

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

На правах рукописи

Шмидт Олег Александрович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ОСАДОК КОЛЬЦЕВЫХ СВАЙНЫХ
ФУНДАМЕНТОВ РЕЗЕРВУАРОВ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Краснодар – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ О ПРОЕКТИРОВАНИИ КОЛЬЦЕВЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ РЕЗЕРВУАРОВ...	11
1.1. Анализ конструктивных решений кольцевых свайных фундаментов резервуаров.....	11
1.2. Особенности работы кольцевых свайных фундаментов резервуаров в процессе их строительства и эксплуатации.....	16
1.3. Практика расчёта и конструирования кольцевых свайных фундаментов резервуаров.....	24
1.4. Основные задачи исследований.....	31
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ДЛЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ РЕЗЕРВУАРОВ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ.....	33
2.1. Результаты статических испытаний натуральных буронабивных свай с разгрузкой и последующими повторными нагружениями.	33
2.1.1. Общие сведения.....	33
2.1.2. Характеристика грунтовых условий площадок строительства.....	34
2.1.3. Методика проведения статических испытаний натуральных буронабивных свай с разгрузкой и последующими повторными нагружениями.....	35
2.1.4. Основные результаты, их анализ и обобщение.....	39
2.2. Экспериментальные исследования осадок моделей буронабивных свай в глинистом грунте при разгрузке и последующих повторных нагружениях.....	49
2.2.1. Характеристика грунтовых условий опытной площадки....	49
2.2.2. Методика проведения испытаний моделей свай.....	51
2.2.3. Основные результаты экспериментальных исследований работы моделей свай, их анализ и обобщение.....	59
2.3. Выводы по разделу 2.....	63
3. РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА КОНЕЧНЫХ ОСАДОК КОЛЬЦЕВОГО СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА РЕЗЕРВУАРА.....	64
3.1. Исходные положения к обоснованию расчётной схемы.....	64
3.2. Расчётная схема к определению осадок кольцевого свайного фундаamenta резервуара.....	65
3.3. Разработка инженерного метода расчёта осадок днища и фундаamenta кольца резервуара в глинистом грунте.....	67
3.4. Метод определения модуля деформации грунта для расчета осадок фундаamenta кольца.....	71
3.5. Рекомендации по расчёту конечных осадок кольцевого свайного фундаamenta резервуара.....	74

3.6. Выводы по разделу 3.....	75
4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	76
4.1. Практическое применение инженерного метода расчёта конечных осадок кольцевого свайного фундамента резервуара.....	76
4.2. Численный метод расчёта конечных осадок кольцевого свайного фундамента резервуара на основе использования ПК Midas GTS NX.....	80
4.3. Данные геодезического мониторинга осадок фундамента резервуара емкостью 10000 м ³ в г. Туапсе.....	87
4.4. Сопоставление результатов инженерного и численного методов расчёта с данными геодезического мониторинга осадок фундамента резервуара, их анализ и обобщение.....	92
4.5. Направления дальнейших научных исследований.....	93
4.6. Выводы по разделу 4.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	96
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	98
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	111

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. В последние годы при строительстве резервуаров под нефтепродукты на глинистых грунтах все большее применение находят кольцевые свайные фундаменты из буронабивных свай длиной от 11 до 24 м, диаметром 0,4 – 0,8 м. Работа буронабивных свай в составе кольцевых свайных фундаментов резервуаров связана с периодической их разгрузкой и последующими повторными нагружениями, при этом периодичность разгрузки свай и их последующих повторных нагружений может составлять до 80 раз за год эксплуатации резервуара. В России за последние 30 лет выполнен значительный объем экспериментальных и теоретических исследований работы кольцевых свайных фундаментов резервуаров из буронабивных свай при нагрузках, характерных для условий эксплуатации резервуаров. Установлены наиболее рациональные виды конструктивных решений буронабивных свай и область их применения, подготовлены рекомендации по оценке несущей способности свай в различных грунтовых условиях, разработаны технические решения по армированию свай и защиты их от коррозии и др. Однако до настоящего времени вопросам расчета осадок кольцевых свайных фундаментов с учетом их разгрузки и последующих повторных нагружений уделялось недостаточно внимания, поэтому рассматриваемая тема диссертационной работы является *актуальной*.

Степень разработанности темы. Исследованиями работы буронабивных свай в составе кольцевых свайных фундаментов резервуаров занимались отечественные и зарубежные специалисты, среди которых следует отметить Абелева М.Ю., Бартоломея А.А., Бахолдина Б.В., Винникова Ю.Л., Городнову Е.В., Готмана А.Л., Ещенко О.Ю., Землянского А.А., Карлова В.Д., Коновалова П.А., Конюшкова В.В., Кушнира С.Я., Мангушева Р.А., Мирсаяпова И.Т., Нуждина Л.В., Невзорова А.Л., Парамонова В.Н., Пономарева А.Б., Прозина Я.А., Сотникова С.Н., Тарасенко А.А., Улицкого

В. М., Федоровского В. Г., Шадунца К.Ш., Шашкина А.Г., Шулятьева О.А., Brandl H., Fellenius B.H., Viggiani C., Mandolini A. и др.

Специалистами СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург), НИИОСПа им. Н. М. Герсеванова (г. Москва), КГАСУ (г. Казань) и др. были проведены исследования, обобщен отечественный и зарубежный опыт расчёта, конструирования и устройства свайных фундаментов резервуаров. Основное внимание уделялось особенностям нагружения таких фундаментов (нагрузка-разгрузка и последующие повторные нагружения), которые несвойственны для других сооружений промышленно-гражданского строительства. Следует также отметить исследования специалистов ООО «ПИ Геореконструкция» (г. Санкт-Петербург, 2004), в рамках которых проводились статические испытания забивных железобетонных свай в глинистых грунтах. Программа работ включала нагрузку-разгрузку и последующие повторные нагружения свай. Было установлено, что при повторном нагружении свай их несущая способность увеличивается, при этом наблюдалось дополнительное приращение осадок свай после их разгрузки и повторных нагружений. Полученные результаты в рассматриваемых исследованиях не нашли пока практического применения при развитии методов расчёта осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров.

Цель работы заключалась в развитии метода расчёта осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров из буронабивных свай в глинистых грунтах с учетом их разгрузки и последующих повторных нагружений.

Задачи исследований:

1. Проанализировать существующие конструктивные решения фундаментов кольцевых свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах и методы их расчета на действие вертикальных нагрузок.

2. Разработать программу и принять участие в проведении статических испытаний натуральных буронабивных железобетонных свай в глинистых грунтах с учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений; выполнить анализ и обобщение полученных результатов.

3. Разработать методику и провести экспериментальные исследования работы моделей свай в глинистых грунтах по программе, характерной для условий эксплуатации резервуаров; обосновать расчётные схемы работы буронабивных свай в составе кольцевых свайных фундаментов резервуаров.

4. Разработать инженерный метод и рекомендации по расчёту конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров из буронабивных свай в глинистых грунтах с учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений.

5. Провести сопоставление результатов инженерного и численного методов расчёта осадок кольцевого свайного фундамента резервуара из буронабивных свай в глинистых грунтах с данными геодезического мониторинга. Выполнить опытно-промышленную апробацию результатов исследований.

Объект исследований. Кольцевой свайный фундамент резервуара из буронабивных железобетонных свай в глинистых грунтах.

Предмет исследований. Взаимодействие кольцевого свайного фундамента резервуара из буронабивных железобетонных свай с глинистым грунтом основания на этапе его работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлено влияние разгрузки буронабивных железобетонных свай и их последующих повторных нагружений на сжимаемость глинистых грунтов в основании свайных фундаментов резервуаров. Экспериментально выявлено увеличение модуля общей деформации глинистых грунтов в основании свайных фундаментов резервуаров при повторных нагружениях (три этапа) на 17-18%.

2. Усовершенствована методика проведения натурных статических испытаний буронабивных свай для фундаментов резервуаров, которая учитывает время заполнения резервуаров нефтепродуктами, а также их разгрузку и повторные последующие нагружения.

3. Установлено, что основное приращение осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров происходит на втором и третьем этапах повторных нагружений и составляет в среднем 20-22% от конечной осадки на первом этапе нагружения. На последующих этапах нагружения приращение осадок свайных фундаментов является незначительным и не превышает 3-5% от осадки на первом этапе нагружения.

4. Разработан инженерный метод расчёта конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах, учитывающий их разгрузку и повторные последующие нагружения.

Практическая, теоретическая значимость работы и ее использование. *Практическая ценность работы* заключается в том, что результаты исследований доведены до их практического применения. Разработаны рекомендации по расчёту конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров с учетом их разгрузки и последующих повторных нагружений.

Результаты исследований, полученные при выполнении диссертационной работы, использованы:

- при оценке конечных осадок кольцевого свайного фундамента резервуара емкостью 10 тыс. м³ перегрузочного комплекса НК «Роснефть» в г. Туапсе (2016);

- в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» при выполнении выпускных квалификационных работ студентами-магистрантами, обучающимися по направлению подготовки «Строительство» (программа магистратуры – Архитектурное проектирование, реконструкция и геотехническое строительство), а также чтении лекций для студентов-специалистов, студентов-магистрантов на архитектурно-строительном факультете в 2017-2021 гг.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании расчётных схем и развитии метода расчёта кольцевых свайных фундаментов

резервуаров на глинистых грунтах с учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений.

Методология и методы исследований. При подготовке диссертации применялись в совокупности теоретические и экспериментальные методы исследований. В разделах теоретических исследований выполнялась работа по совершенствованию метода расчёта конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров. В разделе экспериментальных исследований использовались результаты испытаний натуральных буронабивных свай и моделей свай в глинистых грунтах при различных схемах нагружения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика и анализ результатов полевых статических испытаний натуральных буронабивных свай и моделей свай в глинистых грунтах при различных схемах нагружения, характерных для условий эксплуатации резервуаров.

2. Инженерный метод расчёта конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах с учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений.

3. Рекомендации по расчёту осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах; внедрение результатов исследований работы буронабивных свай в составе кольцевых свайных фундаментов при их разгрузке и последующих повторных нагружениях.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения: пункт 4 – Разработка новых методов расчёта, конструирования и устройства фундаментов на естественном основании, глубокого заложения и свайных фундаментов с учётом взаимодействия их с надфундаментными конструкциями, фундаментами близко расположенных зданий и сооружений и конструкциями подземных сооружений.

Достоверность результатов научных исследований и выводов диссертационной работы базируется на использовании основных

теоретических положений механики грунтов, механики твердого и деформируемого тела, математической статистики, численного моделирования и подтверждена необходимым объемом экспериментальных исследований, выполненных на поверенном оборудовании.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждались на научно-практических конференциях различного уровня: Международных конференциях «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» (г. Новочеркасск, ЮРГПУ, 2015, 2018 гг.), VIII Всероссийской молодежной конференции аспирантов, молодых ученых и студентов (г. Пермь, ПНИПУ, 2016 г.), IV Международной учебно-практической молодежной конференции по геотехнике и IV Геотехнических играх «GeoGames» (г. Тюмень, ТИУ, 2018 г.), VI-X Региональных конференциях молодых ученых КубГАУ (г. Краснодар, КубГАУ 2014-2017, 2020 гг.), Национальной научно-технической конференции «Нелинейная механика грунтов и численные методы расчётов в геотехнике и фундаментостроении» (г. Воронеж, ВГТУ, 2019 г.), II Всероссийской конференции «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий» (г. Пермь, ПНИПУ, 2021 г.), Международной научно-технической конференции по геотехнике «Современные теоретические и практические вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и методики расчётов (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2021 г.), научных семинарах кафедры «Основания и фундаменты» Кубанского государственного аграрного университета им. И.Т. Трубилина (КубГАУ, Краснодар, 2015, 2017, 2018, 2021 гг.)

Личный вклад автора состоит:

- в обобщении существующих конструктивных решений кольцевых свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах и методов их расчета на действие вертикальных нагрузок;

- в разработке программы, методики проведения испытаний натуральных буронабивных свай и моделей свай в глинистых грунтах при их разгрузке и последующих повторных нагружениях;

- в разработке инженерного метода расчёта конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 научных печатных статьях; из них четыре статьи опубликованы в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science; четыре статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. По результатам исследований получен один патент РФ на изобретение и два патента РФ на полезные модели (в соавторстве).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 115 наименований и 3-х приложений. Общий объем работы составляет 131 страницу, включая 37 рисунков и 13 таблиц.

Автор выражает благодарность кандидату технических наук, профессору П.А. Ляшенко за постоянную поддержку и консультации по работе. Соискатель признателен всем сотрудникам кафедры «Основания и фундаменты» ФГБОУ ВО за внимание к работе и поддержку выбранного направления исследований.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ О ПРОЕКТИРОВАНИИ КОЛЬЦЕВЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ РЕЗЕРВУАРОВ

1.1. Анализ конструктивных решений кольцевых свайных фундаментов резервуаров

Основная тенденция, наблюдаемая на сегодняшний день в нефтяной отрасли, заключается в расширении направлений транспортировки нефтяной продукции, прокладке новых нефтепроводов. В настоящее время правительство РФ совместно с крупнейшими компаниями по добыче, доставке и переработке нефти рассматривает несколько приоритетных направлений по экспорту энергоносителей в Европу и Китай (проекты «Северный поток-2», «Южный поток», «Каспийский газопровод», нефтепроводы «Россия-Китай» и «Ангарск-Находка» и др. [1]). Кроме того, на сегодняшний день проектируются несколько транспортных ветвей нефтепроводов по направлению Печора – Мурманск, Брянск – Усть-Луга, Вологда – Мурманск [2]. Данные проекты требуют наличия транспортных накопительных узлов, в которых в качестве хранилищ используются вертикальные стальные резервуары и другие сооружения.

Вертикальные стальные резервуары служат для хранения нефти, воды, нефтепродуктов и других жидкостей. Они относятся к типу пространственных сплошных тонкостенных металлических конструкций. Впервые в нашей стране вертикальный стальной резервуар был сконструирован и построен под руководством академика В.Г. Шухова (1881). Принципиальная схема резервуара и его общий вид приведены на рис. 1.1 и 1.2.

Совершенствованием конструктивных решений фундаментов резервуаров занимались В.Б. Галеев (1987) [36], Е.А. Егоров (1977) [37], А.А. Землянский (2006) [38], Р.А. Мангушев и др. (1980-2009 гг.) [3-4], М.К. Сафарян (1961) [39], С.Н. Сотников (1980) [40], А.А. Тарасенко (2009) [4, 41], К.Ш. Шадунц (2003) [9], М.Б. Мариничев и др. (2012) [45] и др.

