предлагается определять как средневзвешенное по длине сваи расчетное сопротивление по боковой поверхности f_i , кПа, в соответствии с полученными выражениями (4.12) – (4.14), которые позволяют учесть возникающие остаточные напряжения при воздействии избыточным давлением на стенки скважины в процессе устройства буроинъекционных свай, а также давление бетонной смеси и давление рядом расположенных сооружений.

Касательные напряжения $\tau(x)$ возникающие от действия статической нагрузки N , кН, и затухающие с увеличением координаты x , определяются по следующей формуле:

$$\tau(x) = \tau \cdot \frac{r}{x} \quad (4.26)$$

где τ – касательные напряжения, возникающие непосредственно на контакте «свая-грунтовое основание», кПа.

Для определения τ запишем условия равновесия, в случае нагружения сваи сосредоточенной силой N :

$$N=T+R \quad (4.27)$$

где T – усилие, возникающее по боковой поверхности сваи в результате действия сил трения, кН, R – усилие, возникающее по пяте сваи, кН.

Выражение (4.27) можно представить в следующем виде:

$$\pi r^2 p_N = 2\pi r l \tau + \pi r^2 p_R \quad (4.28)$$

где p_N – напряжения, возникающие на оголовке сваи, от действия сосредоточенной силы N , кПа, p_R – напряжения под нижним концом сваи, возникающие от действия сосредоточенной силы N , кПа.

Из выражения (4.28) следует, что:

$$\tau = (p_N - p_R) \cdot \frac{r}{2l} \quad (4.29)$$

Подставив выражение (4.29) в формулу (4.26), а затем в равенство (4.24) и, выполнив его интегрирование, получаем следующую зависимость для нахождения деформации грунта контактного слоя (осадки ствола сваи по боковой поверхности):

$$S_T = (p_N - p_R) \cdot \frac{r^2}{2lG} \cdot \ln \left(\frac{b - \frac{r^2(p_N - p_R)}{2l\tau^*}}{r - \frac{r^2(p_N - p_R)}{2l\tau^*}} \right) \quad (4.30)$$

Приняв, что осадка грунта под пятой сваи и по ее боковой поверхности одинакова, приравняем выражение (4.21) и (4.30) в результате чего получаем формулу для вычисления напряжения под нижним концом сваи, возникающие от действия сосредоточенной силы N :

$$p_R = \frac{2rG_R(p_R^* - p_R) \cdot (p_N - p_R)}{\pi l G \cdot (1 - \vartheta_R) \omega K_l p_R^*} \cdot \ln \left(\frac{b - \frac{r^2(p_N - p_R)}{2l\tau^*}}{r - \frac{r^2(p_N - p_R)}{2l\tau^*}} \right) \quad (4.31)$$

где b – радиус влияния буринъекционной сваи, м, принимается равным как для анкера $b = 2..5r$ [103, 125, 126].

Выражение (4.31) не имеет строго аналитического решения и решается численно, например, методом итераций, при помощи любого специализированного математического программного комплекса.

После нахождения неизвестного напряжения под нижним концом сваи p_R , возникающего от действия сосредоточенной силы N , подставляем его в уравнение (4.21) и находим осадку буринъекционной сваи.

Алгоритм определения осадки буринъекционной сваи в виде блок-схемы представлен на рисунке 4.8.

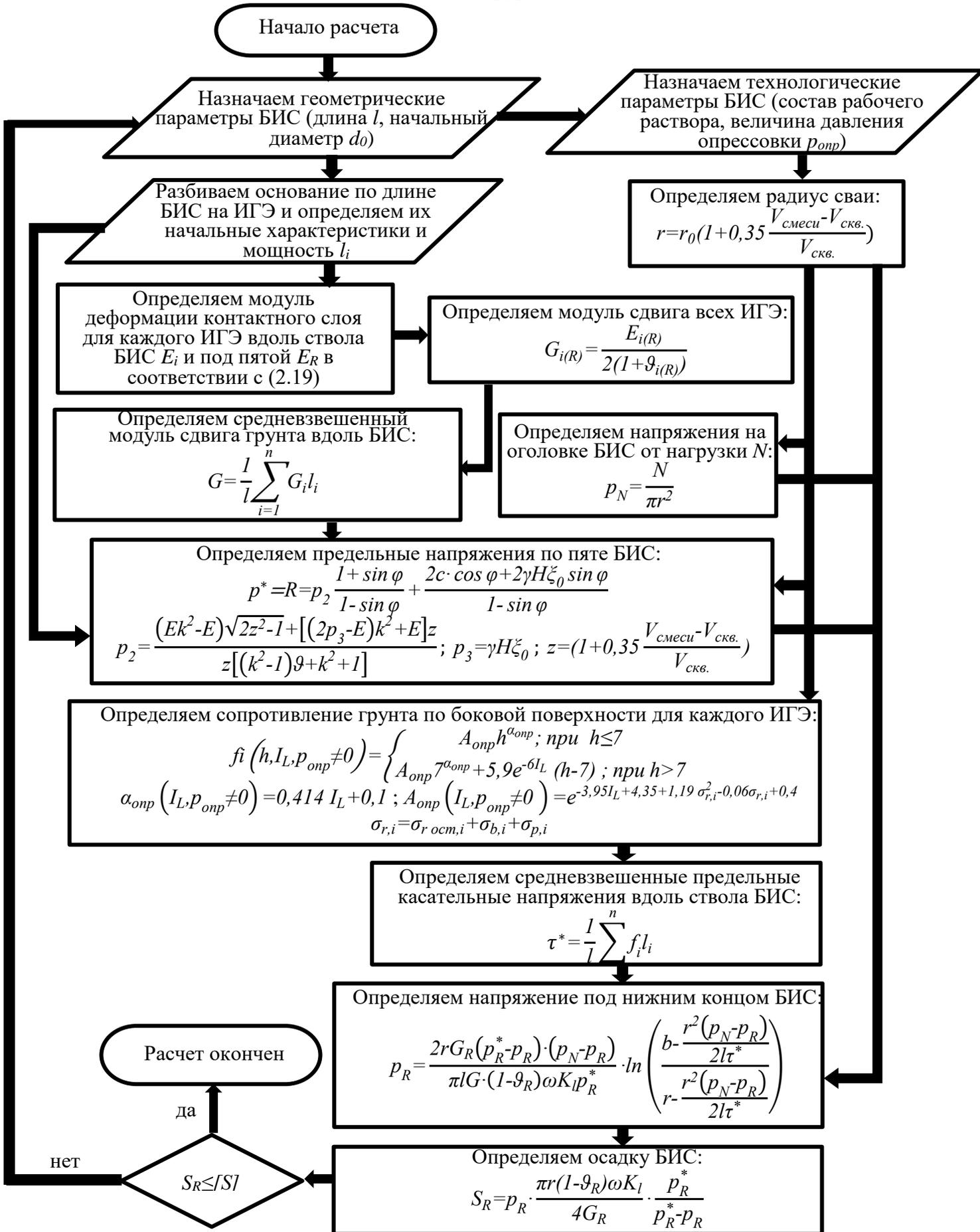


Рисунок 4.8. Блок-схема расчета осадки буроинъекционных свай.

На рисунке 4.9 представлено сравнение значений осадки буринъекционных свай, выполненных с созданием по стволу сваи избыточного давления опрессовки, полученных в результате проведения статических испытаний и вычисленных аналитически по формуле (4.21).

На рисунке 4.9 а, б представлено сравнение с натурными испытаниями автора, проводившимися на экспериментальной площадке в г. Тюмени (см. Главу III). Длина буринъекционных свай составила $l=14$ м, начальный диаметр $d_0=0,20$ м, свая Б-2 выполнялась с созданием избыточного давления опрессовки $p_{опр}=200$ кПа, свая Б-3 выполнялась с созданием избыточного давления опрессовки $p_{опр}=350$ кПа. С поверхности до глубины 8 м залегает слой суглинка мягкопластичного, для которого $\rho=1,78$ г/см³, $W=39,2\%$, $e=1,07$, $I_L=0,63$, $E=4,5$ МПа, $\nu=0,37$, $C=0,012$ МПа, $\varphi=13^\circ$. С глубины 8 м залегает слой суглинка тугопластичного, для которого $\rho=1,86$ г/см³, $W=29,6\%$, $e=0,84$, $I_L=0,32$, $E=7,8$ МПа, $\nu=0,37$, $C=0,023$ МПа, $\varphi=19^\circ$.

На рисунке 4.9 в, г представлено сравнение с натурными испытаниями Тарасова А.А. [122], проводившимися на экспериментальной площадке в г. Томске. Длина сваи С-7 составила $l=4,5$ м, для сваи С-12 $l=4,7$ м, начальный диаметр $d_0=0,188$ м, свая С-7 выполнялась с созданием избыточного давления опрессовки $p_{опр}$ =до 400 кПа, свая С-12 выполнялась с созданием избыточного давления опрессовки $p_{опр}$ =до 300 кПа. С поверхности до глубины 4,1 м залегает слой супеси пластичной, для которой $\rho=1,99$ г/см³, $W=17,7\%$, $e=0,60$, $I_L=0,42$, $E=11,3$ МПа, $\nu=0,33$, $C=0,022$ МПа, $\varphi=29^\circ$. Далее до глубины 6,5 м залегает слой супеси текучей, для которой $\rho=1,98$ г/см³, $W=23,5\%$, $e=0,68$, $I_L>1$, $E=8,70$ МПа, $\nu=0,33$, $C=0,014$ МПа, $\varphi=27^\circ$. Сваи выполнены с глубины 1,5-1,7 м от поверхности земли.

На рисунке 4.9 д, е представлено сравнение с экспериментальными исследованиями Петухова А.А. [99], проводившимися на экспериментальной площадке в г. Томске. Длина свай составила $l=1,5$ м, начальный диаметр $d_0=0,188$ м, сваи ИС-13, ИС-14 выполнялись с созданием избыточного давления опрессовки $p_{опр}$ =до 350 кПа. Часть сваи длиной 0,7 м от планировочной поверхности располагалась в слое супеси пластичной, для которой $\rho=2,03$ г/см³, $W=20,5\%$, $e=0,59$, $I_L=0,53$, $E=6,0$ МПа, $\nu=0,33$, $C=0,027$ МПа, $\varphi=23^\circ$, нижняя часть сваи располагалась в слое супеси текучей, для которой $\rho=2,02$ г/см³, $W=22,2\%$, $e=0,62$, $I_L=1,5$, $E=4,5$ МПа, $\nu=0,33$, $C=0,006$ МПа, $\varphi=22^\circ$.

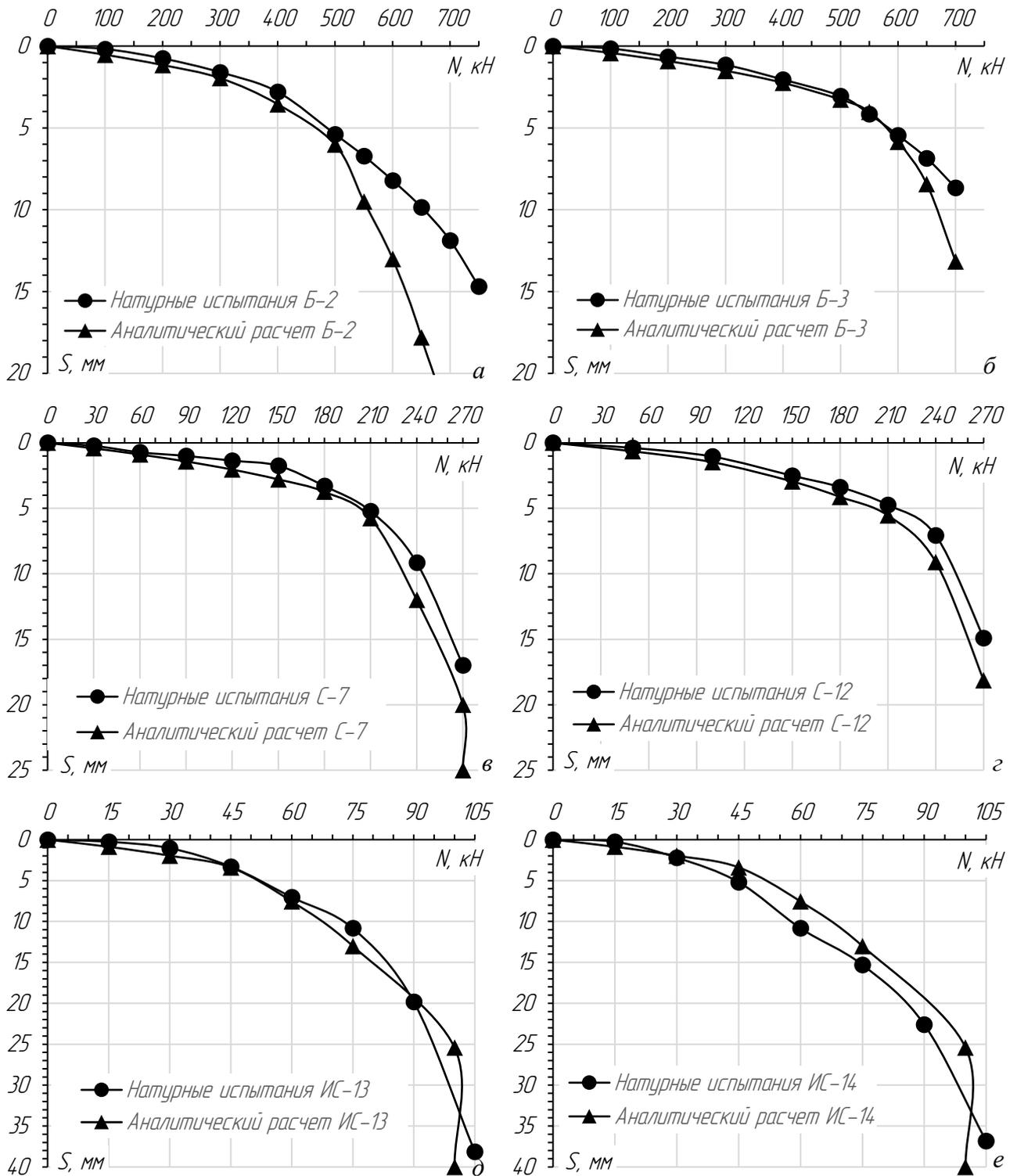


Рисунок 4.9. Графики зависимости осадки от нагрузки для буроналивных свай, выполненных с опрессовкой избыточным давлением:

- а, б – сопоставление с натурными испытаниями автора,*
- в, г – сопоставление с натурными испытаниями Тарасова А.А. [122],*
- д, е – сопоставление с натурными испытаниями Петухова А.А. [99].*

Анализируя графики «нагрузка-осадка», представленные на рисунке 4.9, можно сделать вывод, что усовершенствованная методика определения осадки буроналивных свай, в отличие от нормативной методики, представленной в СП 24.13330, позволяет более достоверно определять осадку свай в условиях статического нагружения. Средние

величины отклонений от экспериментальных значений составляют от 5% до 25%, а кривая «нагрузка-осадка», полученная на основании расчета по формуле (4.21) находится ниже экспериментальной кривой (исключение составляет график «нагрузка-осадка» для свай ИС-14).

Кривая «нагрузка-осадка», получаемая на основании расчета по предложенному алгоритму, повторяет характер экспериментальной кривой, что в случае опирания буронабивных свай в слабые грунты основания позволяет выделить два характерных участка их работы:

1. **Линейный участок (I)**, характеризующийся быстро затухающими значениями осадок и сохраняющий практически линейный характер работы до значения нагрузки, которая составляет $(0,40-0,50)N$ от максимально приложенной;

2. **Нелинейный участок (II)**, характеризующийся явным упруго-пластическим характером работы, что проявляется более интенсивным приращением осадки фрагментов БИС при их продолжительной стабилизации. Окончание рассматриваемого участка работы проявляется, как правило, в виде неограниченного роста деформаций при постоянстве приложенной нагрузки (срыв свай).

4.3. Рекомендации к выполнению численного моделирования буронабивных свай

В современной инженерной практике при разработке проектов строительства и реконструкции различных зданий и сооружений все чаще прибегают к численным методам для обоснования эффективности применяемых решений. На сегодняшний день существует ряд сертифицированных и верифицированных в нашей стране программных комплексов, позволяющих решать различные геотехнические задачи. К наиболее популярным программным комплексам среди них относятся ПК *Plaxis*, ПК *Midas FEA NX* (*Midas GTS NX*), программы для расчетов *Malinin Soft* и др.

Использование геотехнических программных комплексов позволяет моделировать взаимодействие свайных фундаментов с грунтовым основанием для оценки их несущей способности и осадки. Однако, чтобы поведение свай под нагрузкой было корректным, в программном комплексе необходимо предварительно назначать некоторые параметры, набор которых зависит от конкретного применяемого расчетного комплекса. Но в целом, к общим таким параметрам относятся:

- размер расчетной области;
- вид конечно-элементной сетки;

- размер конечных элементов;
- граничные условия;
- свойства материалов и др.

С целью назначения оптимальных параметров для моделирования поведения под нагрузкой буроинъекционных свай в ПК *Midas FEA NX (Midas GTS NX)* была выполнена оценка их влияния на результаты расчетов и сопоставление полученных результатов с натурными данными.

ПК *Midas FEA NX (Midas GTS NX)* позволяет моделировать взаимодействие сваи и окружающего грунтового массива 3 способами [45]:

- моделирование трехмерными пространственными элементами;
- моделирование одномерным стержневым элементом посредством введения пружин;
- моделирование одномерным стержневым элементом посредством введения свайного интерфейса.

При первом способе свая и грунтовый массив задаются твердыми объемными элементами (*solid*), а их контактная область (соединение твердых элементов) описывается интерфейсными элементами. Данный подход позволяет получать более точные результаты при оценке взаимодействия свай с грунтовым массивом под нагрузкой, так как напрямую учитывает геометрические параметры сваи в модели, а взаимодействие сваи с грунтом возможно задавать, изменяя свойства интерфейсных элементов (упругие, упругопластические и т.д.). Однако, данный подход является довольно трудоемким, так как свая также должна быть разбита сеткой конечных элементов, что в свою очередь ведет к увеличению количества элементов и узлов в модели и, как следствие, требует большего количества времени для расчета при большом количестве свай в модели.

При втором подходе свая моделируется одномерным стержневым элементом (балкой), а грунтовый массив твердыми объемными элементами. Объединение узлов стержневого элемента сваи с узлами объемных элементов грунтового массива осуществляется посредством введения узловых пружин, характеристики которых для каждой пружинки необходимо вводить вручную. Данный подход используется для упрощения модели, так как позволяет не моделировать массив грунта. Однако, при мелком разбиении объемных элементов также образуется большое количество узлов, что ведет к увеличению количества элементов в модели и требует большого количества времени для ее

расчета. Дополнительно следует отметить, что не учитывается совместная работа сваи и грунта по причине жесткой узловой связи элементов сваи и грунта и, как следствие, отсутствует проскальзывание сваи по грунту.

В рамках третьего подхода свая моделируется одномерным стержневым элементом (балкой), грунтовый массив твердыми объемными элементами, а взаимодействие сваи и грунтового массива осуществляется путем введения свайного интерфейса (набора виртуальных пружин). При данном подходе учитывается совместная работа сваи и грунта, так связь между элементом сваи и грунтовым массивом не является жесткой, а интерфейсы, описывающие взаимодействие сваи с грунтом по боковой поверхности и по пяте, задаются независимо друг от друга и позволяют учитывать в том числе нелинейные свойства скольжения. Использование данного способа моделирования сваи позволяет существенно сократить количество элементов и узлов в модели, что делает его основным для расчета моделей с большим количеством свай.

В настоящей работе даны рекомендации к выполнению численного моделирования буронабивных свай с использованием третьего подхода, когда моделирование сваи осуществляется стержневым элементом, а задание контактного взаимодействия сваи и грунта свайными интерфейсами (набором виртуальных пружин).

При использовании рассматриваемого подхода определяющее значение имеет правильное назначение параметров свайных интерфейсов: предельного сопротивления сдвигу (USF), жесткостных характеристик интерфейсного элемента в продольном (K_t) и нормальном (K_n) к оси сваи направлении, несущей способности под пятой сваи ($TipBC$) и жесткостных характеристик свайного интерфейса под пятой ($TipSS$).