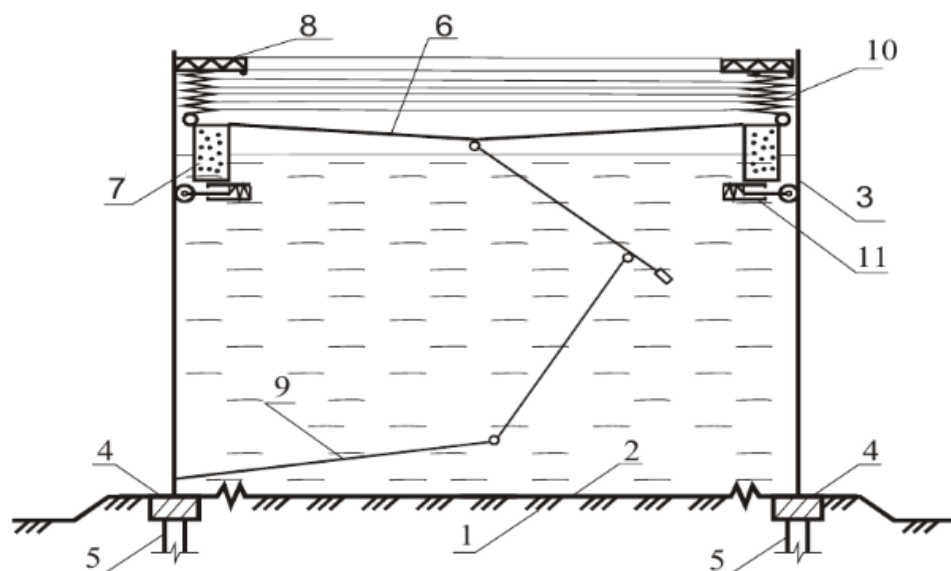


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема резервуара с кольцевым свайным фундаментом (по данным А.А. Землянского, 2003 [42]): 1 – основание; 2 – днище; 3 – стенка; 4 – кольцевой ростверк; 5 – сваи; 6 – мембрана плавающей крыши; 7 – кольцевой понтон плавающей крыши; 8 – верхнее кольцо жесткости резервуара; 9 – система водоотвода; 10 – кольцевая гермооболочка; 11 – телескопические шарнирные упоры



Рисунок 1.2 – Общий вид вертикального стального резервуара ёмкостью 20 тыс. м³

В зависимости от расположения относительно уровня планировочной строительной площадки резервуары делятся на надземные, наземные и подземные. По материалу изготовления выделяют резервуары стальные, железобетонные, из полимерных материалов. По форме резервуары подразделяются на цилиндрические, квадратные, шаровые, линзообразные. По объему вмещающей жидкости резервуары делятся на четыре группы [3]: малые (до 1000 м³), средние (до 5000 м³), большие (до 50000 м³), уникальные (от 50000 м³).

Фундаменты резервуаров в большинстве случаев выполняются плитными, кольцевыми и свайными. Плитные и кольцевые фундаменты классифицируются как мелкозаложенные, выполняются чаще на естественном основании; они получили широкое распространение как наиболее экономичные при благоприятных грунтовых условиях. Эти виды фундаментов (плитные и кольцевые) обычно применяются с использованием песчаной или гравийной подсыпки в уровне их подошвы.

При наличии слабых грунтов в основании резервуаров, а также грунтов неоднородных с прослойками и линзами из слабых грунтов, используются свайные фундаменты. Фундаменты резервуаров с применением свай выполняют свайно-плитными в виде сплошного свайного поля или кольцевыми свайными с одно-, двух-, трехрядным расположением свай [4].

Свайно-плитные фундаменты пока не получили широкого распространения при строительстве резервуаров по следующим соображениям:

- высокой материалоемкости и стоимости вследствие использования большого количества свай;
- значительных осадок по сравнению с кольцевыми свайными фундаментами;
- наличия больших сжимающих усилий в узле сопряжения стенки резервуара и плитной части фундамента.

Свайно-плитные фундаменты резервуаров используются, как правило, в случае необходимости устройства вентилируемого днища при их строительстве для хранения жидкостей с низкими температурами (сжиженный азот, аммиак и др.).

Кольцевые свайные фундаменты используются при строительстве резервуаров на слабых (обычно сильно сжимаемых) грунтах. В целях исследования работы кольцевых свайных фундаментов на слабых грунтах в 70-е годы прошлого века коллективами научно-исследовательских организаций (НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, ЛИСИ, Главтюменьнефтегазстрой Миннефтегазстроя СССР) были построены 4 опытных резервуара ёмкостью 5 тыс. куб. м. [5]. В результате проведения экспериментальных исследований было установлено, что применение свайного кольца позволило уменьшить средние осадки фундамента резервуара в 3-3,5 раза по сравнению с плитным фундаментом в аналогичных грунтовых условиях. Данный эффект был достигнут за счёт ограничения горизонтальных перемещений (выпора) грунта из-под днища резервуаров.

Кольцевые свайные фундаменты выполняются в виде отдельных рядов свай, равно удаленных от центра резервуара по окружности с радиусом R , объединенных железобетонным кольцевым заглубленным ростверком. Высокий ростверк в рассматриваемом случае, как правило, не применяется. Шаг между сваями принимается равным $3d-6d$, где d – диаметр или сторона поперечного сечения свай. Возможно однорядное, двурядное и трехрядное расположение свай. Для распределения напряжений от резервуара на кольцевой ростверк между днищем и свайным кольцом устраивается уплотненная промежуточная подушка из песка или щебня. Толщина подушки устанавливается обычно по конструктивным соображениям с учетом инженерно-геологических условий, а также глубины промерзания грунтов. Узел кольцевого свайного фундамента приведен на рис. 1.3.

Отдельно следует отметить конструктивное решение фундамента резервуара, предложенное специалистами СПбГАСУ, направленное на

уменьшение неравномерности осадок днища и фундамента кольца
(рис.1.4).

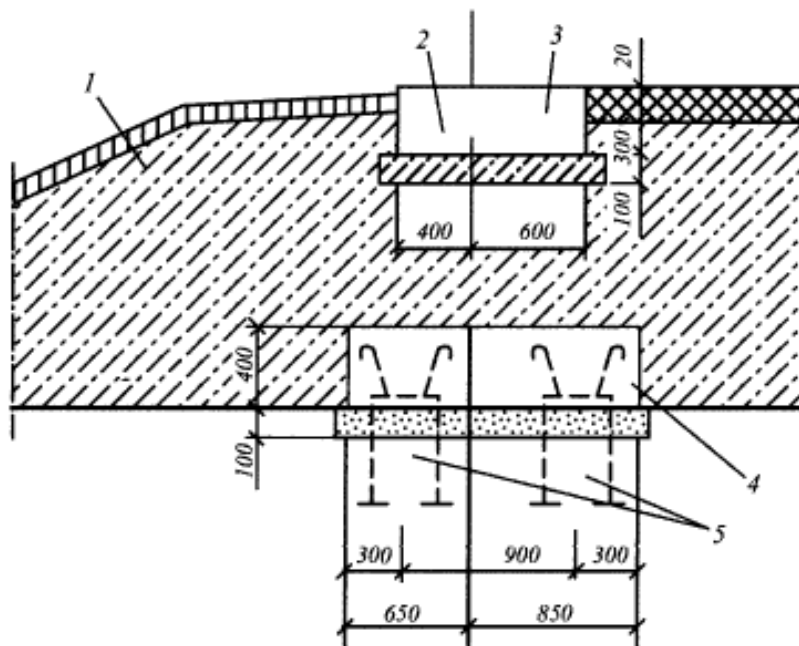


Рисунок 1.3 – Конструктивное решение кольцевого свайного фундамента при его соосном расположении со стенкой резервуара (П.А. Коновалов, Р.А. Мангушев и др., 2009): 1 – щебеночная подушка; 2 – бетонная подготовка; 3- железобетонное кольцо; 4 – кольцевой ростверк; 5 – свая.

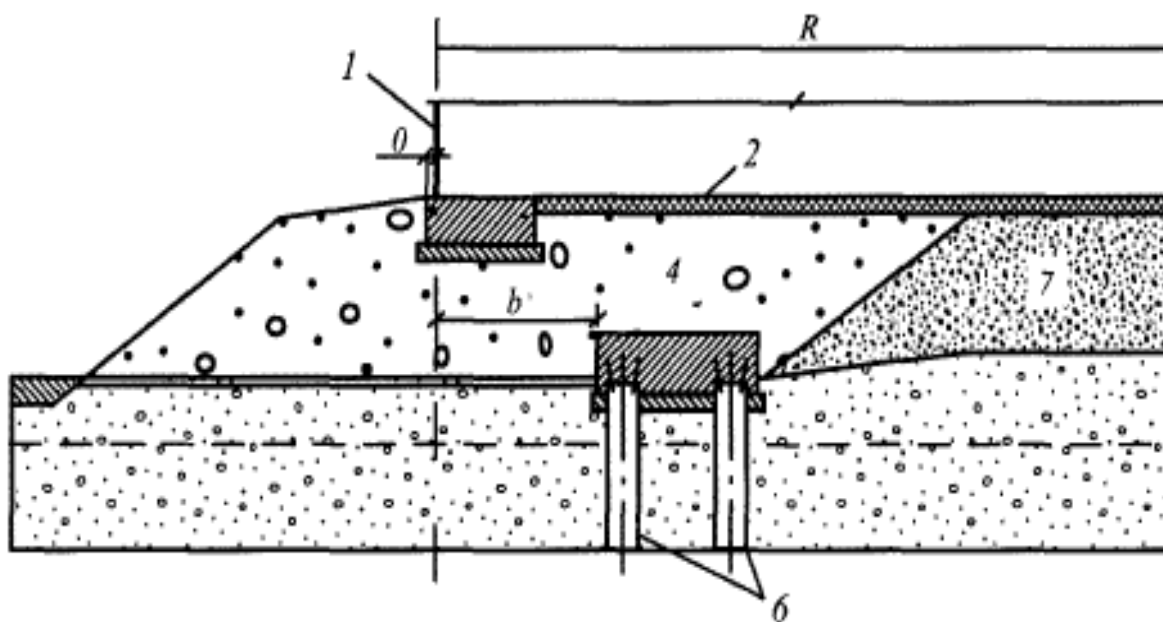


Рисунок 1.4 – Конструктивное решение кольцевого свайного фундамента при внутреннем смещении ростверка к центру резервуара (Р.А. Мангушев, Е.В. Городнова и др., 2005-2009)

Предложенное решение (Р.А. Мангушев, Е.В. Городнова и др., 2005-2009) заключалось в смещении фундамента кольца (ростверка) в сторону центральной оси резервуара. Предлагаемое конструктивное решение кольцевого свайного фундамента позволяет нивелировать неравномерность его осадок.

Сваи в составе кольцевых свайных фундаментов резервуаров используются в большинстве случаев забивные. В последние годы в промышленно-гражданском строительстве основной объем свайных фундаментов выполняется из буронабивных и буровых свай [59, 60]. Они устраиваются с применением обсадных труб, а также по технологии непрерывного полого шнека (НПШ). Так, рассматриваемые технологии использовались при строительстве фундаментов крупных резервуаров на территории Таманского нефтеперегрузочного комплекса в Краснодарском крае (К.Ш. Шадунц и др, 2003).

1.2. Особенности работы кольцевых свайных фундаментов резервуаров в процессе их строительства и эксплуатации

Вопросами работы фундаментов резервуаров в процессе их строительства и эксплуатации занимались А.А. Землянский (2006) [38], В.В. Любушкин (1979) [44], Р.А. Мангушев и др. (1980-2009 гг.) [3-4], М.К. Сафарян (1961) [39], С.Н. Сотников (1980) [40], А.А. Тарасенко (2009) [4, 41], О.Ю. Ещенко (2011) [43] и др. Специалистами СПбГАСУ (1980), НИИОСПа им. Н.М. Герсеванова (1985) и др. были рассмотрены вопросы работы кольцевых свайных фундаментов на разных этапах строительства и эксплуатации резервуаров.

Проведение инженерно-геологических изысканий для строительства фундаментов резервуаров. При проведении инженерно-геологических изысканий на площадках строительства резервуаров проводятся лабораторные исследования, в которых моделируются особенности их эксплуатации. Выполняются испытания на сдвиг образцов грунта по неконсолидированно-

недренированной схеме вследствие большой скорости увеличения нагрузок, действующих на основание [6]. Кроме того, при эксплуатации резервуаров следует также проводить испытания для определения деформационных свойств грунтов с учетом их разгрузки и повторных последующих нагружений. Известно [7, 8], что сжимаемость грунтов при первом этапе нагружения всегда оказывается больше, чем при повторном нагружении. Поэтому при определении коэффициента сжимаемости следует дополнительно выполнить повторное нагружение образца. Также необходимо учитывать, что в большинстве случаев нагружение резервуара производится с постоянной скоростью, что должно быть отражено при лабораторных испытаниях грунтов в основании резервуара. Отмечено, что для объективной оценки сжимаемости оснований резервуаров необходимо проводить испытания свай по методике, моделирующей особенности передачи на грунт статической нагрузки [9]. При этом полное заполнение резервуаров во время эксплуатации жидкостью, согласно рекомендациям нормативных документов [10, 11], происходит за 2-4 часа с постоянной скоростью нагружения.

Особенности испытаний резервуаров в доэксплуатационный период. На сегодняшний день при строительстве резервуаров проводят испытания, в основном ориентированные на контроль качества строительных работ при устройстве надземной части сооружения: контроль качества сварных соединений, проверка работоспособности оборудования, герметичности конструкции и др. Гидравлические испытания резервуаров регламентируются ГОСТом 31385-2016. Программа гидравлических испытаний резервуаров в целом направлена на проверку работоспособности эксплуатируемой емкости и не учитывает особенности деформирования оснований. В течение регламентированного нормативными документами времени выдержки резервуара под нагрузкой, полностью наполненного водой (24 часа), деформации основания могут завершиться не полностью, в результате чего уже после окончательной приемки работ в резервуаре могут накапливаться остаточные деформации (дефекты), способные вывести его из строя.

Для проведения гидравлических испытаний организациями НИИ «Гипротюменнефтегаз», НИИОСП им. Н.М. Герсевича и др. были предложены методики, которые используются в производственных условиях. Например, в 1977 г. НИИ «Гипротюменнефтегаз» предложил проводить гидравлические испытания ступенчато с величиной нагрузки на ступени 20% от проектной [4]. После нагружения резервуара происходила выдержка до полной стабилизации перемещений (осадок) фундаментов. Аналогичную методику разработал НИИОСП им. Н.М. Герсевича (1985), которая в дальнейшем была опробована при строительстве резервуаров для хранения жидких удобрений на пяти предприятиях Министерства сельского хозяйства СССР. Специалистами СПбГАСУ также было предложено использовать гидравлические испытания для уплотнения грунтов основания резервуаров. С этой целью была разработана программа гидравлических испытаний, предложенная в работе [4].

Основными недостатками приведенных методик можно назвать произвольный выбор величины ступени и критерия стабилизации осадки основания фундамента, который не зависит от свойств грунтов основания. В результате увеличение давления на каждой ступени может превысить скорость консолидации грунтов основания, что может привести к формированию дополнительных неравномерных осадок и выходу резервуара из строя. Отмечается, что основной причиной выхода из строя вертикальных стальных резервуаров является именно потеря устойчивости основания в результате неравномерных осадок фундаментов [12, 13].