Значения указанных параметров вычисляются для каждого слоя грунта, прорезаемого свайей, по нижеследующим формулам [45]:

$$USF = f_i \gamma_{cf,i} \quad (4.32)$$

$$K_t = \frac{USF}{\Delta s} \quad (4.33)$$

$$K_n = K_t z_i \quad (4.34)$$

$$TipBC = \gamma_{cR} RA \quad (4.35)$$

$$TipSS = \frac{TipBC}{\Delta s} \quad (4.36)$$

где f_i – расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности, кПа, $\gamma_{cf,i}$ и γ_{cR} – коэффициенты условия работы грунта по боковой поверхности и нижним концом сваи,

Δs – расчетная величина осадки сваи, м, K_i – коэффициент пропорциональности грунта, кН/м⁴, z_i – расстояние от поверхности до середины рассматриваемого слоя грунта, м, R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа, A – площадь поперечного сечения сваи, м².

В различной литературе [21, 45, 85, 137] приводятся данные по назначению расчетных областей для выполнения численного моделирования, однако, данные сведения носят обобщающий характер в связи с большим спектром решаемых геотехнических задач, и тем более не позволяют учесть технологических особенностей устройства того или иного вида свай, в том числе буроинъекционных. В то же время неверное назначение расчетной области может привести к погрешности определения осадки буроинъекционной сваи до 300% [137]. Исследования по назначению расчетной области при моделировании цилиндрических и конических буроинъекционных свай были выполнены Чернявским Д.А. [137]. В результате было определено, что минимальная величина расчетной области в вертикальном направлении ниже острия сваи должна составлять не менее 10 диаметров (дальнейшее увеличение расчетной области оказывает влияние на результаты расчета не более 1%). При назначении расчетной области в горизонтальном направлении было установлено, что величина данной области напрямую зависит от длины сваи и инженерно-геологических условий: с увеличением длины сваи величина расчетной области в горизонтальном направлении также увеличивается. Аналогичная зависимость наблюдается при изменении грунтовых условий от менее прочных к более прочным. Обобщая полученные данные выявлено, что размер расчетной области в горизонтальном направлении должен составлять не менее 5 длин сваи. Полученные результаты по назначению размеров расчетной области для выполнения численного моделирования буроинъекционных свай отличаются от рекомендованных в СП 25.13330, где величина расчетной области в горизонтальном направлении принимается равной не менее 10 диаметров сваи, а в вертикальном направлении ниже пяты сваи – не менее 3 диаметров. Автором настоящей работы при выполнении моделирования буроинъекционных свай при назначении расчетных областей использованы рекомендации Чернявского Д.А. [137].

Для оценки влияния на результаты моделирования буроинъекционных свай вида конечно-элементной сетки и ее размера была проведена серия численных экспериментов и их сопоставление с результатами натурных испытаний инъекционной сваи С-12, выполненных Тарасовым А.А. [122]. Длина сваи С-12 составила $l=4,7$ м, начальный

диаметр $d_0=0,188$ м, свая выполнялась с созданием давления опрессовки $p_{опр}$ до 300 кПа. Размеры расчетной области составили 25×8 м ($b \times h$). Разбиение массива грунта на объемные конечные элементы в каждой серии осуществлялось посредством *Hybrid Masher* (преимущественный тип формируемых конечных элементов – гексаэдры) и *Default Tetra Masher* (тип формируемых конечных элементов – тетраэдры). Для оценки влияния размера конечно-элементной сетки на результаты расчета создавались две (область вокруг сваи - контактная и основная область) и три (область вокруг сваи - контактная, переходная область и основная область) зоны для разбиения массива грунта на конечные элементы различного размера (рис. 4.10). Переходная зона использовалась для более гладкого сопряжения контактной и основной областей. При моделировании грунта использовалась идеально упругопластическая модель с критерием прочности Мора-Кулона и ассоциированным законом пластического течения (*Model MC*).

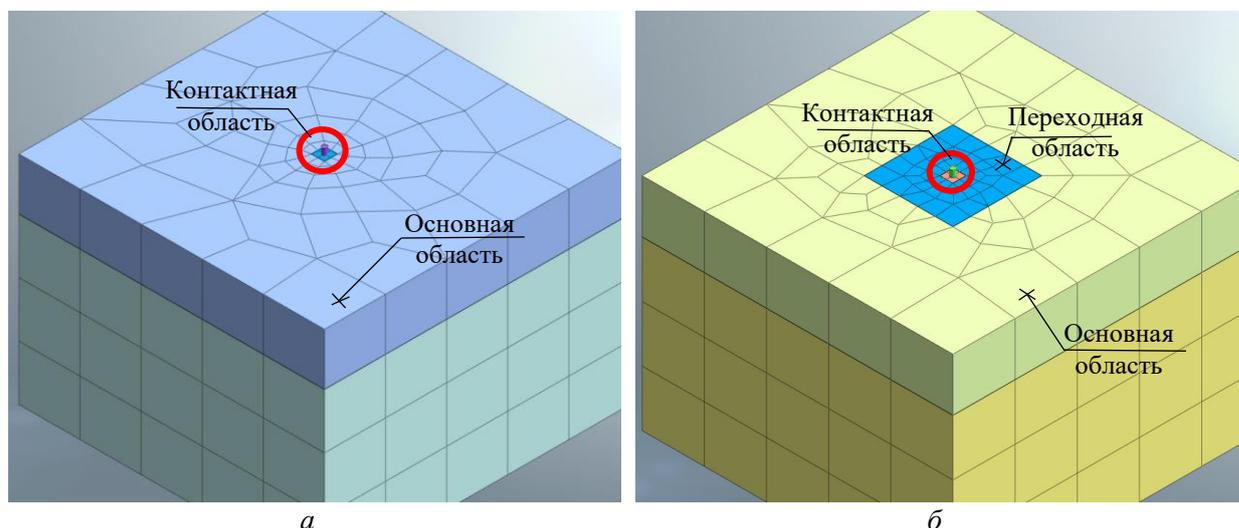


Рисунок 4.10. Схема разбиения расчетной области на зоны:
 а – область с двумя зонами; б – область с тремя зонами.

Контактная область вокруг сваи разбивалась на конечные элементы размерами $0,5d$, $1d$, $1,5d$ и $2d$ (где d – начальный диаметр сваи). Основная область делилась на конечные элементы, размер которых существенно превосходит размер сетки контактной области. Размер конечных элементов переходной области имел промежуточные значения. На рисунке 4.11 представлены результаты численного моделирования.

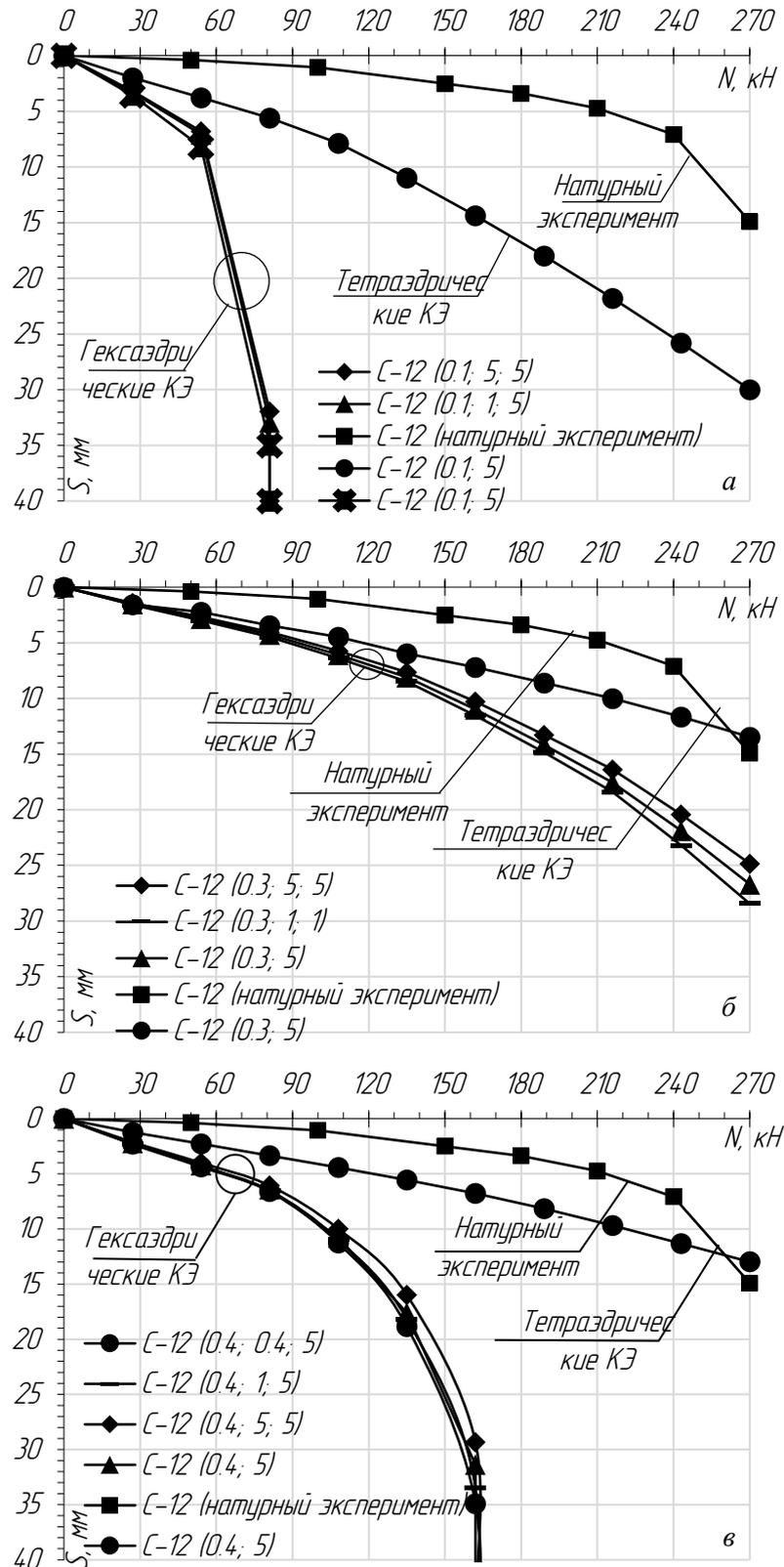


Рисунок 4.11. Результаты численного моделирования буроинъекционной сваи С-12*
 * - в условных обозначениях представлена информация о размерах конечных элементов контактной области вокруг сваи (первое значение), переходной области (среднее значение) и основной области (последнее значение) в метрах

В соответствии с данными рисунка 4.11 установлено, что при моделировании на характер работы буроинъекционной сваи под нагрузкой преимущественно влияет только

тип конечных элементов и размер конечно-элементной сетки контактной области вокруг сваи. Использование гексаэдрических объёмных конечных элементов позволяет получать выраженную нелинейную зависимость между величиной осадки и соответствующей ей усилием, что отвечает характеру работы висячих свай в грунте. При использовании тетраэдрических объёмных конечных элементов зависимость «нагрузка-осадка сваи» приобретает практически линейный характер или слабовыраженный нелинейный в зависимости от величины конечных элементов области вокруг сваи.