В работе [4] предлагается величину ступеней нагружения на основание фундаментов резервуара при наличии в нем слабых водонасыщенных грунтов принимать, исходя из возможности возникновения нестабилизированного состояния, по формуле:

$$q \leq 5.7c_1/k_n, \quad (1.1)$$

где c_1 – расчётное значение удельного сцепления грунта основания; k_n – коэффициент надёжности.

При этом время выдержки нагрузки на каждой ступени предлагается определять, исходя из скорости консолидации водонасыщенного грунта, по формуле [14]:

$$t \cdot k = 0.623H^2/c_v, \quad (1.2)$$

где H – толщина слоя слабого водонасыщенного грунта; c_v – коэффициент консолидации грунта основания.

Обобщая опыт эксплуатации кольцевых свайных фундаментов резервуаров, следует отметить, что в процессе их строительства и эксплуатации возникают негативные процессы (повторные нагружения, быстрая передача нагрузки на основание и др), которые необходимо учитывать при проектировании.

Особенности работы кольцевых свайных фундаментов при их разгрузке и последующих повторных нагружениях. Штамповыми испытаниями, а также в результате определения физико-механических свойств грунтов основания фундаментов эксплуатируемых зданий [15] установлено, что при повторном нагружении фундаментов основание уплотняется. Модуль деформации при повторном нагружении в отдельных случаях увеличивается 1,5-2 раза и более. Данные результаты подтверждаются исследованиями [16-24]. В большинстве рассмотренных работ данный эффект уплотнения основания описан с использованием эмпирических формул. В настоящее время пока не предложена методика расчёта основания с учётом увеличения модуля деформации грунтов при повторном нагружении. Несмотря на большое количество исследований, относящихся к изучению совместной работы фундаментов на естественном основании с грунтом при повторных нагружениях, следует отметить малое количество экспериментальных данных о воздействии разгрузок и последующих повторных нагружений на основания свайных фундаментов. В связи с этим наблюдается расхождение мнений о влиянии повторного нагружения грунта основания на конечную осадку свайного фундамента.

Испытания буронабивных свай для фундаментов резервуаров при их повторном нагружении производились в Темрюкском районе Краснодарского края [19]. По всей длине свай располагались глинистые грунты с отдельными включениями линз гипса толщиной до 6 см. Сваи были выполнены буронабивными длиной 16 м и диаметром 800 мм. Всего было испытано 6 натурных свай. Программа статических испытаний включала три этапа нагружения и разгрузки свай. Кроме того, были проведены их испытания на выдергивание для определения распределения усилий между нижним концом сваи и боковой поверхностью. В результате была получена зависимость осадки свай от приложенной внешней нагрузки на первом, втором и третьем этапах нагружения (рис. 1.5). Для оценки уплотнения основания на втором и последующих этапах нагружения свай в данной работе был использован модуль деформации грунта, залегающего в уровне их нижних концов. Модуль деформации грунта в уровне нижних концов свай определялся по формуле Шлейхера [100], которая заложена в ГОСТ 20276.1-2020 [101]. В результате испытаний при первом этапе нагружения сваи модуль деформации грунта в уровне нижнего конца сваи составил 70 МПа, при повторном – 139 МПа.

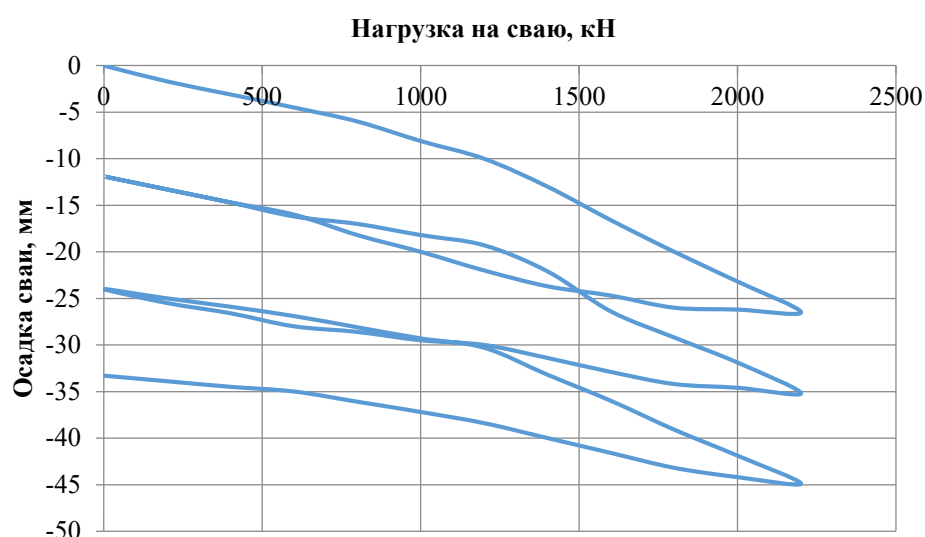


Рисунок 1.5 – Результаты статического испытания свай в Темрюкском районе Краснодарского края (К.Ш. Шадунц и др., 2003)

Отдельно следует отметить опыт использования эффекта уплотнения основания свай при их повторном нагружении в практике реального строительства зданий и сооружений. Профессор Н. Brandl (2005) применил повторное нагружение основания свай при реконструкции фундаментов опор моста длиной 1022 м в г. Вена для уменьшения неравномерности их осадок. Мост был возведен в 70-е годы прошлого столетия, его пропускная способность и высота расположения пролета не удовлетворяли потребностям города. Было принято решение поднять дорожное полотно на 1,8 м и увеличить его ширину на 6 м. Существующие фундаменты, выполненные в виде буронабивных свай диаметром 1,8 м, не имели достаточную несущую способность для передачи проектных нагрузок на основание, возникающих после реконструкции сооружения. Кроме того, необходимо было учесть чувствительность строительных конструкций моста к неравномерным осадкам фундаментов. Усиление существующих фундаментов было выполнено из буронабивных свай диаметром 1,2 м, которые включались в совместную работу с существующим фундаментом с помощью распределительной балки, жестко закрепленной на опоре моста и системы плоских домкратов. Для уменьшения неравномерности осадок было решено при включении в совместную работу свай нагружать их в несколько этапов. Нагрузка от первого этапа доводилась до значений, на 20% превышающих расчетную несущую способность свай. Далее производилась полная разгрузка и последующие повторные нагружения до достижения требуемого параметра неравномерности осадок свай. В качестве параметра для снижения неравномерности осадок был принят градиент деформаций, который был получен эмпирически непосредственно при введении дополнительных свай в работу при реконструкции. В данном случае под градиентом деформаций понималось приращение осадки на единицу вдавливающей силы. При достижении требуемого градиента деформаций программа нагружения свай завершалась. Предложенная методика позволила значительно уменьшить конечные осадки сооружения и нивелировать их неравномерность. Кроме

того, автор считает, что повторное нагружение свай в составе свайно-плитных фундаментов позволит увеличить их несущую способность [17].

Следует также отметить опыт проведения статических испытаний забивных свай при повторном нагружении в грунтовых условиях г. Санкт-Петербурга, которые были проанализированы Ю.В. Швечиковым [19]. В рамках исследования были проведены статические испытания забивных железобетонных свай квадратного сечения со стороной 0,35 м, длиной от 8 до 19 м. Нижний конец испытанных свай опирался на глинистые моренные грунты с показателем текучести от 0,1 до 0,6. Фактический отдых испытанных свай изменялся в широких пределах от 8 до 248 дней. Под отдыхом в данной работе понималось время, проходящее между проведением первичных и повторных статических испытаний. При этом отмечается, что во всех повторных испытаниях значение максимальных нагрузок, приходящихся на сваи, существенно больше достигнутых в ходе испытаний при первичном нагружении (рис. 1.6).

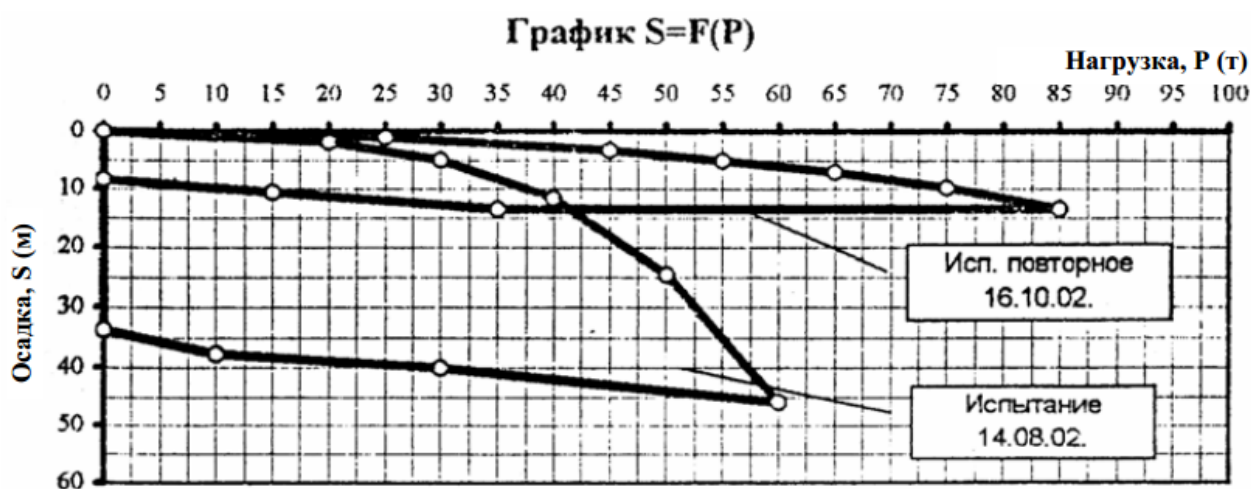


Рисунок 1.6 – Графики зависимости осадки от нагрузки забивной сваи, опирающейся нижним концом на супесь с показателем текучести 0,33 [19].

В результате анализа статических испытаний 11 забивных свай на различных площадках г. Санкт-Петербурга, опирающихся нижним концом преимущественно на глинистые грунты пластичных консистенций [19], было установлено увеличение их несущей способности при повторном нагружении.

Кроме того, по результатам статических испытаний свай была проведена оценка увеличения их сопротивлений, воспринимаемых по отдельности боковой поверхностью и нижним концом. Оценка сил трения по боковой поверхности проводилась по методике, предложенной Г.Ф. Новожиловым и Б.В. Бахолдиным [25]. В результате сделан вывод о том, что увеличение сопротивления вдавливания сваи при повторном нагружении происходило в большей части за счет работы ее нижнего конца.

Кроме того, оценке работы свай реконструируемых зданий были посвящены исследования В.Н. Парамонова, А.Л. Невзорова и др. [26, 27, 57, 58]. В рамках исследований В.Н. Парамонова был проведен анализ результатов статических испытаний забивных свай, отдельная группа которых находилась в ненагруженном состоянии в течении длительного времени (от 70 суток до 18 лет), а другая группа свай находилась в составе фундаментов зданий в течении 1,5-30 лет и выключалась из работы на время проведения статических испытаний. Все рассматриваемые испытания проводились на различных площадках г. Санкт-Петербурга и преимущественно располагались в глинистых грунтах. В результате проведения статических испытаний свай реконструируемых зданий, наблюдалось значительное уменьшение их осадки по сравнению с ранее проведенными статическими испытаниями. В отдельных случаях, для сваи, нагруженной в течение 17 лет, осадка в результате повторных испытаний составила не более 0,5 мм, в то время как при статических испытаниях во время строительства фундамента осадка свай составляла 4-5 см.

Анализируя представленные исследования, можно сделать вывод о том, что при расчете осадок свай для фундаментов резервуаров необходимо учитывать их разгрузки и последующие повторные нагружения, так как в процессе эксплуатации резервуаров возникают приращения осадок, из-за которых возможно возникновение аварийных ситуаций.

1.3. Практика расчета и конструирования кольцевых свайных фундаментов резервуаров

Расчет и конструирование кольцевых свайных фундаментов резервуаров выполняется в несколько этапов:

1. Определение глубины заложения днища и кольцевого свайного фундамента (фундамента кольца) резервуара.
2. Подбор геометрических характеристик и определение несущей способности свай.
3. Определение шага свай, расстановка их в плане.
4. Выполнение поверочных расчётов несущей способности и осадок кольцевого свайного фундамента.
5. Конструирование фундамента, подготовка схем и чертежей по результатам проектирования.

Вопросами расчёта и конструирования фундаментов резервуаров занимались Е.В. Городнова [34], В.Б. Галеев [36], М.И. Горбунов-Посадов [47], Е.А. Егоров [48], А.А. Землянский [38], П.А. Коновалов [49], Р.А. Мангушев [4], А.И. Полищук [53], А.А. Тарасенко [41] и др.

Определение глубины заложения днища и фундамента кольца (ростверка) производится, исходя из нескольких основных факторов: глубины промерзания грунтов, наличия в основании грунтов со специфическими свойствами (просадочных, набухающих, сезоннопромерзающих, слабых водонасыщенных и др.), уровня подземных вод, подтопляемости территории. Ростверк кольцевого свайного фундамента устраивают заглубленным, обычно ниже глубины сезонного промерзания грунта. Для исключения влияния морозного пучения на осадку днища резервуара устраивают гравийно-песчаную подушку, либо других дренирующих материалов (песка, щебня). Днище резервуара устраивается обычно металлическим без собственного железобетонного фундамента. При опасности подтопления строительной площадки днище резервуара устраивают обычно выше планировочной

отметки. Длину свай принимают в зависимости от грунтовых условий строительства. Рекомендуется нижний конец свай устраивать в несущем слое, представленного обычно малосжимаемыми грунтами [51, 52 и др.]

Подбор геометрических характеристик свай и определение их несущей способности. Геометрические характеристики свай подбираются по результатам предварительной оценки ее несущей способности, а также из соображений сопротивления сваи горизонтальной нагрузке [4, 50, 54, 61, 62].

Для выполнения расчётов осадок и несущей способности свайных фундаментов резервуаров на первом этапе следует установить несущую способность свай. В настоящее время применяются следующие методы определения их несущей способности: аналитический (расчетный) с использованием физико-механических свойств грунтов; экспериментальный (по результатам полевых испытаний).

В основе аналитического метода расчёта несущей способности свай (буровых, буронабивных, буроинъекционных и др.), заложенного в нормативные документы, используется модель сваи в виде стержня, устраиваемого в грунтовом массиве [55]. В рассматриваемом случае несущая способность сваи F_d оценивается по боковой поверхности и под нижним концом по формуле:

$$F_d = \gamma_c(\gamma_{cR}RA + \gamma_{c\mu}\Sigma f_i h_i), \quad (1.3)$$

где все обозначения приведены в СП 24.13330.2011 [55]

В качестве основных методик полевых испытаний, используемых для оценки несущей способности свай, можно выделить следующие: статические, динамические испытания свай, статическое зондирование грунтов, испытания грунтов эталонной сваей и др.

Статические, динамические испытания свай, а также испытания грунтов эталонной сваей проводятся по методике ГОСТа 5686-2020 [28]. После устройства сваи для проведения статических испытаний по ГОСТу регламентируется продолжительность ее «отдыха», которая составляет от трех

до двадцати суток и более в зависимости от вида (разновидности) грунтов, залегающих в основании.

В соответствии с государственным стандартом на проведение испытаний грунтов основания сваями [28], приложение внешней нагрузки на оголовок сваи при статических испытаниях производится ступенчато. Величина ступеней нагрузки принимается не более 10% от рассчитанной несущей способности. После каждой ступени нагружения производится выдержка с постоянным усилием до стабилизации деформаций. За критерий стабилизации осадки испытываемой сваи принята величина осадки не более 0,1 мм за последние 60 минут для песков и глинистых грунтов твердой, полутвердой и тугопластичной консистенции, либо за последние 120 минут для глинистых грунтов с показателем текучести более 0,5.

При расчёте несущей способности свай F_d по результатам статических испытаний натуральных и эталонных свай используется формула [29]:

$$F_d = \gamma_c F_{u,n} / \gamma_g, \quad (1.4)$$

где γ_c – коэффициент условий работы сваи; γ_g – коэффициент надежности по грунту; $F_{u,n}$ – нормативное значение предельного сопротивления свай при их конечной осадке, которая определяется по формуле (1.5):

$$S = \zeta s_{u,mt}, \quad (1.5)$$

где обозначения ζ и $s_{u,mt}$ приведены в СП 24.13330.2011.

Использование коэффициента пропорциональности ζ объясняется тем, что в результате статистической обработки большого числа статических испытаний свай установлено соотношение осадки S одиночной сваи и фундаментов проектируемого здания [30]. Анализируя используемые методики определения несущей способности свай F_d по результатам полевых испытаний, следует отметить, что используемое в качестве критерия предельное значение осадки проектируемого здания $s_{u,mt}$ с коэффициентом перехода ζ в формуле (1.5) удобно использовать только при однократном нагружении опытной сваи. Однако данная схема статических испытаний не моделирует работу сваи в составе фундаментов резервуаров, которая в

процессе эксплуатации испытывает множество этапов разгрузки и последующих повторных нагружений. Согласно приложения Д СП 22.13330.2011, используя формулу (1.5), значение предельной осадки S , при которой определяется несущая способность сваи для фундамента резервуара, составляет 40 мм (4 см). При этом известны случаи статических испытаний свай проектируемого резервуара в Темрюкском районе Краснодарского края [20], в процессе которых при первом нагружении конечная осадка испытанной сваи при нагрузке 2200 кН составила 2,6 см. Однако уже при третьем нагружении сваи конечная осадка составила 40 мм (4 см) при нагрузке 1900 кН. Следовательно, использование существующего критерия предельно допустимой осадки сваи при повторном нагружении затруднительно.

По результатам динамических испытаний частное значение несущей способности свай F_u при отказе более 2 мм рассчитывается по формуле [29]:

$$F_u = \frac{\eta AM}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4E_d}{\eta A s_a} \frac{m_1 + \varepsilon^2(m_2 + m_3)}{m_1 + m_2 + m_3}} \right], \quad (1.6)$$

где все обозначения приведены в СП 24.13330.2011 [55].

Испытания грунтов статическим зондированием проводятся по методике ГОСТа 19912-2012 [56]. При этом расчёт частного значения несущей способности F_u натуральных свай по результатам статического зондирования выполняется по формуле:

$$F_u = R_s \cdot A + f \cdot h \cdot u, \quad (1.7)$$

где обозначение следует смотреть в ГОСТ 19912-2012 [56].

Используя статическое зондирование для определения несущей способности сваи, также не представляется возможным спрогнозировать изменение осадки свайного фундамента резервуара в процессе его эксплуатации (так как при зондировании не моделируется повторное нагружение).

Определение шага свай, расстановка их в плане. Шаг свай в кольцевом свайном фундаменте резервуаров в большинстве случаев принимается в диапазоне $3d-6d$ (d – сторона поперечного сечения сваи). С учётом результатов

расчётов в условиях пространственной задачи при необходимости принимается шахматное, двухрядное и трехрядное расположение свай в составе кольцевого свайного фундамента. В плане сваи устраиваются со смещением фундамента кольца (ростверка) ближе к центральной оси резервуара для уменьшения неравномерности осадок фундаментов.

Выполнение поверочного расчёта осадок кольцевого свайного фундамента. В настоящее время существует большое количество методов расчёта осадок свайных фундаментов, базирующихся как на методе конечных элементов, так и на известных решениях задач теорий упругости и пластичности. При расчётах свайных фундаментов необходимо учитывать фактическое распределение нагрузок, действующих на сваи [63, 64]. В СП 24.13330.2011 [29] заложен метод расчёта осадки свайного фундамента как условного фундамента. Расчёт осадки выполняется по формуле:

$$s = s_{ef} + \Delta s_p + \Delta s_c, \quad (1.8)$$

где s_{ef} – осадка условного фундамента; Δs_p – дополнительная осадка за счет продавливания свай на уровне подошвы условного фундамента; Δs_c – дополнительная осадка за счёт сжатия ствола свай.

Модуль деформации основания, используемый при расчётах осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров, принимается чаще на основе результатов лабораторных компрессионных испытаний образцов грунта. В отдельных случаях для расчёта осадки проектируемого сооружения используется результаты полевых испытаний. В настоящее время активно начали развиваться графоаналитические методы расчёта осадок фундаментов по результатам статических испытаний свай [31-33]. Данные методы позволяют не только оценить деформационные характеристики грунтов основания свай (модуль деформации, коэффициент бокового давления, коэффициент Пуассона и др.), но и спрогнозировать их изменение в процессе эксплуатации свайного фундамента. Так, И.З. Гольдфельд предложил для оценки характеристик сжимаемости (модуля деформации) грунтов основания

свай в уровне их нижнего конца использовать приведенный модуль деформации E_{np} , который рассчитывается по формуле [33]:

$$E_{np} = \frac{(1 - \mu^2)N}{0.53dLS}, \quad (1.9)$$

где μ – коэффициент Пуассона; N, S – нагрузка и соответствующая ей осадка штампа в пределах фазы уплотнения графика $S=f(N)$; L – соответственно диаметр и длина сваи.

Для перехода от компрессионного модуля деформации к штамповому используется коэффициент перехода m_{oed} [111].

Известен также метод обработки статических испытаний свай профессора Н. Brandl (2005). Для оценки неравномерности осадок свай при их повторном нагружении он использовал понятие «градиент осадки», являющийся приращением осадки на последнем этапе ее нагружения [17]. Данный метод позволял снизить неравномерность осадок фундаментов в процессе их устройства. Следует отметить, что рассматриваемый метод не может прогнозировать их приращение в процессе эксплуатации.

Заслуживает внимания метод, предложенный Е.В. Городновой и Р.А. Мангушевым [34], на основе которого отдельно определяется осадка днища и свайного кольца. В основании этого метода использованы результаты исследований профессора К.Е. Егорова, и А.А. Бартоломея. Схемы к расчёту осадки свайных кольцевых фундаментов резервуаров приведены на рис. 1.6. Расчёт осадки свайного кольца производился по формуле (автор А.А. Бартоломей):

$$S = \frac{P}{\pi \cdot E_1} \cdot \delta_0 \quad (1.10)$$

Анализируя существующие методы расчёта осадок свайных фундаментов, следует отметить, что в них не предусмотрена возможность оценки приращения осадки свайных фундаментов резервуаров в процессе их разгрузки и последующих повторных нагружений.

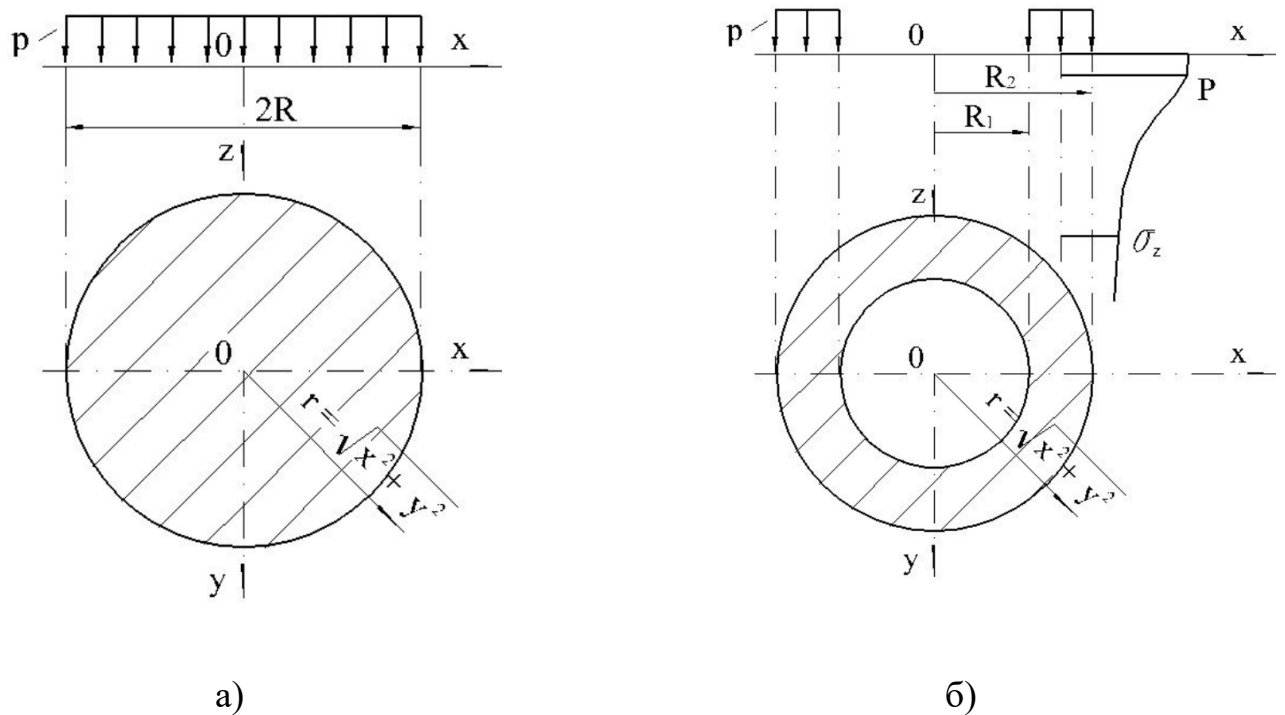


Рисунок 1.6 – Схема к расчёту: а – днище резервуара, б – свайное кольцо (Р.А. Мангушев, Е.В. Городнова, 2005 г.)

Характерная особенность стальных резервуаров состоит в том, что масса жидкости, хранящаяся в них, значительно превышает массу строительных конструкций сооружения. Следовательно, при их разгрузке снижение давления по днищу резервуара происходит более чем на 90%.

При проектировании фундаментов резервуаров учитываются следующие особенности их строительства и эксплуатации:

- большая площадь передачи нагрузки на основание;
- быстрое приложение нагрузки на основание как в период гидроиспытаний, так и в период эксплуатации;
- различие в нагрузках на основание при гидроиспытаниях и при заполнении резервуара продуктом в эксплуатационный период;
- наличие разгрузки фундаментов и последующих повторных нагружений.

Следует также отметить, что ступенчатое приложение нагрузки на оголовки свай не моделирует ее работу в процессе эксплуатации резервуара, а также в процессе гидроиспытаний. Так, в нормативных документах отсутствуют какие-либо рекомендации для проведения статических испытаний свай повторным нагружением, а также с применением методики постоянно возрастающей нагрузки. В результате методика, заложенная в государственном стандарте, предполагает испытания свай в заведомо более благоприятных условиях, чем они оказываются при нагружении резервуаров. При этом методики испытания свай повторным нагружением, а также при постоянно возрастающей нагрузке заложены в зарубежные нормативные документы [35].

Анализируя представленные методы расчёта следует отметить, что в настоящее время вопросам прогнозирования осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров с учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений уделяется пока недостаточно внимания.

1.4. Основные задачи исследований

Для совершенствования метода расчёта осадки кольцевых свайных фундаментов резервуаров были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие конструктивные решения фундаментов кольцевых свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах и методы их расчёта на действие вертикальных нагрузок.

2. Разработать программу и принять участие в проведении статических испытаний натуральных буронабивных железобетонных свай в глинистых грунтах с учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений; выполнить анализ и обобщение полученных результатов.

3. Разработать методику и провести экспериментальные исследования работы моделей свай в глинистых грунтах по программе характерной для условий эксплуатации резервуаров; обосновать расчётные схемы работы буронабивных свай в составе кольцевых свайных фундаментов резервуаров.

4. Разработать инженерный метод и рекомендации по расчёту конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров из буронабивных свай в глинистых грунтах с учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений.

5. Провести сопоставление результатов инженерного и численного методов расчёта осадок кольцевого свайного фундамента резервуара из буронабивных свай в глинистых грунтах с данными геодезического мониторинга. Выполнить опытно-промышленную апробацию результатов исследований.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ДЛЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ РЕЗЕРВУАРОВ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

2.1. Результаты статических испытаний натуральных буронабивных свай с разгрузкой и последующими повторными нагружениями

2.1.1. Общие сведения

Основная часть парков вертикальных стальных резервуаров для хранения нефтепродуктов на территории Краснодарского края расположена в городах Новороссийске и Туапсе, а также Темрюкском и Северском районах (поселки Афипский и Ильский) [65]. Большинство рассматриваемых объектов устроено на строительных площадках, сложенных пылевато-глинистыми грунтами. В результате анализа работы свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах установлено, что при разгрузке и последующих повторных нагружениях происходит значительное приращение осадок. Так, в результате наблюдения за осадками резервуара в Темрюкском районе Краснодарского края установлено, что предельно допустимая по нормативным документам осадка (20 см) была достигнута уже на IV этапе заполнения резервуара нефтью. При этом в ходе гидравлических испытаний на первом этапе нагружения осадка резервуара составляла лишь 7,8 см [9].

Для оценки влияния разгрузки и последующих повторных нагружений на осадку свай использовались результаты испытаний натуральных свай статической вдавливающей нагрузкой на строительных площадках в городах Краснодаре, Сочи, Адлере, Темрюкском районе, выполненные предприятиями ООО «СевКавТИСИЗ», ООО «Гидротехнические сооружения», ООО «Гидротехника», филиалом ОАО ЦНИИС - «НИЦ Морские берега», в которых принимал участие автор. Программы проведения испытаний были разработаны предприятиями ООО «Геотэк» (составитель программы работ М.Б. Мариничев) и др. при участии сотрудников кафедры «Основания и фундаменты»

Кубанского ГАУ [66-70]. Всего были проанализированы результаты испытаний 16 натуральных бурнабивных свай в пылевато-глинистых грунтах.

2.1.2. Характеристика грунтовых условий площадок строительства

Испытания свай статической вдавливающей нагрузкой (статические испытания) с разгрузкой и последующими повторными нагружениями проводились на шести строительных площадках Краснодарского края. Грунтовые условия строительных площадок представлены преимущественно глинистыми грунтами от твердой до мягкопластичной консистенции. По боковой поверхности свай залегали глинистые грунты (глины, супеси, суглинки) с прослойками песков (на отдельных площадках галечников). Заглубление нижних концов свай в пылевато-глинистые грунты на всех рассматриваемых площадках составляло не менее 1 м. Здесь и далее под пылевато-глинистыми грунтами в рассматриваемой работе понимаются пылеватые пески, супеси, суглинки и глины. Подземные воды на всех рассматриваемых площадках были установлены на отметках -4,7...-1,0 м относительно уровня поверхности земли. По степени химического воздействия на строительные конструкции сооружений подземные воды являлись неагрессивными к бетону и среднеагрессивными к арматуре. В качестве примера в табл. 2.1 приведены данные по физико-механическим характеристикам грунтов на площадке по ул. Таврической в г. Сочи. Инженерно-геологические колонки строительной площадки в г. Сочи, ул. Таврическая, используемой для проведения статических испытаний свай и данные по их размещению представлены на рис. 2.1.