Анализируя графики, представленные на рисунке 4.11 выявлено, что характер кривых в случае использования гексаэдрических объёмных конечных элементов при постоянной величине конечных элементов контактной области вокруг сваи ($0,5d$, d , $1,5d$ и $2d$) незначительно зависит от размера конечных элементов переходной и основной областей – в среднем разница составляет до 5%. Также установлено, что наличие переходной области при разбиении массива грунта на объёмные конечные элементы существенно не изменяет результаты моделирования, полученные при отсутствии указанной области.

Сопоставляя графики, полученные по результатам численного моделирования, с натурным экспериментов, выявлено, что наибольшая сходимость результатов получается в случае разбиения контактной области на конечные элементы размерами $1,5d$ как в случае использования гексаэдрических, так и при использовании тетраэдрических конечных элементов. Дополнительно были проведены численные исследования при разбиении контактной области на конечные элементы размерами от $0,25d$ до $10d$ с итерационным шагом $0,25d$, по результатам которых был сделан вывод о том, что изменение размеров конечных элементов контактной области на величину, отличающуюся от $1,5d$, не позволяет получать более точных результатов моделирования.

В следующей серии численных экспериментов на результаты моделирования оценивалось влияние размера контактной области вокруг сваи. Размеры контактной области в плане поочередно задавались от $1,5d$ до $5d$ с шагом итераций $0,5d$, в результате чего было установлено, что наибольшей сходимости результатов моделирования с данными натурального эксперимента удастся добиться при назначении размеров контактной области в пределах $2..3d$. Графики «нагрузка-осадка сваи», представленные на рисунке 4.11, получены при размерах контактной области в плане $3d \times 3d$.

Таким образом, по результатам вариационного численного моделирования буринъекционных свай с использованием подхода, предусматривающего моделирование

сваи стержневым элементом, массива грунта – объемными конечными элементами, а контактного взаимодействия сваи и грунта свайными интерфейсами (набором виртуальных пружин) установлено, что наибольшую сходимость получаемых результатов с данными натурных испытаний свай статической вдавливающей нагрузкой удается получить при выделении в массиве грунта так называемой контактной области вокруг стержневого элемента (сваи) размерами в плане в пределах $(2..3)d \times (2..3)d$ (где d – начальный диаметр сваи) и разбиении данной области на гексаэдрические конечные элементы, размер которых составляет $1,5d$.

Используя полученные рекомендации по моделированию буроинъекционных свай была создана численная модель шести свай и выполнено их сопоставление с данными натурных испытаний. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.12. На рисунке 4.12 а, б представлено сравнение с экспериментальными исследованиями автора, проводившимися на экспериментальной площадке в г. Тюмени. На рисунке 4.12 в, г представлено сравнение с экспериментальными исследованиями Тарасова А.А. [122], проводившимися на экспериментальной площадке в г. Томске. На рисунке 4.12 д, е представлено сравнение с экспериментальными исследованиями Петухова А.А. [99], проводившимися на экспериментальной площадке в г. Томске. Описание опытных буроинъекционных свай и характеристика инженерно-геологических условий их устройства представлена выше. При моделировании грунта использовалась идеально упругопластическая модель с критерием прочности Мора-Кулона и ассоциированным законом пластического течения.

В результате обработки полученных данных установлено, что в случае назначения грунту контактной области вокруг сваи и основной области начальных характеристик (штриховые линии на рис. 4.12), т.е. определенных по результатам инженерно-геологических изысканий до устройства буроинъекционных свай, расхождение в осадке по сравнению с данными натурных испытаний лежит в пределах 65-95% при среднем значении 80%.

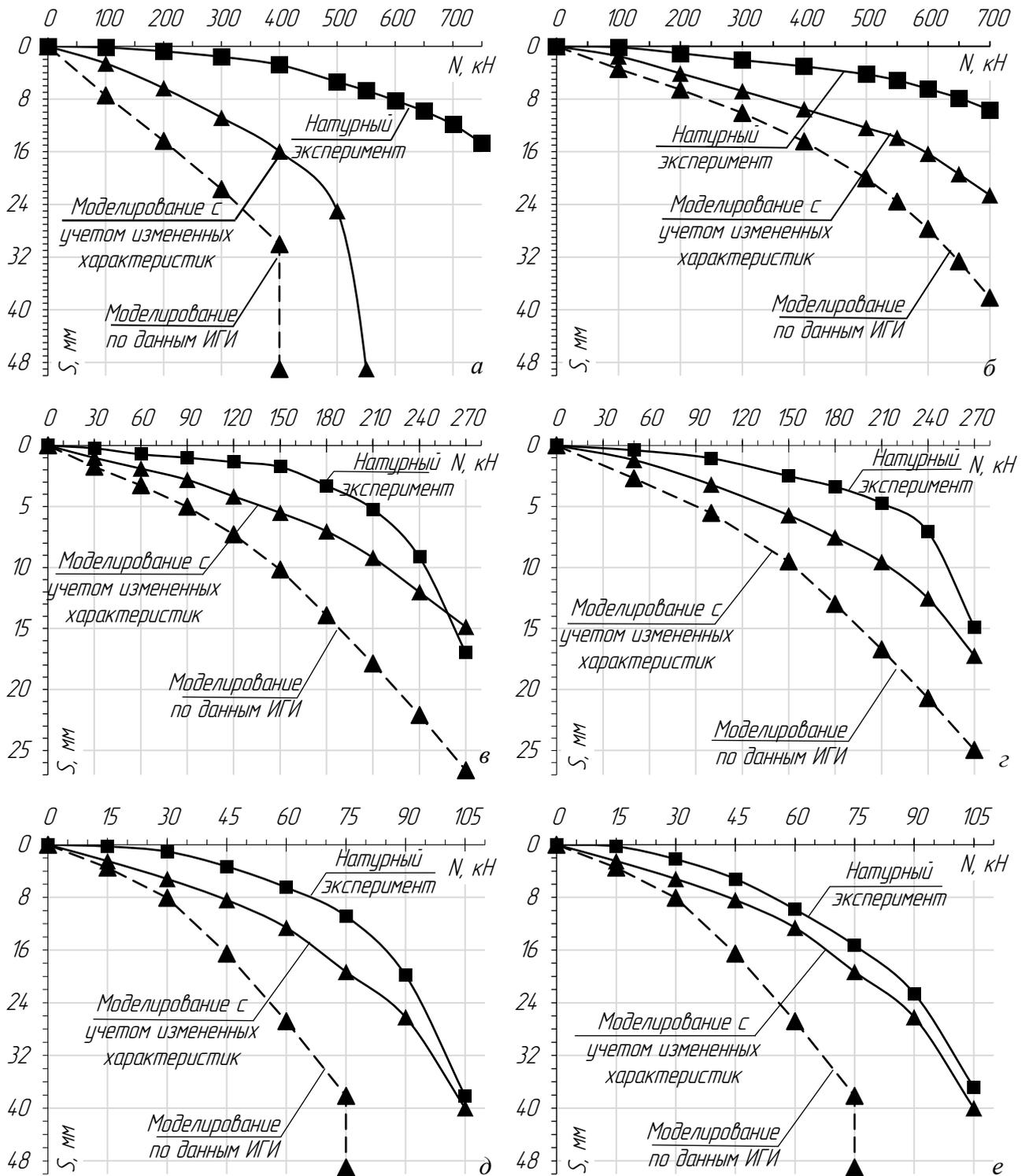


Рисунок 4.12. Графики зависимости осадки от нагрузки для буринъекционных свай по результатам численного моделирования:

а, б – сопоставление с натурными испытаниями автора, в, г – сопоставление с натурными испытаниями Тарасова А.А. [122], д, е – сопоставление с натурными испытаниями Петухова А.А. [99].

Ранее было установлено, что в результате воздействия на скважину избыточным давлением (опрессовке) происходит ее расширение и уплотнение окружающего массива грунта с изменением его физико-механических характеристик [32, 99, 103, 110, 122, 139-141]. Поэтому, используя данные о количестве раствора, нагнетаемого в скважину при

устройстве опытных свай, по формулам (4.2) и (4.3) были определены фактические геометрические параметры сваи (диаметр, периметр и площадь поперечного сечения). Затем по формулам (4.32) – (4.36) были определены параметры свайных интерфейсов (виртуальных пружин) с учетом измененных характеристик грунта контактного слоя: расчетное сопротивление по боковой поверхности f_i определялось в соответствии с полученными выражениями (4.12) – (4.14), которые позволяют учесть возникающие остаточные напряжения при воздействии избыточным давлением на стенки скважины. Расчетное сопротивление R несущего слоя грунта определялось в зависимости от прочностных и деформационных характеристик грунта основания и глубины устройства сваи [123] по формуле (4.15). Осадка буроинъекционной сваи Δs определялась в соответствии с выражением (4.21). Дополнительно задавались измененные физико-механические характеристики грунта контактной области вокруг сваи, которые вычислялись в соответствии с алгоритмом, представленным в Главе II по (2.17) – (2.19).

После пересчета всех параметров и введения их в численную модель были получены графики «нагрузка-осадка сваи» с учетом измененных физико-механических характеристик грунта контактного слоя (сплошные линии на рис. 4.11).

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что моделирование свай с учетом измененных физико-механических характеристик грунта контактного слоя и параметров свайных интерфейсов позволяет существенно сократить разницу с результатами натурных испытаний по сравнению с использованием в модели начальных характеристик грунтов. Расхождение в осадке по сравнению с результатами натурных испытаний при данном подходе в среднем составляет 35%. Следует отметить, что наибольшее расхождение осадки с фактическими значениями в пределах 65-85% возникает на первых 2-3 ступенях нагружения (для сваи Б-1 и Б-2 отклонение от натурных испытаний составляет 85%, для сваи С-7 – 70%, для сваи С-12 – 65%, 85% для сваи ИС-13 и 75% для сваи ИС-14), что, вероятно, связано с тем, что при устройстве буроинъекционных свай по контакту «тело сваи-грунт» возникает «грунтовая рубашка», пропитанная цементным/пескоцементным раствором и жестко связанная с телом сваи, в результате чего на первых этапах нагружения происходит разрушение именно данных жестких связей, а также упругое сжатие материала ствола сваи, что и приводит к меньшим осадкам по сравнению с данными моделирования и аналитического расчета. На последующих ступенях нагружения расхождение данных по осадке свай между численным и натурным экспериментом сокращается и в среднем составляет 30% при разбросе отклонений по всем ступеням нагружения в пределах 20-65%. При этом среднее отклонение для сваи Б-1 составляет 70%, для сваи Б-2 среднее отклонение составляет 50%, 40% для сваи С-7, 35%

для свай С-12, для свай ИС-13 среднее отклонение от натурного испытания составляет 25% и для свай ИС-14 среднее отклонение составляет 15%. Также данные рисунка 4.12 показывают, что наибольшая сходимости расчетных и фактических данных характерна для более коротких свай (ИС-13, ИС-14), наименьшая сходимости отмечена для более длинных свай (Б-1, Б-2). Для всех моделируемых буринъекционных свай кривая «нагрузка-осадка» находится ниже экспериментальной кривой.

Также оценивалась несущая способность свай по результатам численного моделирования. За несущую способность принималась величина нагрузки, которая соответствовала осадке свай величиной 10 мм [99, 103, 140]. Данные о несущей способности буринъекционных свай при осадке 10 мм представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Сопоставление несущей способности свай по численному моделированию с экспериментальными данными.

Маркировка свай	Несущая способность по результатам испытаний, кН	Несущая способность по результатам моделирования, кН		Разница с натурными испытаниями, %	
		По данным ИГИ	С учетом измененных характеристик	По данным ИГИ	С учетом измененных характеристик
Б-1	650	140	300	78	53
Б-2	700	280	400	60	43
С-7	245	150	225	39	8
С-12	245	155	215	37	12
ИС-13	75	35	55	53	29
ИС-14	60	35	55	42	10

В соответствии с данными таблицы 4.4 установлено, что использование подхода, предусматривающего при моделировании буринъекционных свай задание измененных физико-механических характеристик грунта контактной области и измененных параметров свайных интерфейсов, при определении несущей способности позволяет получать более точные результаты. Среднее отклонение несущей способности буринъекционных свай, определенной по результатам численного моделирования с использованием начальных характеристик грунта контактной области составляет 50% при разбросе 37-78%, в случае использования измененных характеристик для контактной области – 25% при максимальном значении 53%.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что моделирование буринъекционных свай с использованием третьего подхода, когда сваи задаются одномерным стержневым элементом, а взаимодействие сваи и грунта свайными интерфейсами (набором виртуальных пружин) при введении в модель измененных свайных интерфейсов и характеристик грунта контактной области сваи позволяет получать результаты по осадке и несущей способности, достаточные для предварительных расчетов проектируемых объектов, что, учитывая простоту данного подхода по моделированию, может успешно применяться на практике.

4.4. Выводы по главе IV

1. На основе выполненных экспериментально-теоретических исследований, используя традиционный принцип о раздельной работе грунта по боковой поверхности и по пяте, усовершенствована методика определения несущей способности буроинъекционных свай, выполняемых с опрессовкой избыточным давлением раствора. Для определения геометрических параметров сваи (среднего периметра сваи и площади опирания пяты сваи в несущей слой грунта) в результате опрессовки избыточным давлением обосновано использование простой аналитической зависимости изменения геометрических параметров от количества нагнетаемого объема рабочего раствора в скважину. Получаемые результаты хорошо согласуются с опытными данными (отклонение в среднем находится в пределах 5-10%).

2. При определении расчетного сопротивления грунта по боковой поверхности сваи получена экспериментально-теоретическая зависимость, учитывающая технологические особенности устройства буроинъекционных свай. Сопротивление грунта по боковой поверхности сваи определяется в зависимости от остаточных обжимающих напряжений, возникающих в результате воздействия избыточным давлением опрессовки, физических характеристик грунта контактного слоя, давления бетонной смеси на стенки скважины и дополнительных обжимающих напряжений, вызванных давлением рядом расположенных зданий и сооружений на фундаментах мелкого заложения.

3. Расчетное сопротивление грунта под пятой буроинъекционных свай с учетом технологических особенностей их устройства предложено определять в зависимости от прочностных и деформационных характеристик. Дополнительно учитывается избыточное количество формирующего раствора, нагнетаемого в скважину при ее опрессовке, а коэффициент влияния назначается в зависимости от глубины погружения нижнего конца сваи и величины давления опрессовки с учетом отдыха сваи и релаксации напряжений. Предложенный подход позволяет получать данные расчетного сопротивления грунта под пятой буроинъекционных свай для глинистых грунтов с показателем текучести $I_L > 0,6$, и тем самым учитывает вклад пяты в общую несущую способность. Разработанная усовершенствованная методика определения несущей способности буроинъекционных свай дает хорошую сходимость с экспериментальными данными: в среднем отклонение составляет до 20%, обеспечивая запас по несущей способности.

4. Используя подход о раздельной работе грунта по боковой поверхности и по пяте сваи, на основе выполненных экспериментально-теоретических исследований разработана усовершенствованная методика определения осадки буроинъекционных свай.

Методика учитывает расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности и по пяте в зависимости от технологических особенностей устройства буроинъекционных свай. Дополнительно при определении осадки используются значения измененных в результате воздействия избыточным давлением опрессовки деформационных характеристик грунта контактного слоя. Усовершенствованная методика позволяет получать кривую «нагрузка-осадка», повторяющую характер экспериментальной кривой, при этом средние величины отклонений от фактических значений составляют до 25% в запас несущей способности буроинъекционных свай.

5. Определены параметры для моделирования работы буроинъекционных свай, выполняемых с созданием избыточного давления опрессовки, используя простой подход, когда сваи задаются одномерным стержневым элементом, а взаимодействие сваи и грунта свайными интерфейсами (набором виртуальных пружинок). Установлено, что наибольшей сходимости численных и экспериментальных данных (отклонение составляет до 35%) удастся получить при выделении в массиве грунта контактной области вокруг стержневого элемента (сваи) размерами в плане в пределах $(2..3)d \times (2..3)d$ (где d – начальный диаметр сваи) и разбиении данной области на гексаэдрические конечные элементы, размер которых составляет $1,5d$. При этом в модели следует использовать измененные свайные интерфейсы и характеристики грунта контактной области, получаемые в результате воздействия на скважину избыточным давлением опрессовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день существует большое разнообразие буроинъекционных технологий устройства свай. Несмотря на это буроинъекционные технологии продолжают активно развиваться по причине высокой эффективности и надежности в определенных условиях для решения определенных задач. Уточнение характера взаимодействия буроинъекционных свай с грунтом основания и поведения при статическом нагружении для расчетного прогноза их несущей способности и осадки является важной задачей, так как напрямую влияет на надежность и экономичность принимаемых решений.

На основании проведенного исследования в соответствии с поставленной целью сформулированы следующие основные научные выводы, основанные на получении новых теоретических и практических знаний:

1. Усовершенствована технология устройства буроинъекционных свай малого диаметра применительно к основаниям, сложенным дисперсными, преимущественно слабыми пылевато-глинистыми грунтами. Усовершенствование достигается:

- сокращением расхода промывочных и рабочих растворов, а также контролем полного заполнения скважины рабочим составом посредством применения окрашенной «сигнальной пробки»;

- обеспечением заданного диаметра сваи по всей длине за счет использования трубчатых анкерных тяг, соединяемых муфтами, оснащенными винтовыми лопастями одного с долотом диаметром;

- контролем и регулированием требуемой величины давления и времени опрессовки скважины посредством установки в устье герметичной быстросъемной «тампонажной обоймы».

Конструктивное решение и технологические особенности разработанного способа позволяют исключить образование дефектов, характерных для БИС, что повышает надежность свайного фундамента.

2. На основе экспериментальных исследований устройства буроинъекционных свай получена аналитическая зависимость для определения дополнительных начальных и остаточных радиальных напряжений в грунтовом массиве с учетом глубины устройства, величины избыточного давления опрессовки и начальных геометрических параметров скважины. Установлено, что с увеличением избыточного давления опрессовки свыше 200 кПа зона изменения напряженного состояния в радиальном направлении распространяется менее интенсивно, что приводит к концентрации напряжений на стенках скважины с возможным последующим образованием гидроразрывов в слабых грунтах.

Полученная зависимость позволяет оценивать дополнительное давление, вызывающее обжатие ствола свай, которое существенно изменяется по длине, и точнее определять несущую способность и осадку буроинъекционных свай. Разработан алгоритм определения механических характеристик грунта, основанный на нахождении коэффициентов, показывающих отношение характеристик контактного слоя грунта до и после устройства буроинъекционных свай.

3. На основе экспериментальных исследований установлено, что величина сопротивления грунта по боковой поверхности буроинъекционных свай существенно повышается в результате формирования в массиве грунта остаточных радиальных напряжений, вызывающих дополнительное обжатие, что действующими нормами не учитывается. Для глинистых грунтов при $I_L > 0,4$ получена зависимость для определения сопротивления грунта по боковой поверхности, учитывающая избыточное давление опрессовки $p_{опр} \leq 400$ кПа. Для определения расчетного сопротивления грунта под пятой буроинъекционных свай предложено использование зависимости, учитывающей не только прочностные, но и деформационные характеристики грунта, а также избыточное количество формовочного раствора, нагнетаемого в скважину при опрессовке. Предложенный подход дополнительно позволяет получать данные расчетного сопротивления грунта под пятой буроинъекционных свай для глинистых грунтов при $I_L > 0,6$ и учитывать вклад пяты в общую несущую способность. При устройстве буроинъекционных свай без опрессовки избыточным давлением, определенные по полученным зависимостям значения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой соответствуют рекомендуемым нормами данным.