Важной особенностью инженерно-геологического строения рассматриваемой площадки (ул. Таврическая) является клиновидное залегание несвязного грунта (пески, галечники) с супесчаным пластичным заполнителем, прочного, насыщенного водой, который относится к классу дисперсных грунтов, группе несвязных, подгруппе осадочных. Толщина слоя несвязного

грунта (пески, галечники), залегающего вдоль боковой поверхности испытываемых свай, изменялась от 3 до 6 м и более.

Таблица 2.1 – Данные по грунтовым условиям строительной площадки в г. Сочи, ул. Таврическая

Название характеристик и показателей грунтов	Характеристики грунтов					
	ИГЭ 2 - суглинок тяжелый тугопластичной консистенции	ИГЭ 3 - глина легкая тугопластичной консистенции	ИГЭ 4 - песок средней крупности, насыщенный водой	ИГЭ 5 - галечниковый грунт с супесчаным пластичным заполнителем, неветветрелый, очень прочный, насыщенный водой	ИГЭ 6 - супесь пластичная, непросадочная	ИГЭ 7 - Глина тяжелая полутвердой консистенции
Влажность в естественном состоянии, %	27,5	33,4	24,2	20,7	18,1	27,7
Плотность грунта, г/см ³	1,93	1,96	1,84	2,3	2,16	2,05
Коэффициент пористости	0,78	0,9	0,91	-	0,45	0,7
Показатель текучести	0,31	0,32	-	0,5	0,5	0,11
Угол внутреннего трения, град	18	17	35	27	21	20
Удельное сцепление, кПа	22	38	1	3	19	60
Компрессионный модуль деформации, МПа	6,7	4,6	32	35	10,1	9,8

2.1.3. Методика проведения статических испытаний натуральных буронабивных свай с разгрузкой и последующими повторными нагружениями

Геометрические параметры буронабивных свай. В настоящей работе использовались результаты испытаний буронабивных свай, устроенных по технологии непрерывного полого шнека (далее НПШ). Длина испытываемых свай составляла от 11 до 24 м, диаметр – от 400 до 800 мм. Все сваи были

выполнены без уширений в уровне их нижнего конца. Сводные данные по испытываемым буронабивным сваям приведены в табл. 2.2.

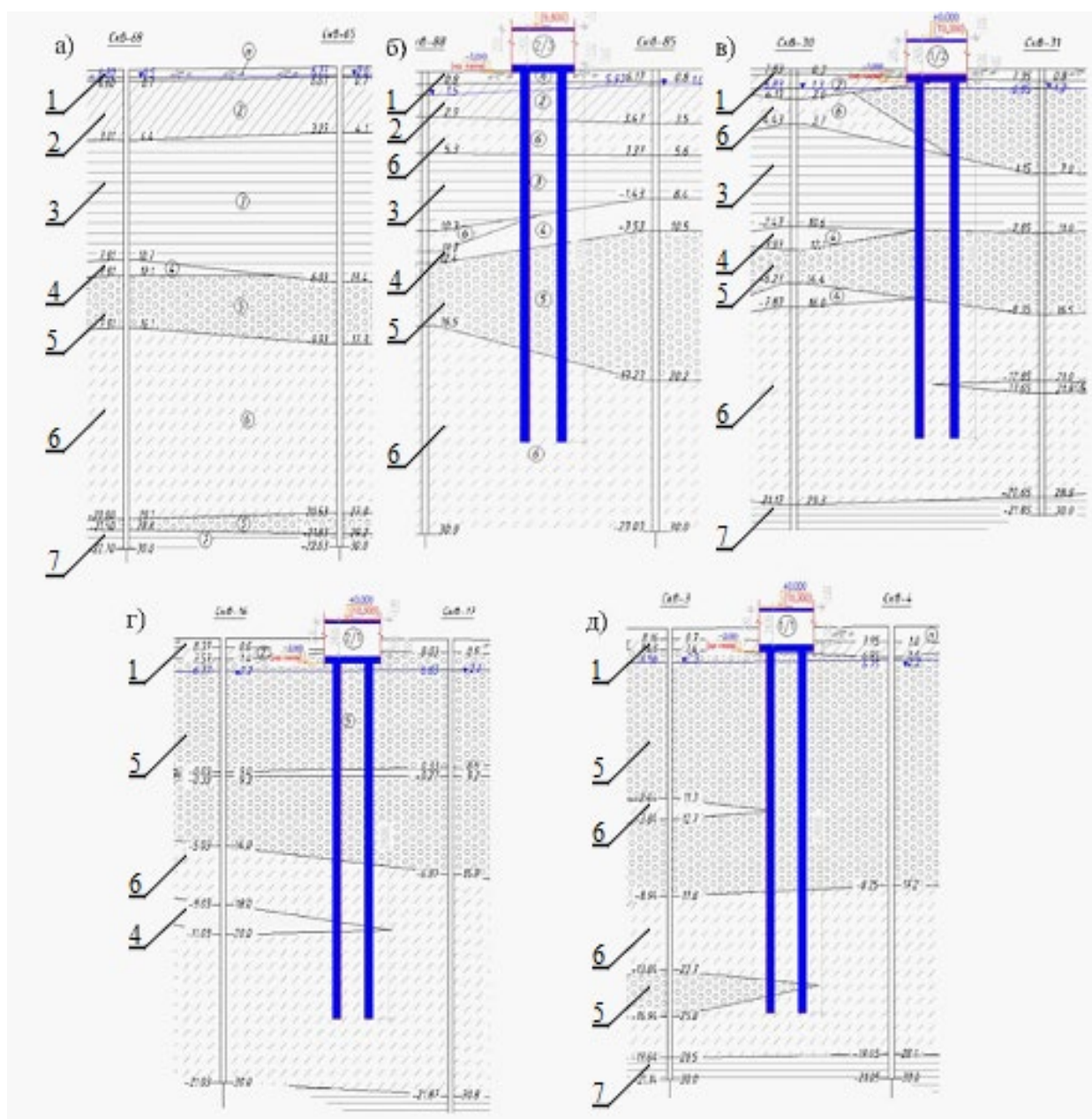


Рисунок 2.1 – Инженерно-геологические колонки строительной площадки в г. Сочи (ул. Таврическая), используемой для статических испытаний буронабивных свай с разгрузкой и последующими повторными нагружениями [70]: а...д – рассматриваемые колонки с посадкой на грунты испытываемых свай; 1 – почвенно-растительный грунт; 2 – суглинок тугопластичный; 3 – глина тугопластичная; 4 – песок средней крупности; 5 – галечниковый грунт с супесчаным заполнителем; 6 - супесь пластичная; 7 – глина полутвердая.

Таблица 2.2 – Сводные данные по испытываемым буронабивным сваям

№ сваи	Строительная площадка	Длина сваи, м	Диаметр сваи, м	Грунт в уровне нижнего конца сваи (несущий слой основания)
1	г. Сочи, ул. Таврическая	23,5	0,63	Супесь пластичная
2				
3				
4				
5				
6	г. Краснодар, ул. Красная	23,7	0,4	Песок пылеватый с глинистыми включениями
7				
8	Темрюкский район Краснодарского края	16	0,8	Глина полутвердая
9	г. Сочи, ул. Гастелло	20	0,63	Суглинок твердый
10				
11	г. Сочи, ул. Горького	11	0,63	Глина мягкопластичная; галечник с глинистым заполнителем
12		15		
13	г. Краснодар, ул. Кожевенная	13,1	0,35	Песок пылеватый, заиленный
14		12,8		
15		12,3		
16		12,5		

Программа испытаний натурных свай. Нагружение свай производилось с помощью гидравлических домкратов. Упорная конструкция выполнялась в виде сварных стальных балок двутаврового сечения, закрепленных на арматурных выпусках анкерных свай (рис. 2.2) [28]. Значения нагрузок на сваи устанавливались по показаниям манометра и пересчитывались в кН. Для определения осадок испытываемых свай использовались два прогибомера конструкции Н.Н. Максимова, прикрепленных к реперной системе. Для определения перемещений упорной конструкции использовался нивелир.

Статические испытания буронабивных свай проводились в два-три этапа нагружения и последующей их полной разгрузкой. Увеличение вдавливающей нагрузки, приложенной к испытываемым сваям, проводилось ступенчато. Величина первых трех ступеней нагружения составляла 20% от расчётной нагрузки, а всех последующих - 10%. На каждой ступени нагружения натурной сваи снимались отсчёты по приборам в следующей последовательности: нулевой отсчёт - перед нагружением сваи, первый отсчёт - сразу после приложения нагрузки, затем последовательно через каждые 15 мин до условной стабилизации осадок свай. За критерий условной стабилизации деформации принималась скорость осадки свай на данной ступени нагружения, не превышающая 0,1 мм за последние 60 мин наблюдений.

Разгрузка свай выполнялась ступенчато, с выдержкой на каждой ступени не менее 15 мин. После полной разгрузки наблюдения за перемещением сваи проводились в течении 60 мин, со снятием отсчётов через каждые 15 мин. Далее проводился второй и третий этапы нагружения сваи по приведенной схеме.



Рисунок 2.2 – Схема устройства упорной конструкции (строительная площадка в г. Сочи, ул. Таврическая)

2.1.4. Основные результаты, их анализ и обобщение

В результате статических испытаний буронабивных свай были построены графики зависимости их осадок S от внешней прикладываемой нагрузки N на этапах нагружения и разгрузки, которые приведены в приложении А. Данные по осадкам свай на рассматриваемых этапах нагружения приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Сводные данные по осадкам свай на этапах нагружения и разгрузки

№ сваи	Стро- ительная площадка	Осадки свай, мм								
		за один этап нагружения			суммарная, в конце каждого этапа нагружения			суммарная, в конце каждого этапа разгрузки		
		I этап	II этап	III этап	I этап	II этап	III этап	I этап	II этап	III этап
1	г. Сочи, ул. Таврическа я	14,54	6,94	6,91	14,54	15,86	17,11	8,92	10,2	11,48
2		9,62	5,81	5,75	9,62	9,69	10,08	3,88	4,33	4,73
3		8,23	5,18	5,32	8,23	8,63	9,21	3,45	3,89	4,29
4		4,96	3,87	4,11	4,96	5,55	5,88	1,68	1,77	2,12
5		2,17	2,05	2,17	2,17	2,34	2,42	0,29	0,25	0,19
6	г. Краснодар, ул. Красная	14,46	10,54	10,65	14,46	14,67	15,67	3,93	5,02	6,00
7		32,59	13,46	12,06	32,59	37,39	40,43	23,92	28,37	29,46
8	Темрюкски й район Краснодар- ского края	26,5	23,3	20,9	26,5	35,2	44,9	11,9	24,0	33,3
9	г. Сочи, ул. Гастелло	5,41	5,1	4,69	5,41	5,49	5,71	0,4	1,02	1,19
10		12,47	9,25	-	12,47	14,6	-	5,35	6,92	-
11	г. Сочи, ул. Горького	15,22	4,78	-	15,22	17,46	-	12,68	12,79	-
12		58,45	21,83	27,74	58,45	75,71	98,91	53,88	71,17	94,59

№ сваи	Строительная площадка	Осадки свай, мм								
		за один этап нагружения			суммарная, в конце каждого этапа нагружения			суммарная, в конце каждого этапа разгрузки		
		I этап	II этап	III этап	I этап	II этап	III этап	I этап	II этап	III этап
13	г. Краснодар, ул. Кожевенная	14,00	8,7	8,77	14,00	15,91	16,95	7,21	8,18	8,86
14		22,67	10,85	9,83	22,67	25,35	26,76	14,5	16,93	18,19
15		15,72	6,18	5,32	15,72	16,67	17,3	10,49	11,98	12,15
16		12,15	8,32	7,73	12,15	13,42	13,96	5,1	6,23	6,6

Результаты испытаний пяти свай по ул. Таврической в г. Сочи, опирающихся нижним концом на инженерно-геологический элемент – супесь пластичную, приведены на рис. 2.3. В качестве основных контролируемых параметров для анализа использовались значения осадок свай и их приращения на различных этапах нагружения. Кроме того, устанавливались изменения характеристик сжимаемости грунтов основания (модуля общей деформации E) в процессе испытаний, а также производилась оценка прогнозируемой несущей способности свай F_d и ее изменение при повторном нагружении. Учитывая, что испытания проводились для свай разных геометрических размеров, в различных грунтовых условиях, изменение значений контролируемых параметров E , F_d оценивались в процентах по отношению к полученным значениям на первом этапе нагружения и разгрузки.

Для определения (оценки) модуля общей деформации грунтов E в основании свай можно использовать различные методы: статическое зондирование грунтов, глубинные датчики перемещений, метод винтового штампа и др. [71–73].