4. На основе выполненных экспериментально-теоретических исследований разработана усовершенствованная методика определения несущей способности буроинъекционных свай, выполняемых с опрессовкой избыточным давлением. Для определения геометрических параметров свай обосновано использование аналитической зависимости *Abd Elaziz and El Naggat* по изменению диаметра свай от количества нагнетаемого рабочего раствора в скважину. Для определения сопротивления грунта по боковой поверхности предложена экспериментально-теоретическая зависимость, учитывающая возникающие от воздействия избыточным давлением опрессовки и давления бетонной смеси остаточные радиальные напряжения и дополнительные обжимающие напряжения, вызванные давлением зданий и сооружений на основания под фундаментами мелкого заложения. Сопротивление грунта под пятой буроинъекционных свай предложено определять в зависимости от прочностных и деформационных характеристик, с учетом

избыточного количества нагнетаемого в скважину раствора, и коэффициента влияния, назначаемого в зависимости от глубины погружения нижнего конца сваи и величины давления опрессовки. Использование данной методики дает хорошую сходимость с экспериментальными данными: в среднем отклонение в рабочем диапазоне нагрузок составляет до 20%, обеспечивая запас по несущей способности.

5. Используя подход о раздельной работе грунта по боковой поверхности и по пяте сваи, на основе экспериментально-теоретических исследований разработана усовершенствованная методика определения осадки буроинъекционных свай, выполняемых с опрессовкой избыточным давлением. Предложенная методика позволяет учитывать выявленные зависимости изменения сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой буроинъекционных свай в зависимости от технологических особенностей их устройства. Дополнительно учитываются значения деформационных характеристик грунта канатного слоя, измененных в результате воздействия избыточным давлением опрессовки и определяемых в соответствии с разработанным автором алгоритмом. Методика позволяет получать кривую «нагрузка-осадка», повторяющую характер экспериментальной кривой, при этом средние величины отклонений от фактических значений составляют до 25% в запас несущей способности буроинъекционных свай.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms: API recommended practice, 2A (RP 2A), Washington, DC, 1987.
2. Bayesteh H., Sabermahani M. Full-scale field study on effect of grouting methods on bond strength of hollow-bar micropiles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(12), 04018091.
3. Bruce D. A. Recent Progress in American Pin Pile Technology. Proc. ASCE Conference: Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics, New Orleans, Louisiana, 1992, pp. 765-777.
4. Bruce D. A. High Capacity Micropiles – Basic Principles and Case Histories / D. A. Bruce, M. E. Bruce, R. P. Traylor // *GeoEngineering for Underground Facilities : Proc. of the 3rd National Conference of the Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers. – Geotechnical Special Publication. – 1999. – №. 90. – Urbana-Champaign, IL, June 13–17. – P. 188–199.*
5. Bustamante M., Delmas F., Lacour, J. Behaviour of prestressed anchors in plastic clay. *Revue francaise de géotechnique*, 1978, vol.3, pp. 79-87.
6. Bustamante M., Diox, B. Une methéde pour le calcul des traints et des micropieux injectés, *Bull. De Liaison de LCPC, Paris*, 1985, pp. 75-92.
7. DIN 1054:2005-01. Soil - Verification of the safety of earthworks and foundations - Part 100: Analysis in accordance with the partial safety factor concept, 2005, 83 p.
8. Elaziz A., Naggar M. Geotechnical capacity of hollow-bar micropiles in cohesive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(10), pp. 1123–1138.
9. Empfehlungen des Arbeitskreises «Pfahle» EA-Pfahle, Hamburg: Ernst & Sohn, 2012, 358 p.
10. Estephan R. Contributions aux methodes de calcul des groupes et des reseaux de micropieux, 2003, 292 p.
11. Gómez Jesús E., Rodriguez Carlos J., Robinson Helen D., Mikitka J., Keough L. Bond Strength of Hollow-Core Bar Micropiles. Proc. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri, USA, 2008.
12. Hanna T.H. Foundation in tension. Ground anchors. Trans Tech Publication, McGraw Hill Book Company FRG-USA, 1982. – 573 p.
13. Injektionsanker Ischebeck TITAN, Technical data sheet, Enepetal Germany, 1994.
14. Jones D. A., Spencer I. M.. Clay anchors – A Caribbean case history. *Ground Engineering*, 1984, vol. 17(1), pp. 36-42.

15. Koreck H. W. Small diameter bored injection piles / H. W. Koreck // *Ground Engineering*. – 1978. – №. 11(4). –P. 14–29.
16. Lahuta H., Aldorf J., Hrubesova E., Rubisarova H., Janicek A. Influence of buckling at the rod micropiles. *Procedia Engineering*, 2016, pp. 328–333.
17. Lei W., Gangqiang K., Qingsong L., Zhendong Z. Field tests on axial behavior of grouted steel pipe micropiles in marine soft clay. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(6), 06020006.
18. Lizzi F. The Pali Radice (Root Piles). *Proc. Symposium on Soil and Rock Improvement Techniques including Geotextiles Reinforced Earth and Modern Piling Methods*, Bangkok, 1982, pp. 1-21.
19. Lizzi F. The Reticolo di Pali Radice (Reticulated Root pile) for the Improvement of Soil Resistance, Physical Aspects and Design Approaches. *Proc. VIII ECSMFE*, Helsinki, 1983, pp. 521-524.
20. Mišove P. Konštrukcia predpätých horninových kotiev a ich únosnosť, Kandidátska dizertačná práca. VÚIS, 1984, p. 184.
21. Monika De Vos, Valerie Whenham. Innovative design methods in geotechnical engineering / Monika De Vos, Valerie Whenham // *GeoTechNet – European Geotechnical Thematic Network*. – 2010. – Part 2. – 13 p.
22. Nikitenko M.I., Sobolevskii D.Y. Effect of grout injection in holes on the properties of surrounding sandy soil // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1986. № 23(3). Pp. 97-102.
23. Ostermayer H. Construction, carrying behaviour and creep characteristics of ground anchors. *Proc. Conference on Diaphragm Walls and Anchorages*, London, 1975, pp. 141-151.
24. Ostermayer H.I., Scheele F. Research on ground anchors in non-cohesive soils. *Proc. 9th International Conference*, Tokyo, 1977, pp. 92-97.
25. Ostermayer H., Barley A. D. Fixed Anchor Design Guidelines. *Geotechnical Engineering Handbook*, Vol. 2. Pub. Ernst & Sohn, 2003, 17 p.
26. Pachla H. Conditions of proper interaction of Low-pressure Injection Piles (LIP) with structure and soil, carrying capacity of pile anchorage in foundation. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2016, № 38(4), Pp. 33-49
27. Pronozin, Y. A. «Normal» bored injection pile with increased bearing capacity / Y. A. Pronozin, I. S. Salnyi, D. V. Volosyuk // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations : Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*, GFAC 2019, Saint petersburg, 06–08

февраля 2019 года. – Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, 2019. – P. 296-300. – DOI 10.1201/9780429058882-58.

28. Salnyi, I. S. Interaction of drill-injection piles with the surrounding soil / I. S. Salnyi, Ya. A. Pronozin, A. M. Karaulov // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No 4(104). – P. 10407. – DOI 10.34910/MCE.104.7.

29. Salnyi I., Pronozin Ya., Naumkina Ju., Karaulov A. Experience in application of drilled injection piles for building and structure strengthening. Proc. Deep Foundations and geotechnical problems of territories (DFGC 2021), Journal of Physics: Conference Series, Perm, 2021, 1928 (2021).

30. Smolczyk U. Geotechnical Engineering Handbook / U. Smolczyk // Vol-ume 3: Elements and Structures, Germany, February 2003. – P. 646.

31. Soliman N., Munkofh G. Foundation on drilled and grouted minipiles. A case history. Proc. I International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger piles, Ghent, 1988, pp. 363-369.

32. Telford W., Kokan M., Aschenbroich H. Pile load tests of titan injection bored micropiles at an industrial plant in North Vancouver. Proc. 9th International Workshop on Micropiles, London, 2009, pp. 138-145.

33. Ulitskii V.M., Shashkin K.G. Deformed scheme for design of piles injected into predrilled holes. Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 1998. – № 4–5 (35). – P. 110–114. DOI: 10.1007/BF02465921.

34. U.S. Highway Administration. Micropile design and construction guideline, FHWA-SA-97-070. 2000, 380 p.

35. Veludo J., Júlio E.N.B.S.; Dias-da-Costa D. Compressive strength of micropile-to-grout connections. Construction and building materials, 2012, 26(1), pp. 172–179.

36. Xanthakos P. Ground anchors and anchored structures. John Wiley and Sons, Ltd, 1991, 704 p.

37. Zhu X.R., Fang P.F., Huang H.M. Research on super-long pile in soft clay. Yantu Gongcheng Xuebao. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. – 2003. – № 1 (25). – P. 76

38. Акулецкий А.С. Напряженно-деформированное состояние армированных грунтовых оснований и насыпей: 2.1.2 / Акулецкий Александр Сергеевич. – Москва, 2022. – 122 с.

39. Алла Саид Мухамед Абдул Малек. Напряженно - деформированное состояние преобразованного основания фундаментов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Алла Саид Мухамед Абдул Малек – Москва, 2009. – 145 с.

40. Анвельт Л.Ю., Метс М.А. Проблемы применения длинных свай. В сборнике Совершенствование проектирования и устройства свайных фундаментов. Изд-во Саратовского университета, 1977. – с. 32 – 38.
41. Анпилов С.М. Технология возведения зданий и сооружений из монолитного железобетона // М.: АСВ, 2010. – 576 с.
42. Архипов Н.Ф. Приборы и методика измерения напряжений и порового давления в слабых водонасыщенных глинистых грунтах/ Н.Ф. Архипов// Инженерные изыскания в строительстве. Методы инженерно-геологических и гидрогеологических исследований. – Киев, 1972. – С.14-19.
43. Бахолдин Б.В., Ястребов П.И., Парфенов Е.А. Особенности расчета осадок фундаментов из буронабивных свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – No 6. – С. 12-16.
44. Богомоллов В.А. Метод высоконапорной инъекции связных грунтов при устройстве и усилении оснований и фундаментов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Богомоллов Владимир Александрович – Екатеринбург, 2002. – 119 с.
45. Возможности. Midas GTS [Электронный ресурс], 2013. – Режим доступа : <http://midasit.ru/products/products.asp?strCate=midasGTS>, свободный.
46. Голли А.В. Методика измерения напряжений и деформаций в грунтах: учебное пособие/ А.В. Голли. – Л.: ЛИСИ, 1984. – 53с.
47. Госькова Г.С. Мессдозы для измерения статических давлений в грунтах/ Г.С. Госькова// Основания и фундаменты зданий в условиях стр-ва Томска. – Томск, 1977. – С.105-111.
48. Готман А.Л. Взаимодействие сооружений с грунтом и свайные основания / П.И. Яковлев, А.Л. Готман, Р.Г. Курмаев – Одесса: Астропринт, 2004. – 512 с.
49. Готман А.Л. Сваи и свайные фундаменты. Избранные труды / А.Л. Готман. – Уфа: монография, 2015. – 384 с.
50. Готман А.Л., Гавриков М.Д. Исследование особенностей работы вертикально нагруженных длинномерных буро-набивных свай и их расчет // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, No 3. – С. 72–83. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.08
51. Давлатов Д. Н. Усиление ленточных свайных фундаментов переустройством в комбинированный с опрессовкой и цементацией основания: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Давлатов Далер Назуллоевич. – Тюмень, 2020. – 127 с.
52. Дарков А.В. Соппротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. — М.: Высшая школа, 1975. —654 с.

53. Дегиль Г.О. Деформационный расчет грунтовых анкеров с учетом формирования их корней в нескальных грунтах: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Дегиль Григорий Орентьевич. – Минск, 1987. – 251 с.
54. Джантимиров Х.А. Разработка конструкций и методов расчета буроинъекционных свай: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Джантимиров Христофор Авдеевич. – Москва, 1985. – 166 с.
55. Дзагов, А. М. Разработка способа расчёта сопротивления оснований буронабивных свай с учётом процесса твердения бетона: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Дзагов Алим Мухтарович. — Л. , 1986. — 22 с.
56. Дьяконов И.П. Несущая способность набивных свай вытеснения с теряемым наконечником в слабых грунтах с учетом технологии изготовления: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Дьяконов Иван Павлович. – Санкт-Петербург, 2019. – 125 с.
57. Дьяконов, И. П. Особенности работы набивной завинчиваемой сваи "Фундекс" в разнородных грунтах / И. П. Дьяконов, В. В. Конюшков // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 6(47). – С. 116-120
58. Ермолаев В.А. Расчет напряженно-деформированного состояния основания при инъектировании методом гидроразрыва с использованием про-граммы PLAXIS/ Вознесенская Е.С., Ермолаев В.А., Осокин А.И., Тата-ринов С.В// Вестник гражданских инженеров 2009.-№2(19). – С.77-82.
59. Есипов А.В. Взаимодействие микросвай с грунтовым основанием при усилении фундаментов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Есипов Андрей Владимирович. – Тюмень, 2002. – 168 с.
60. Завриев К.С., Шпиро Г.С. Расчеты фундаментов мостовых опор глубокого заложения. – М.: Транспорт, 1970. 215 с.
61. Кайгородов М.Д. Регулирование геометрического положения плитных фундаментов методом изменения свойств грунтового основания: 2.1.2 / Кайгородов Михаил Дмитриевич. – Тюмень, 2021. – 115 с.
62. Клейнер И. М. Метод прессиометрии для прогнозирования несущей способности буроинъекционных свай: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Клейнер Игорь Михайлович. – Минск, 1986. – 155 с.
63. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий / П.А. Коновалов. – 4-е изд., перераб. И доп. – М.: ВНИИНТПИ, 2000. - 318 с.
64. Конюшков, В. В. Оценка несущей способности буроинъекционных свай / В. В. Конюшков, В. М. Улицкий // Вестник гражданских инженеров. – 2007. – № 2(11). – С. 52-57.

65. Конюшков В.В. Несущая способность буроинъекционных свай на вертикальную и горизонтальную нагрузки с учетом технологии их изготовления: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Конюшков Владимир Викторович – Санкт-Петербург, 2007. – 217 с.
66. Лапшин, Ф. К. Расчет свай по предельным состояниям / Ф. К. Лапшин. — Саратов, Изд. Саратовского ун-та, 1979. — 151 с.
67. Ле Ван Чонг. Несущая способность свай, изготавливаемых в грунте, по результатам статических полевых испытаний: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Ле Ван Чонг – Санкт-Петербург, 2021. – 144 с.
68. Лушников В.В., Богомолов В.А. Устройство буроинъекционных свай с гидроразрывом и опрессовкой грунтов. Технология устройства свайных фундаментов, теория процессов, оборудование: Сборник трудов VI Международной конференции по проблемам свайного фундаментостроения, Пермь, 1998, с. 75-80.
69. Ляшенко П. А., Денисенко В. В., Мариничев М. Б. Сопротивление основания буронабивной висячей сваи внешней нагрузке // Строительство и реконструкция, № 5(91), 2020. С. 22-31.
70. Малинин А.Г., Малинин Д.А. Технология устройства анкерных свай «АТЛАНТ» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2010. № 1. – С. 17–20.
71. Малинин А.Г., Малинин Д.А. Применение свай «Атлант» в подземном строительстве // Известия ТулГУ. Науки и Земле : сб. науч. тр. . Тула : ТулГУ, 2010. – С. 248–255.
72. Малинин А.Г. Извлекаемые винтовые анкеры «АТЛАНТ» / А.Г. Малинин А.Н. Смирнов, Д.А Малинин // Жилищное строительство. 2015. № 9. – С. 36–40.
73. Малинин Д.А. Несущая способность винтовых анкеров «Атлант» // Жилищное строительство. 2012. № 9. – С. 46–49.
74. Малый И. М. Европейский опыт применения свай и анкеров типа «Титан» / И. М. Малый, П. А. Маслов, С. П. Преображенский // Метро и тоннели. – 2007. – № 1. – С. 36-39.
75. Мамонов, В. М. Несущая способность буронабивных свай, изготовленных из бетона различного состава / В. М. Мамонов, А. М. Дзагов, П. М. Ерошкин // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1989.— №1. — С. 11–14.
76. Мангушев Р.А. Современные свайные технологии / Р.А. Мангушев, А.В. Ершов, А.И. Осокин / М.: Издательство АСВ. – 2007. – 160 с.

77. Мангушев Р.А. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах: учебное пособие / Р.А. Мангушев, Н.С. Никифорова, В.В. Конюшков, А.И. Осокин, Д.А. Сапин / М.: Издательство АСВ. – 2012. – 266 с.
78. Мангушев Р. А., Карлов В. Д., Сахаров И. И., Осокин А. И. Основания и фундаменты. – М.: Изд-во АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 2013. – 392 с.
79. Мангушев Р. А., Готман А. Л., Знаменский В. В., Пономарев А. Б. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии / М.: Изд-во АСВ, 2015. 320 с.
80. Мангушев Р.А. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства. Монография / Р.А. Мангушев, Н.С. Никифорова // М.: Издательство АСВ. – 2017. – 160 с.
81. Мариничев М. Б. Теоретическое, экспериментальное и практическое обоснование применения стержневых анкеров в качестве элементов свайного фундамента при строительстве ответственных сооружений в сложных грунтовых условиях / М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев, Е. П. Ермаков // Оценка свойств грунтов и работы фундаментов в геотехническом строительстве : сборник научных трудов, посвященный 70-летию П. А. Ляшенко. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2018. – С. 105-119.
82. Мариничев М.Б. Исследование работы буровых висячих свай в составе фундаментов многоэтажных и высотных зданий: монография / М. Б. Мариничев – Краснодар : КубГАУ, 2022. – 155 с.
83. Маршалка А.Ю. Совершенствование метода проектирования свайно-плитных фундаментов из буроинъекционных свай : на примере песчаных и глинистых грунтов Краснодарского края: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Маршалка Андрей Юрьевич – Волгоград, 2013. – 149 с.
84. Мельников Р.В., Пронозин Я.А. Вертикальность скважин // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 94–104
85. Мельников Р.В. Использование метода конечных элементов в геотехнике: учебное пособие / Р.В. Мельников. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 188 с.
86. Мишаков В.А. Расчет несущей способности инъекционных анкеров/ В.А. Мишаков, В.Ф. Раюк// Опыт и перспективы применения способа «стена в грунте» и анкеров в грунте при строительстве подземных сооружений: материалы Всесоюзного семинара – Челябинск, 1981. С. 41 – 44.

87. Моххамад Х.М. Буроинъекционное упрочнение оснований зданий и сооружений при реконструкциях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Моххамад Хелло Муса – Минск, 1998. – 196 с.

88. Мурзенко Ю.П. Разработка конструкции и исследование характеристик месдозы для измерения полного тензора напряжений в массиве грунта основании/ Ю.П. Мурзенко, В.В. Лифанов, В.В. Ревенко// Основания и фундаменты: сборник трудов. - Новочеркасск, 1976. – С.38-44.

89. Никитенко М.И. Буроинъекционные анкеры и сваи при строительстве и реконструкции зданий и сооружений. Монография. – Минск: БНТУ, 2007. – 580 с.

90. Никифорова Н.С., Коннов А.В. Исследование эффективности применения буроинъекционных свай для защиты зданий в зоне влияния глубоких котлованов // III Российская учебно-практическая молодежная конференция по геотехнике. Сборник трудов. - М.: РОМГГиФ, 2017. - С.110-117.

91. Оценка несущей способности буровой сваи для строительства высотного здания с развитым подземным пространством / А. И. Осокин, В. В. Конюшков, И. П. Дьяконов, В. Ч. Ле // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 4(75). – С. 58-67. – DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-4-58-67.

92. П4-2000 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование забивных свай. Минстройархитектуры. — Минск.: Стройтехнорм, 2001.—72 с.

93. П18-2004 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование и устройство буроинъекционных анкеров и свай. Минстройархитектуры. — Минск.: Стройтехнорм, 2004.—85 с.