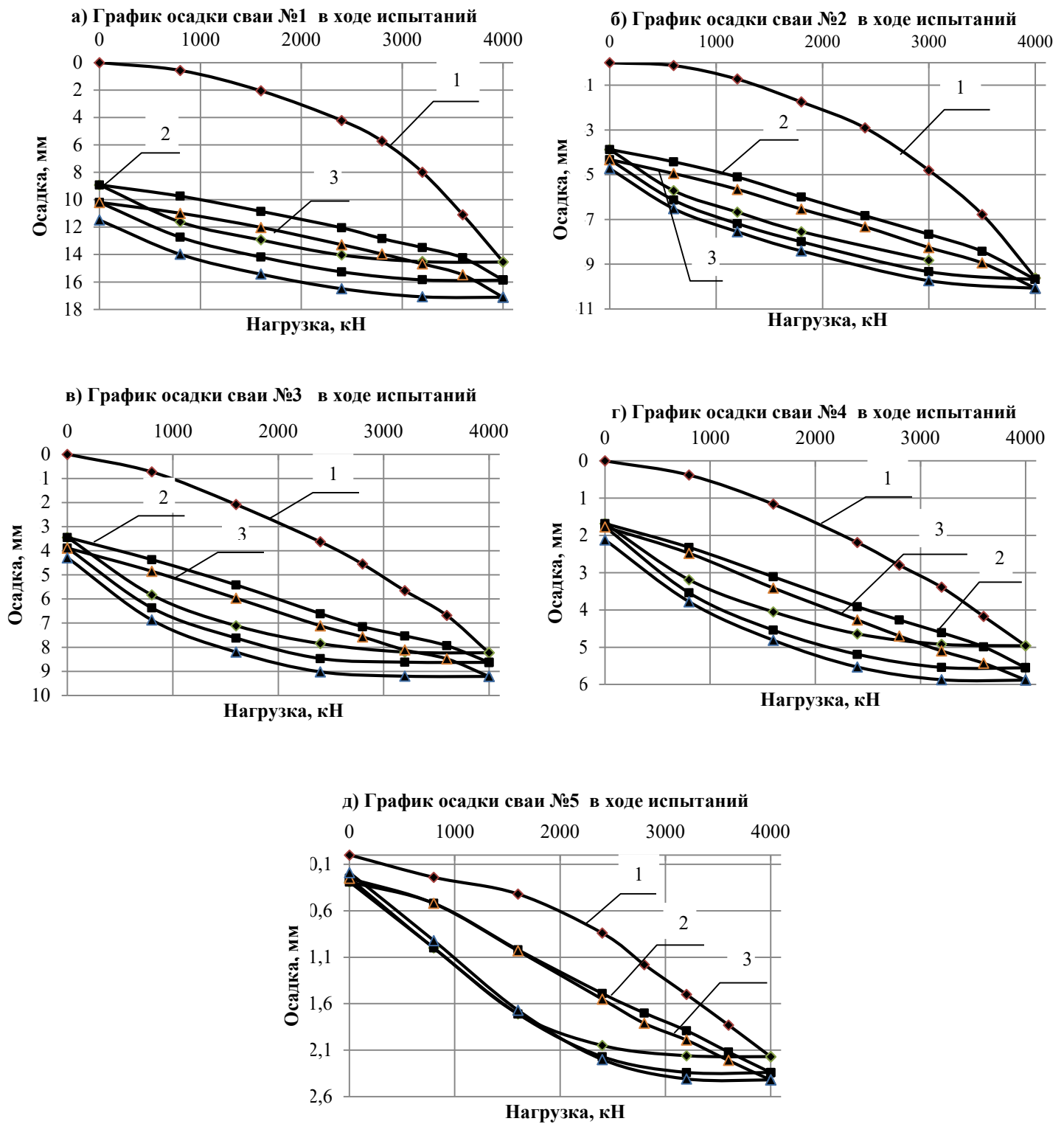


Рисунок 2.3 – Результаты испытаний натуральных свай на строительной площадке по ул. Таврическая в г. Сочи: а...д – соответственно номера свай 1...5; 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – второй и третий этапы нагружения.

Кроме вышеприведенных методов в последнее время также получили развитие графоаналитические методы оценки модуля деформации грунтов E по результатам лабораторных и полевых испытаний [11, 74]. В настоящей работе для оценки модуля деформации грунтов в основании нижнего конца буронабивных свай E при первом и последующих этапах повторных нагружений использовался аналитический метод И.З. Гольдфельда [33]:

$$E = \frac{(1 - \mu^2)N}{0.53dLS} \quad (2.1)$$

где E – модуль деформации грунта в основании нижнего конца сваи; μ – коэффициент Пуассона; N – внешняя нагрузка, приходящаяся на сваю; d – диаметр сваи; L – длина сваи; S – осадка сваи.

По результатам исследований Ф.К. Лапшина и др. (1978) установлено, что работу основания в уровне нижнего конца сваи при определенных внешних нагрузках можно рассматривать как работу основания под жестким круглым штампом [75]. Исследования также показали, что сопротивление грунта по боковой поверхности сваи достигает предельного значения при незначительных перемещениях, составляющих 5-15 мм [76, 77, 86]. Следовательно, можно полагать, что нижний конец буронабивной сваи в пределах эксплуатационных нагрузок работает как заглубленный штамп, и модуль общей деформации грунта основания можно определять по формуле Шлейхера (Н.А. Цытович, 1963) [100] с учетом преобразований по формуле (2.1). В результате опытно-промышленной апробации рассматриваемого метода [формула (2.1)] И.З. Гольдфельдом установлена удовлетворительная сходимость результатов расчета с данными экспериментов [33]. Метод И.З. Гольдфельда получил подтверждение в ходе анализа результатов статических испытаний буронабивных свай в г. Сочи по ул. Таврической. Теоретически вычисленное расчетное сопротивление грунта по боковой сваи f , опирающихся нижним концом на один и тот же грунт, изменялось в пределах от 2088 до 2920 кН (табл. 2.3а). Учитывая, что полная нагрузка на сваи в ходе их испытаний составляла 4000 кН, можно сделать вывод, что на нижний конец

свай приходилось вдавливающее усилие от 1080 до 1912 кН. Такое распределение внешней нагрузки между нижним концом и боковой поверхностью свай может быть подтверждено результатами статических испытаний, опубликованных в работе Г. Ф. Новожилова и Б. В. Бахолдина [25]. Их методика обработки результатов испытаний натуральных свай заключалась в построении графика зависимости осадки сваи от внешней нагрузки в логарифмическом масштабе и определением двух характерных линейных участков графика с пересечением их в точке, соответствующей ее сдвиговой осадке. Аналогичный подход к определению сдвиговой осадки свай был опубликован в работе Б.И Далматова, Ф.К. Лапшина (1975) [90]. Под сдвиговой понимается осадка сваи, при которой несущая способность по боковой поверхности достигает предельных значений и все дополнительные усилия (при дальнейшем ее нагружении) приходятся на нижний конец [32]. По результатам статических испытаний пяти свай (г. Сочи, ул. Таврическая) наблюдается практически линейная зависимость (с коэффициентом детерминации 0,98) между вдавливающим усилием N_n , приходящимся на их нижний конец, и конечной осадкой свай S_l на первом этапе нагружения (рис. 2.4).

Таблица 2.3а – Распределение внешней нагрузки N , приходящейся на боковую поверхность и нижний конец испытываемых свай (г. Сочи, ул. Таврическая)

Номера свай	Нагрузка, приходящаяся на боковую поверхность сваи, кН	Нагрузка, приходящаяся на нижний конец сваи N_n , кН
Свая 1	2088	1912
Свая 2	2436	1564
Свая 3	2469	1531
Свая 4	2662	1338
Свая 5	2920	1080

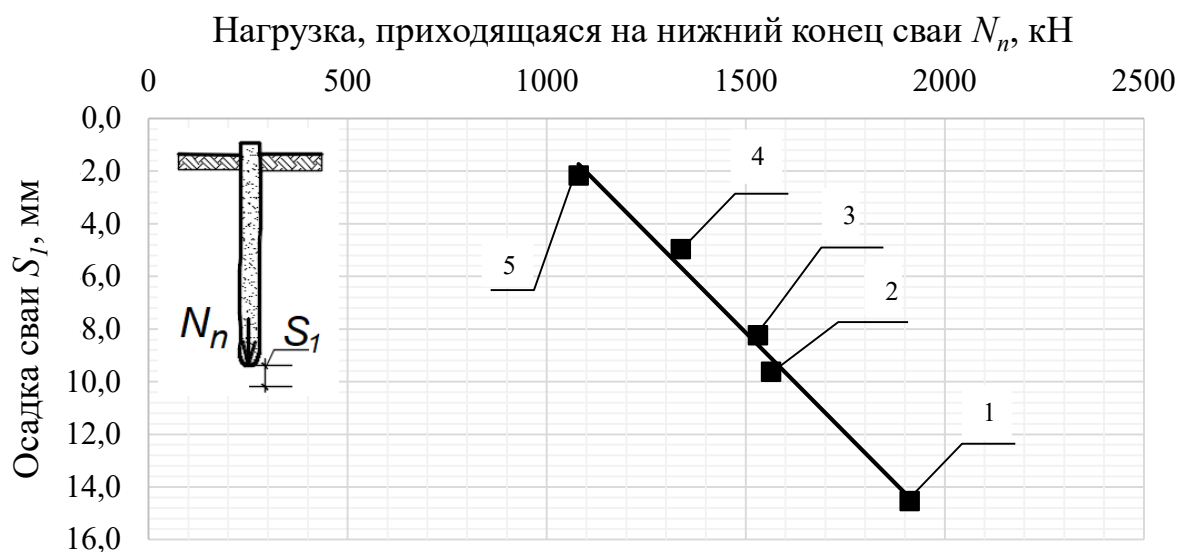


Рисунок 2.4 – График зависимости осадки свай S_I на первом этапе нагружения (табл. 2.3) от вдавливающего усилия N_n в уровне нижнего конца сваи (табл. 2.3а), г. Сочи, ул. Таврическая; 1...5 – номера испытываемых свай из табл. 2.1.

Таким образом, полученная практически линейная зависимость между вдавливающим усилием N_n и конечной осадкой S_I свидетельствует, что для определения модуля общей деформации грунта в уровне нижнего конца свай можно использовать формулу Шлейхера, преобразованную И.З. Гольдфельдом к виду (2.1).

Приращение осадки свай при их повторном и последующих этапах нагружения можно определялось по формуле:

$$\Delta S = S_{i+1} - S_i, \quad (2.2)$$

где S_{i+1} – осадка при повторном нагружении; S_i – осадка при первом нагружении.

Используя формулу (2.2), можно определить модуль общей деформации грунта на втором и последующих этапах нагружения по изложенной выше методике.

Большинство рассматриваемых в настоящей работе статических испытаний свай испытывались до заданной нагрузки. Поэтому для части свай несущая способность оказалась неустановленной. Для выявления несущей

способности свай в рассматриваемых испытаниях, которая оказалась больше заданной нагрузки в опытах, был выполнен их прогноз по методике, предложенной G. Pailkowsky и Т.А. Tolosko [78]. Эта методика была разработана по результатам анализа статических испытаний 63 забивных свай, испытанных под нагрузкой от 25% до 100% их несущей способности. Для оценки несущей способности в работе [78] применялся подход «Chin's Method» [79-80], основанный на математической аппроксимации графика зависимости осадки S от внешней нагрузки N в виде гиперболы по формуле:

$$F_d = \frac{1}{C_1}, \quad (2.3)$$

где C_1 – тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой графика зависимости «скорости» осадки S/N от величины осадки свай S , F_d – несущая способность

Асимптота гиперболы принимается за предельную нагрузку, которую может передать свая на основание. Данный подход дает лучшую сходимость результатов экстраполяции при малом числе ступеней нагружения во время статических испытаний свай. Есть и другая методика прогноза несущей способности свай F_d [81], основанная на математической аппроксимации графика зависимости осадки свай S от приложенной нагрузки N по результатам статических испытаний в виде кривой, описывающей четверть эллипса, которая в настоящей работе не использовалась.

После прогноза несущей способности рассматриваемых свай F_d (16 свай) устанавливался процент ее исчерпания, рассчитывающийся как отношение между нагрузкой N , достигнутой в ходе статических испытаний, и прогнозируемой несущей способностью F_d , рассчитанной по подходу «Chin's Method»:

$$R = \frac{N}{F_d} (\%), \quad (2.4)$$

где R – отношение приложенной нагрузки к несущей способности свай; N – максимальная нагрузка, приходящаяся на сваю в ходе статических испытаний; F_d – прогнозируемая несущая способность свай, рассчитанная по «Chin's Method».

Данные по результатам определения приращений осадки сваи при повторном ее нагружении (формула 2.2), модуля деформации грунтов основания, рассчитанного по формуле (2.1), а также прогнозируемой несущей способности свай (формула 2.3) приведены в табл. 2.4

Таблица 2.4 – Результаты определения приращений осадки, модуля деформации грунтов основания, а также прогнозируемой несущей способности свай

№ п/п	Площадка испытаний	Показатели, характеристики грунтов основания и свай								
		приращение осадки сваи, мм (%*)			модуль деформации грунта, МПа (%)			несущая способность свай, кН (%)		
		I этап	II этап	III этап	I этап	II этап	III этап	по результатам статических испытаний	По методу Chin's method	процент исчерпания несущей способности сваи
1	г. Сочи, ул. Таврическая	14,54	1,32 (+9,1)	2,57 (+17,7)	58,9	75,6 (+28,4)	75,8 (+28,7)	4000	4890	81,7
2		9,62	0,07 (+0,7)	0,46 (+4,8)	70,8	83,1 (+17,4)	83,2 (+17,5)	4000	5258	76,0
3		8,23	0,40 (+4,9)	0,98 (+11,9)	71,4	83,1 (+16,4)	89,1 (+24,8)	4000	5470	73,1
4		4,96	0,59 (+11,9)	0,92 (+18,6)	111,5	120,7 (+8,3)	114,0 (+2,3)	4000	6025	66,4
5		2,17	0,17 (+7,8)	0,25 (+11,5)	226,6	226,3 (-0,1)	213,8 (-5,7)	4000	6580	60,1
6	г. Краснодар, ул. Красная	14,46	0,21 (+1,5)	1,21 (+8,4)	37,6	39,1 (+4)	38,7 (+2,9)	2250	2570	87,5
7		32,59	4,8 (+14,7)	7,84 (+24,1)	43,1	45,5 (+5,6)	44,3 (+2,7)	2750	3291	83,6
8	Темрюкский район Краснодарского края	26,5	8,7 (+32,8)	18,4 (+69,4)	15,9	19,1 (+20,0)	26,4 (+66,1)	2200	2399	91,7
9	г. Сочи, ул. Гастелло	5,41	0,08 (+1,5)	0,3 (+5,5)	105,1	116,3 (+10,7)	117,8 (+12,1)	4000	6240	64,1
10		12,47	2,13 (+17,1)	-	61,8	68,5 (+10,8)	-	4400	5520	79,7
11	г. Сочи, ул. Горького	15,22	2,24 (+14,7)	-	140,5	161,8 (+15,2)	-	3000	5268	56,3
12		58,45	17,26 (+29,5)	40,46 (+69,2)	59,5	81,2 (+36,5)	83,7 (+40,7)	2500	2658	94,1
13	г. Краснодар, ул. Кожевенная	14,00	1,91 (+13,6)	2,95 (+21,1)	93,9	97,2 (+3,5)	97,0 (+3,3)	2000	2902	68,9
14		22,67	2,68 (+11,8)	4,09 (+18,0)	83,6	86,2 (+3,1)	85,0 (+1,0)	2000	2727	73,3
15		15,72	0,95 (+6,0)	1,58 (+10,1)	117,7	145,8 (+23,9)	152,0 (+29,1)	2000	3097	64,6
16		12,15	1,27 (+10,5)	1,81 (+14,9)	89,3	103,6 (+16,0)	104,3 (+16,8)	2000	2993	66,8

* В скобках дано отношение показателей к полученным на первом этапе нагружения-разгрузки свай

Статистическая обработка результатов испытаний. После обработки результатов статических испытаний свай установлены следующие закономерности:

1. Приращение модуля деформации грунтов основания свай при повторном нагружении наблюдалось в 15 из 16 результатах испытаний. Отсутствие данных о повышении модуля деформации грунта в основании сваи №5 объясняется ее работой за счет сопротивления грунта по боковой поверхности. При повторном нагружении основания сваи модуль деформации грунта увеличивается в среднем на 13-14%. На третьем этапе нагружения модуль деформации грунта увеличивается на 17-18%. Если рассматривать увеличение модуля общей деформации грунта в основании нижнего конца сваи при доверительной вероятности $P=0,85$, то это повышение при повторном нагружении составит 7,8%, а при третьем этапе нагружения составит 8,7% (рис. 2.5).

2. Наблюдается линейная зависимость между приращением осадки сваи ΔS на втором и третьем этапах нагружения от параметра R (Отношение внешней нагрузки N к прогнозируемой несущей способности F_d) (рис. 2.6). Эта зависимость при повторном нагружении имеет коэффициент корреляции Пирсона $r=0,5$ и на третьем этапе нагружения соответственно $r=0,7$. По шкале Чеддока [82, 91] данную взаимосвязь можно охарактеризовать как заметную ($0,5 < r \leq 0,7$) и для приращения осадки на втором и третьем этапах нагружения выразить в следующем виде:

$$\begin{cases} \Delta s = 1,34R - 78,54 & (\%), \\ \Delta s \geq 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

- при повторном нагружении:

$$\begin{cases} \Delta s = 0,4R - 18,08 & (\%), \\ \Delta s \geq 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

где Δs – приращение осадки на втором (третьем) этапах нагружения; R (%) – отношение приложенной нагрузки, к прогнозируемой несущей способности, рассчитанной по методике «Chin's Method».

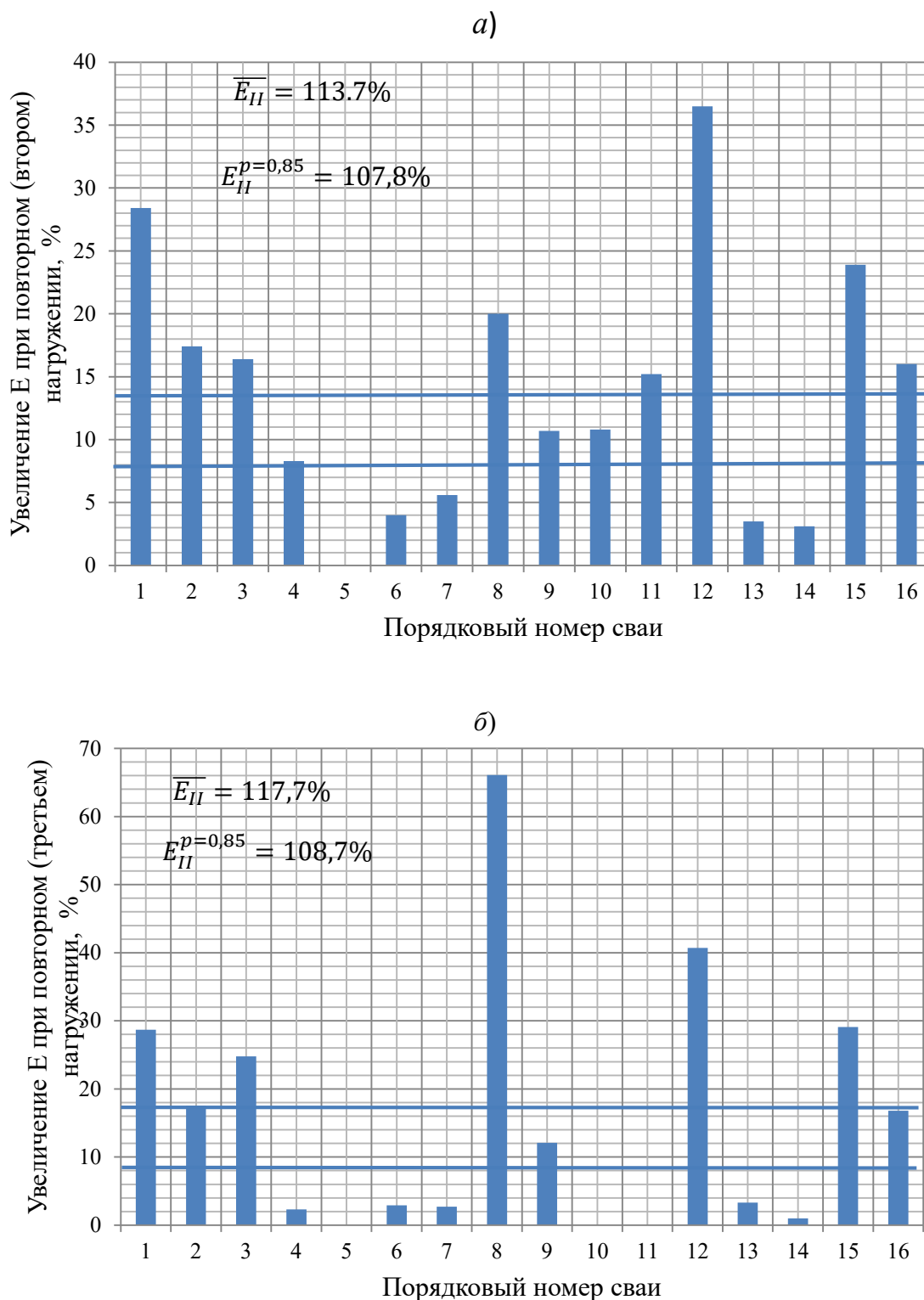


Рисунок 2.5 – Статистической обработка результатов статических испытаний буронабивных свай: а - при повторном (втором) нагружении; б - при повторном (третьем) нагружении.

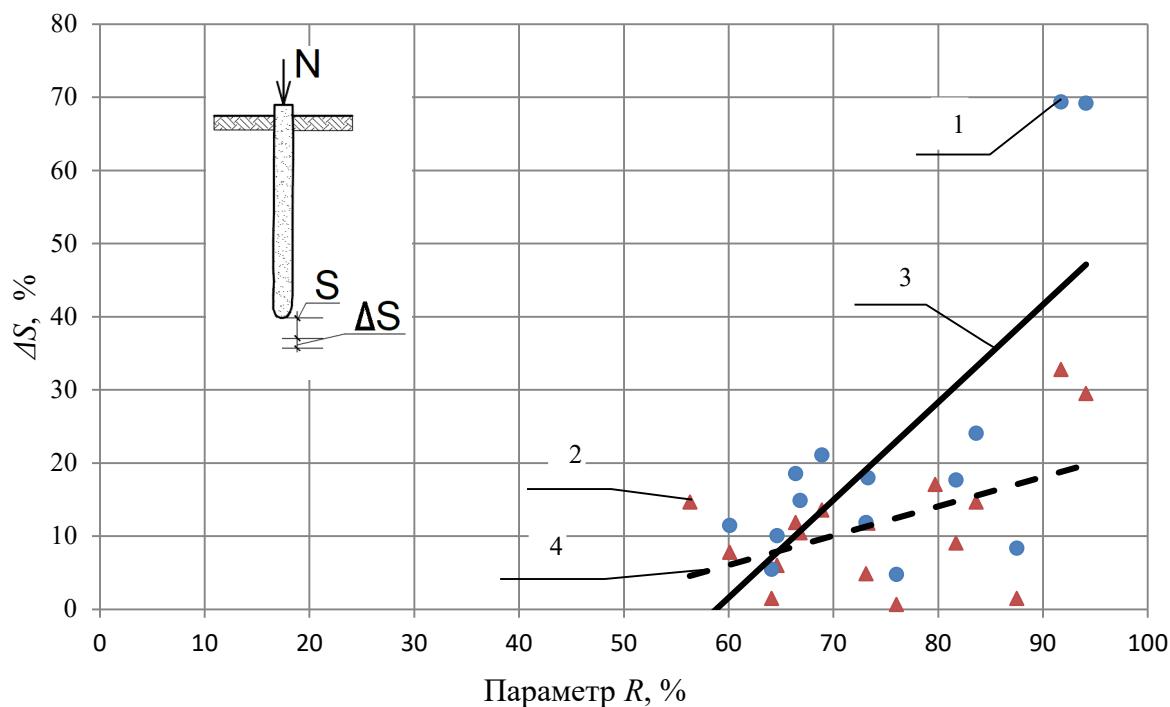


Рисунок 2.6 – зависимость между приращением осадки сваи ΔS на втором и третьем этапах нагружения от параметра R : 1 – данные по второму этапу нагружения; 2 – то же, по третьему этапу; 3 – аппроксимирующая прямая отношения приращения осадки к прогнозируемой несущей способности при повторном нагружении; 4 – то же, на третьем этапе нагружения.

Как следует из выражений (2.4) и (2.5) приращение осадки сваи ΔS начинает появляться при достижении внешней нагрузки на сваю N около 50-55% от прогнозируемой несущей способности F_d .

2.2. Экспериментальные исследования осадок моделей буронабивных свай в глинистом грунте при их разгрузке и последующих повторных нагружениях

2.2.1. Характеристика грунтовых условий опытной площадки

Экспериментальные исследования моделей буронабивных свай проводились на опытной площадке в г. Краснодаре. В пределах исследуемой толщи грунтов (до двух метров) залежали элювиальные отложения четвертичного возраста, представленные одним инженерно-геологическим элементом – суглинком тугопластичным, темно-серым, тяжелым,

гумусированным. Физико-механические характеристики грунта были получены по результатам лабораторных исследований по образцам (монолитам) и пробам, отобраным из шурфа (табл. 2.5). Поверх суглинка тугопластичного залегал почвенно-растительный слой толщиной 0,1 м. Физико-механические характеристики почвенно-растительного слоя не устанавливались.

Таблица 2.5 – Физико-механические характеристики грунта основания модели, полученные по данным инженерно-геологических изысканий на опытной площадке

№ п/п	Характеристики и показатели грунта	Значения характеристик
1	Наименование грунта основания	Суглинок тугопластичный
2	Модуль деформации (компрессионный) E , МПа	9
3	Модуль деформации (штамповый) E , МПа	13,5
4	Удельное сцепление грунта c , кПа	21
5	Угол внутреннего трения φ , град	12
6	Показатель текучести I_L , отн. ед.	0,29
7	Число пластичности I_p , %	14
8	Предел раскатывания W_p , %	26
9	Предел текучести W_L , %	40
10	Естественная влажность W , %	30
11	Коэффициент пористости e , отн. ед.	0,94
12	Плотность грунта ρ_s , г/см ³	1,81
13	Плотность частиц грунта ρ , г/см ³	2,7
14	Плотность скелета грунта ρ , г/см ³	1,39
15	Коэффициент водонасыщения S_r , отн. ед.	0,88

Подземные (грунтовые) воды в пределах исследованной толщи грунтов не обнаружены. Согласно архивным материалам по результатам инженерно-геологических изысканий (ИП Прудников В.К., 2020 г.), выполненных вблизи рассматриваемой площадки, установлено, что уровень подземных вод находится на глубине 4,5-5,0 от земной поверхности. Таким образом, вышеизложенное дает общее краткое представление о физико-механических характеристиках грунтов опытной площадки, используемой для экспериментальных исследований моделей буронабивных свай.

2.2.2. Методика проведения испытаний моделей свай в глинистых грунтах

Параметры моделей свай и устройство для их нагружения. Модели свай были выполнены буронабивными диаметром 100 мм и длиной 1000 мм. Армирование моделей выполнялось в виде отдельного стержня (арматуры класса А240) диаметром 10 мм по длине свай. Бурение скважин для устройства свай производилось с помощью портативной механизированной буровой установки ADA Grounddrill 9. Бетонирование скважин выполнялось мелкозернистым бетоном класса В25. Для формирования надземной части моделей свай (выше отметки поверхности земли) использовались пластиковые опалубочные кольца высотой 150-160 мм и диаметром 100 мм, которые устанавливались в грунт. После заполнения скважин бетоном проводилось его уплотнение с помощью специальной трамбовки. После устройства моделей свай устанавливался технологический перерыв в течение месяца для твердения бетонной смеси. Схема модели сваи приведена на рис. 2.8.

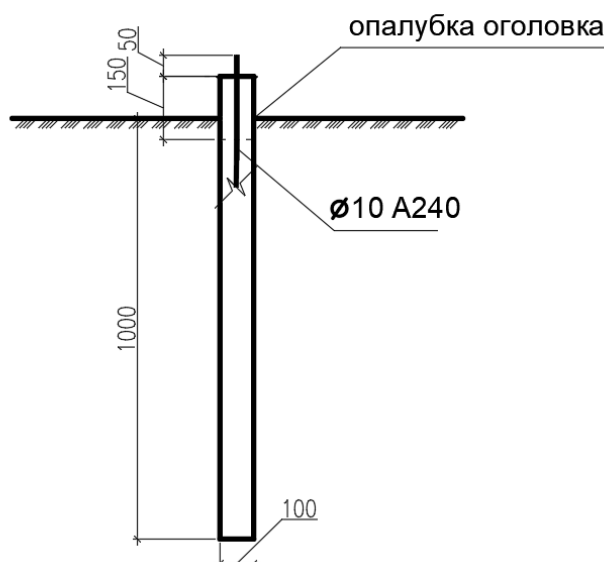


Рисунок 2.8 – Схема модели буронабивной сваи

Испытания моделей свай выполнялись с помощью установки марки МСУ конструкции Кубанского ГАУ (разработчики П.А. Ляшенко и др.). Одним из основных элементов установки МСУ являлась стальная упорная рама, выполненная из прокатных стальных элементов. На упорной раме устраивалась

специальная горизонтальная площадка для размещения тарированного груза, который обеспечивал пригруз для передачи требуемого усилия на модели свай. На упорной стальной раме крепилась система нагружения. Система нагружения представляла собой два спаренных червячных редуктора, приводимых в движение за счет электродвигателей. По червячному редуктору перемещалась муфта с подвесами. За счет движения подвесов менялось отношение плеч рычага, что обеспечивало увеличение вдавливающего усилия. Редукторы были шарнирно закреплены на валу, который крепился к раме через подвесы. Для обеспечения равновесия в начале испытаний с тыльной стороны червячных редукторов были устроены противовесы. Каждый редуктор был подключен к блоку управления, который производил их нагружение по заданной программе. За единицу нагружения принимался импульс, который равен $1/8$ оборота вала редуктора,двигающего муфту с подвесами. Считывание импульсов производилось с помощью оптопары, установленной в оголовке редуктора. Конструкция оптопары представляла собой стационарно закрепленные излучатель и приемник, между которыми вращался закрепленный на вале редуктора диск с восемью равномерно распределенными отверстиями. При вращении диска каждые $1/8$ оборота луч излучателя попадал в приемник, а полученный импульс фиксировался блоком управления.

Передача усилий на модели свай производилась с помощью штока, шарнирно закрепленного на пластине, объединяющей червячные редукторы. Усилия, передаваемые на модель свай, рассчитывались через тарировочную зависимость в блоке управления. Схема устройства и общий вид системы нагружения приведены на рис. 2.9.