94. П19-2004 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование и устройство фундаментов из свай набивных с уплотненным основанием. Минстройархитектуры. — Минск.: Стройтехнорм, 2004.—56 с.

95. Пат. №2103443 Российская Федерация. Способ устройства буронабивных свай / Лушников В.В., Богомоллов В.А.: патентообладатель ОАО «УралНИИАСцентр». - № 95118893; опубл. 27.01.1998, Бюл. №26.

96. Пат. № 2238366С1 Российская Федерация. Способ устройства инъекционной сваи / Полищук А.И., Герасимов О.В., Петухов А.А., Андриенко Ю.Б., Нуйкин С.С.; патентообладатель Полищук А.И., Герасимов О.В., Петухов А.А., Андриенко Ю.Б., Нуйкин С.С. - № 2003106150/03; опубл. 20.10.2004

97. Пат.№ 2522358 Российская Федерация. Способ изготовления буроинъекционной сваи с контролируемым уширением / Пронозин Я.А., Зазуля Ю.В.,

Самохвалов М.А.: патентообладатель ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет». - № 2012155563/03; опубл. 27.06.14.

98. Пат. №156035 Российская Федерация. Буроинъекционная свая с контролируемым уширением / Пронозин Я.А., Степанов М.А., Волосюк Д.В.: патентообладатель ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет». - № 2014135073/03; опубл. 27.10.2015, Бюл. №30.

99. Петухов А.А. Совершенствование способа устройства инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для условий реконструкции зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Петухов Аркадий Александрович – Томск, 2006. – 192 с.

100. Полищук А.И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий / А.И. Полищук. – Томск: STT, 2004. – 476 с.

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

102. Полищук А.И. Основания и фундаменты, подземные сооружения / А.И. Полищук. – Москва: АВС, 2020. – 498 с.

103. Полищук А.И. Усиление фундаментов инъекционными сваями в условиях реконструкции зданий: монография / А.И. Полищук, А.А. Петухов, И.В. Семенов. – Краснодар: КубГАУ, 2022. – 240 с.

104. Проектирование подземной части Манежа в процессе его воссоздания / А. Н. Левченко, В. А. Ильичев, В. П. Петрухин [и др.] // Метро и тоннели. – 2005. – № 2. – С. 8-11.

105. Прыгунов М.А. Устойчивость буроинъекционных свай : диссертация ... кандидата технических наук: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Прыгунов Максим Александрович. – Казань, 2004. – 136 с.

106. Рекомендации по проектированию и устройству фундаментов из буроинъекционных свай. М.: НИИ оснований и подземных сооружений имени Н.М. Герсеванова Госстроя СССР, 1982, 49 с.

107. Россихин Ю.В., Мелдер И.К., Цикман Э.С. К оценке условий развития продольного изгиба длинных тонких свай стоек в оседающих слабых грунтах. В сборнике Проектирование и эксплуатация зданий, Изд-во Рижского политехнического института, 1970, с. 17 – 22.

108. Сальный, И. С. Влияние технологии изготовления и типа армирования буроинъекционных свай на их несущую способность / И. С. Сальный, Я. А. Пронозин, Д. В. Волосюк // Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и

сооружений : Материалы 18-ой Международной научно-практической конференции, Новочеркасск, 22 октября 2019 года. – Новочеркасск: ООО "Лик", 2019. – С. 183-186.

109. Сальный И.С. Растворы для формирования буроинъекционных свай/ Я.А. Пронозин, Ю.В. Наумкина, Л.А. Барталомей, М.В. Кудоманов// Журнал «CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS» Т. 11, № 4, 2020 DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.06.

110. Самохвалов М.А. Взаимодействие буроинъекционных свай, имеющих контролируемое уширение, с пылевато-глинистым грунтовым основанием: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Самохвалов Михаил Александрович. – Тюмень, 2016. – 210 с.

111. Самохвалов М. А. Обзор существующих конструкций буроинъекционных анкерных свай / М. А. Самохвалов, А. В. Гейдт, А. А. Паронко // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14. – № 12. – С. 1530-1554.

112. Сбитнев А.В. Несущая способность свай, выполненных по технологии вытеснения в слабых грунтах: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Сбитнев Андрей Владимирович. – Санкт-Петербург, 2009. – 144 с.

113. Силин К.С. Проектирование фундаментов глубокого заложения / К.С. Силин, Н.М. Глотов, К.С. Завриев. – М.: Транспорт, 1981. – 252 с.

114. Симвулиди И.А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании: учеб. пособие для строительных вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1978. – 480 с.

115. Смолин Б.С. Буроинъекционные сваи для усиления реконструируемых зданий и сооружений: обзорная информация / ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР. Москва, 1985. – с. 33-38.

116. СНБ 5.01.01-99. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Минстройархитектуры. — Минск.: Стройтехнорм, 1999.—36 с.

117. Соболевский Д.Ю. Уширение скважин при устройстве корней буроинъекционных анкеров в песке // Основания и фундаменты в условиях слабых и пучинистых грунтов: межвуз. Темат. Сб. трудов – Л.: ЛИСИ, 1984. – с. 42-48.

118. Соболевский Д.Ю. Гидродинамические явления в технологии инъекционных анкеров и свай // Проектирование и строительство заглубленных в грунт сооружений и конструкций. НИИСП: сб. науч. Тр. – Киев, 1987. – с. 75-85.

119. Соколов, Н. С. Случай усиления основания фундаментов в стесненных условиях / Н. С. Соколов // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции : Материалы IV Международной (X Всероссийской) конференции, Чебоксары, 21–22 ноября 2018 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – С. 447-463.

120. Степанов М.А. Взаимодействие комбинированных ленточных свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием: 05.23.02 / Степанов Максим Андреевич. – Тюмень, 2015. – 189 с.

121. СТО-ГК «Трансстрой»-023-2007 Применение грунтовых анкеров и свай с тягой из трубчатых винтовых штанг «Титан», 2007. – 42 с.

122. Тарасов А.А. Развитие методов расчёта инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для фундаментов реконструируемых зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Тарасов Александр Александрович. – Санкт-Петербург, 2015. – 139 с.

123. Тер-Мартirosян, З.Г. Напряженно-деформированное состояние в грунтовом массиве при его взаимодействии со свайей и фундаментом глубокого заложения // Вестник МГСУ, 2006. – № 01. – С. 38 – 49.

124. Тер-Мартirosян З. Г. Исследование напряженно-деформированного состояния маловлажного песчаного грунта вокруг свай-РИТ / З. Г. Тер-Мартirosян, В. Я. Еремин, А. А. Буданов // Вестник МГСУ. – 2008. – № 2. – С. 24-36.

125. Тер-Мартirosян, З. Г. Взаимодействие анкеров с окружающим грунтом с учетом ползучести и структурной прочности / З. Г. Тер-Мартirosян, В. С. Аванесов // Вестник МГСУ. – 2014. – № 10. – С. 75-86.

126. Тер-Мартirosян, З. Г. Взаимодействие анкеров с упругопластическим массивом грунта / З. Г. Тер-Мартirosян, В. С. Аванесов // Вестник МГСУ. – 2015. – № 7. – С. 47-56.

127. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов// М.: АСВ, 2016. – 533 с.

128. Тер-Мартirosян, З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ермошина Л.Ю. Осадка и длительная несущая способность свай // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 18–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.18-23.

129. Тер-Мартirosян, З. Г. Напряженно-деформированное состояние слабых и насыпных грунтов, армированных железобетонными и грунтовыми сваями соответственно / З. Г. Тер-Мартirosян, А. З. Тер-Мартirosян, А. С. Акулецкий // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 9. – С. 1182-1190. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.9.1182-1190.

130. Тер-Мартirosян, З. Г. Взаимодействие свай большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами / З. Г. Тер-Мартirosян, А. С. Акулецкий // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 168-175. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.2.168-175.

131. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ермошина Л.Ю. Осадка и длительная несущая способность свай с учетом реологических свойств грунтов //

Construction and Geotechnics. - 2022. - Т. 13. - №1. - С. 5-15. doi: 10.15593/2224-9826/2022.1.01.

132. Тимошенко, С.Н. Теория упругости / С.Н. Тимошенко, Д.Ж. Гудьев. – М.: Недра, 1975. – 577 с.

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

134. Улицкий, В.М. Гид по геотехнике. Путеводитель по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям / Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. – СПб: ПИ Геореконструкция, 2012, 288 с.

135. Федоров Б. С. Усиление оснований буроинъекционными сваями / Б. С. Федоров, Х. А. Джантимиров // На стройках России. – 1978. – № 5. – С. 2-5.

136. Хасанов А.З., Хасанов З.А., Набиева Н.А., Хасанов Ж.А. Теоретическое решение задачи распространения напряжений в грунтах при воздействии на скважину осесимметричных радиальных эффективных напряжений // Construction and Geotechnics. - 2019. - Т. 10. - №4. - С. 51-58. doi: 10.15593/2224-9826/2019.4.05.

137. Чернявский Д.А. Разработка конструкции и метода расчета несущей способности буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Чернявский Денис Алексеевич. – Санкт-Петербург, 2020. – 149 с.

138. Чу Туан Тхань. Оценка взаимодействия буроинъекционных свай усиления фундаментов с основаниями зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Чу Туан Тхань. – Санкт-Петербург, 2010. – 148 с.

139. Шадунц, К. Ш. О взаимодействии боковой поверхности свай с окружающим их грунтом основания // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2006. – № 03(019). – С. 27 – 36.

140. Шалгинов Р.В. Совершенствование метода расчёта инъекционных свай в глинистых грунтах для условий реконструкции зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Шалгинов Роман Валерьевич – Томск, 2010. – 236 с.

141. Шулятьев О.А. Основные принципы расчета и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий: дис. ... доктора техн. наук: 05.23.02 / Шулятьев Олег Александрович – Москва, 2019. – 352 с.

142. Экспериментальные исследования несущей способности анкерных свай и расчетные методы ее определения / Д. Ю. Соловьев, А. И. Харичкин, С. В. Курилло [и др.] // Геотехника. – 2019. – Т. 11. – № 1. – С. 44-55. – DOI 10.25296/2221-5514-2019-11-1-44-54.