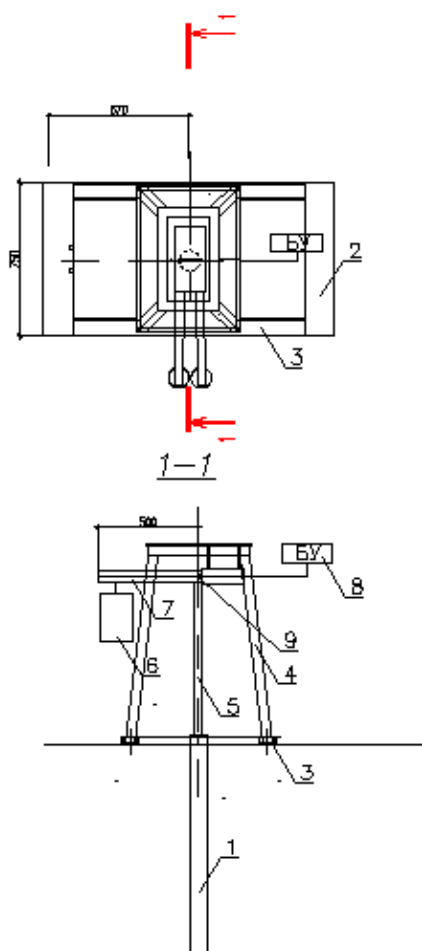
В рамках экспериментов определялась зависимость осадки моделей свай от приложенной внешней нагрузки, а также деформации грунтов основания в уровне нижнего конца свай. Измерение перемещений производилось с помощью фотоэлектронных датчиков перемещений с величиной деления $0,005$ мм, которые дублировались индикаторами часового типа ИЧ-10. Данные с фотоэлектронных датчиков записывались с шагом 5 сек на блоки управления.

Данные с ИЧ-10 считывались вручную каждые 5 минут. Все датчики перемещений были закреплены на отдельной раме (реперной системе), не имеющей сообщения с системой нагружения.

Для определения вертикальных перемещений в уровне нижнего конца моделей свай были изготовлены глубинные марки (рис. 2.10). Глубинная марка выполнялась из винтового анкера с наружным диаметром резьбы 6 мм, закрепленного на шпильке диаметром 6 мм с помощью муфты. Для обеспечения прочного соединения пространство внутри муфты клеим на эпоксидной основе, после чего края муфты загибаются на резьбу анкера. Для устройства глубинной марки в грунте предварительно пробуривались лидерные скважины по методике, приведенной в источнике [83]. В лидерную скважину устанавливалась полая алюминиевая трубка диаметром 10 мм на глубину 1,15 м. В полую трубку помещалась шпилька с глубинной маркой, и по достижении грунта анкер ввинчивался в него на 5 см, после чего проверялась его анкеровка легким выдергивающим усилием. Сверху на шпильке закреплялся лепесток для установки датчика перемещений.

Схема устройства системы измерений, а также установка для испытаний моделей свай в собранном виде приведены на рис. 2.11. Всего было установлено 12 глубинных марок (рис. 2.11а). На опорных пластинках марок устанавливались 10 датчиков перемещений часового типа и 2 датчика фотоэлектронных (ФЭП). На оголовках свай был установлен основной датчик ФЭП, который дублировался датчиком часового типа ИЧ-10. Для получения данных с индикаторов часового типа использовались цифровые фотоаппараты, закрепленные на штативах с двух сторон от установки для испытания моделей свай.

a



б



Рисунок 2.9 – Схема (а) и общий вид установки (б) для нагружения модели сваи

1 – модель сваи; 2 – пригруз (2x300кг); 3 – швеллер; 4 – упорная рама; 5 – шток; 6 – груз на подвесах (2x39 кг); 7 – рычаги (два червячных редуктора с электроприводом); 8 – блок управления; 9 – точка опирания системы нагружения

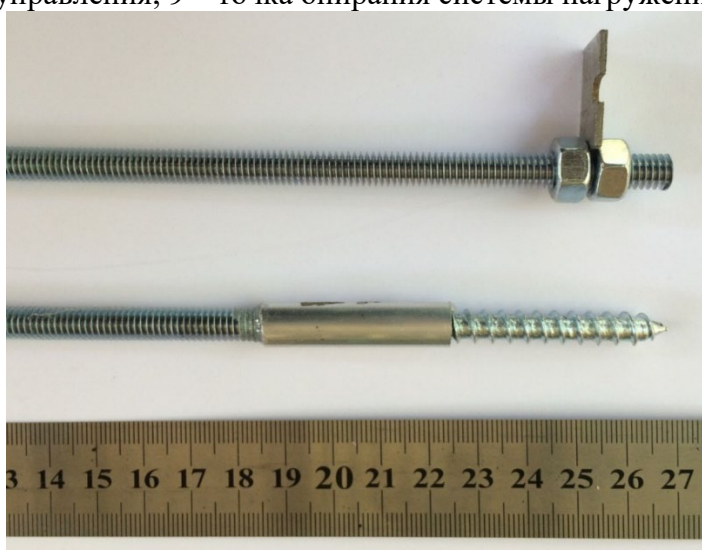


Рисунок 2.10 – Конструкция глубинной марки

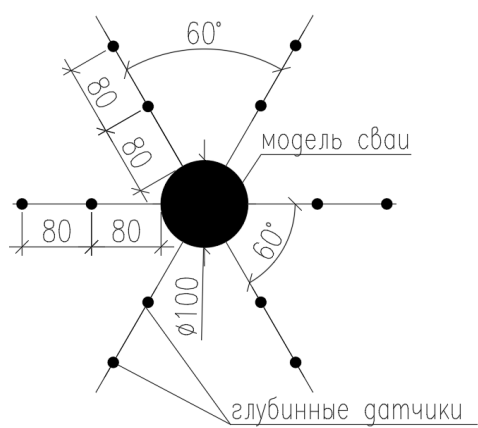
Для определения соотношения плеч рычага системы нагружения была проведена ее тарировка. Для этого шток закреплялся на поверенном динамометре ДОСМЗ-1 с установленным на нем датчиком перемещений ФЭП. После этого устанавливался груз на подвесы, а также на станину для передачи реактивных усилий. На следующем этапе через блок управления проводилось непрерывное вращение валов червячных редукторов с записью числа импульсов. Фиксировалось число импульсов нагружения каждую секунду до достижения предельного перемещения муфты по валу червячного редуктора. После этого проводилась разгрузка с регистрацией значений усилия также один раз в секунду. В результате была получена зависимость вдавливающего усилия от числа импульсов, передаваемых на редуктор блоком управления, а также зависимость увеличения вдавливающего усилия от времени (рис. 2.11).

Максимальное вдавливающее усилие на сваю составляло 5,41 кН (рис. 2.12). Регистрация показаний внешней нагрузки процессором блока управления (число импульсов) происходит практически линейно с увеличением нагрузки на динамометр сжатия (рис. 2.12а), коэффициент детерминации составляет 0,999. Увеличение вдавливающего усилия во времени также происходит практически линейно (рис. 2.12б), коэффициент детерминации составляет 0,998.

Характеристики системы нагружения установки МСУ, полученные в результате тарировки:

- Максимальная нагрузка на сваю – 5,41 кН;
- Максимальная скорость нагружения сваи внешней нагрузкой – 190 Н/мин;
- Максимальное число ступеней нагружения сваи – 3800;
- Минимальное время нагружения / разгрузки сваи – 0,53 часа;
- Минимальный размер ступени нагружения – 1,4 Н.

а)



б)



в)



Рисунок 2.11 – Схема установки для испытаний моделей свай

а) схема расположения глубинных марок в плане; б) общий вид системы измерений;

в) общий вид установки

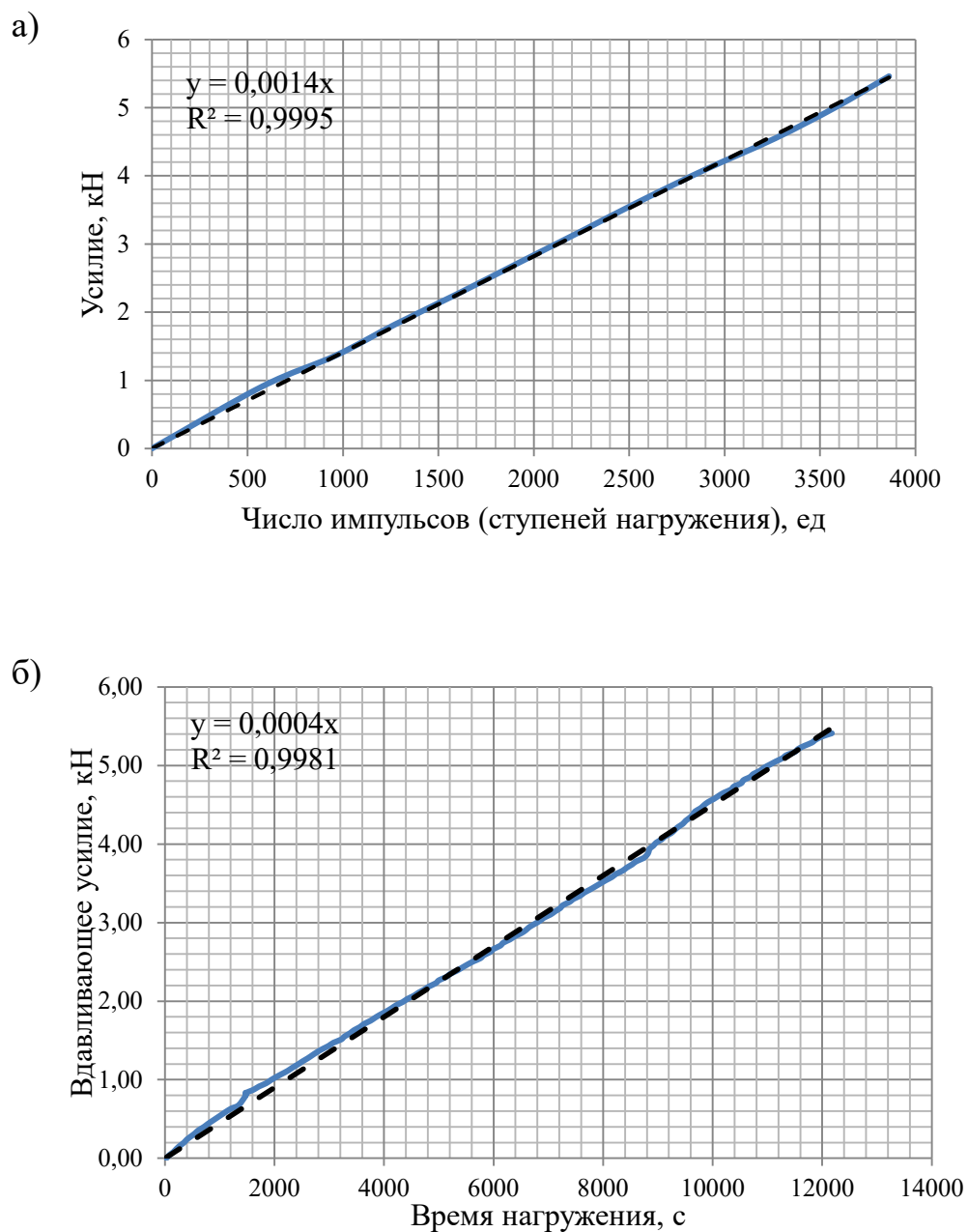


Рисунок 2.12 – Результаты тарировки системы нагружения установки МСУ

а - регистрация усилий блоком управления; *б* - зависимость вдавливающего усилия от времени нагружения (при постоянной скорости перемещения редукторов)

Отклонения полученной записи от аппроксимирующей прямой на тарировочном графике вызваны неравномерным трением соприкасающихся деталей при прохождении муфты по оси червячного редуктора. Максимальная погрешность наблюдается в начале испытаний и составляет 140 Н. По результатам тарировки можно сделать вывод о том, что полученная погрешность на два порядка меньше измеряемой величины и практически не влияет на результаты испытаний. Максимальная относительная погрешность приложения нагрузки с помощью МСУ составляет не более 3,0% [87].

Для подготовки программы испытаний был проведен анализ режимов эксплуатации крупных резервуаров для хранения нефтепродуктов. Оценивалось минимально разрешенное время полного заполнения резервуара нефтепродуктами и характер увеличения нагрузки на основание. В процессе эксплуатации резервуаров скорость их заполнения зависит от диаметра трубы ввода, скорости движения жидкости и конструкции крыши. Согласно указаний [11, 84], для крупных резервуаров объемом от 10 до 50 тыс. м³ минимально допустимое время полного заполнения составляет от 2,25 до 4,75 часа. Число этапов наполнения-разгрузки резервуаров зависит от режима эксплуатации (транзитный, накопительный режимы перекачки) и находится в диапазоне от 80 до 350 разгрузок и повторных нагружений в год [85].

Статические испытания моделей буронабивных свай проводились по методике постоянно возрастающей нагрузки (ПВН) в пять этапов нагружения-разгрузки [112]. Методика ПВН предполагает нагружение сваи с постоянной скоростью увеличения вдавливающей силы, действующей на сваю [88-90]. Нагружение моделей свай производилось до достижения усилия в 4,45 кН, соответствующего несущей способности свай, рассчитанной по СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты». Время полного нагружения моделей свай составляло 2,25 часа, что соответствует минимальному времени полного заполнения нефтепродуктами резервуара емкостью 10 тыс. м³ с понтонной крышей. Скорость нагружения резервуара при этом составляет 1,98 кН/час. После достижения заданного усилия производилась выдержка модели сваи под

нагрузкой до достижения условного критерия стабилизации, равного скорости осадки менее 0,01 мм за 6 минут измерений. После достижения критерия стабилизации производилась полная разгрузка усилий со скоростью 11,4 кН/час. После завершения испытаний модель сваи выдерживалась в ненагруженном состоянии в течение суток до следующего этапа испытаний.

2.2.3. Основные результаты экспериментальных исследований работы моделей свай, их анализ и обобщение

Всего было проведено два полевых опыта с моделями буронабивных свай. Для каждой модели сваи проводилось нагружение в 5 этапов (нагрузка и разгрузка). По результатам испытаний моделей свай были построены графики зависимости их осадок S от внешней нагрузки N на пяти этапах нагружения, а также эпюры осадок глубинных марок в основании нижнего конца свай (рис. 2.13). В результате испытаний установлено, что конечная осадка моделей свай в процессе их нагружения увеличивается, а ее приращение с каждым этапом уменьшается (рис. 2.13). Испытаниями установлено, что основное приращение осадки сваи ΔS происходит на первых трех этапах нагружения. Под нижним концом модели сваи возникает уплотненная область, которая в процессе повторных нагружений дополнительно уплотняется (рис. 2.14).

Анализируя непрерывную запись перемещений отдельно взятой глубинной марки, полученную с помощью фотоэлектронных преобразователей, можно отметить, что увеличение осадок внутри уплотненной зоны происходит скачкообразно (рис. 2.15). При этом на каждом этапе нагружения модели сваи накапливаются остаточные деформации даже после полного снятия нагрузки. Происходит уплотнение грунта вблизи нижнего конца сваи [33].

По результатам полевых экспериментов отдельно следует отметить, что приращение осадки сваи в процессе 5 этапов оказалось довольно велико и составило до 30-35% от первоначально зафиксированных значений. Подобные результаты наблюдались как в процессе статических испытаний, так и в

исследованиях отдельных авторов [16], что говорит о необходимости учёта данного фактора в процессе расчёта оснований и фундаментов резервуаров, а также при прогнозе дополнительной осадки уже эксплуатирующихся сооружений.

Для анализа характеристик сжимаемости грунтов в основании моделей свай использовался метод И.З. Гольдфельда [32]. Данные по осадкам моделей свай, их приращениям, а также по характеристикам модуля общей деформации в основании моделей свай приведены в табл. 2.7. В результате анализа установлено, что модуль деформации грунта основания модели сваи с каждым этапом нагружения возрастает.

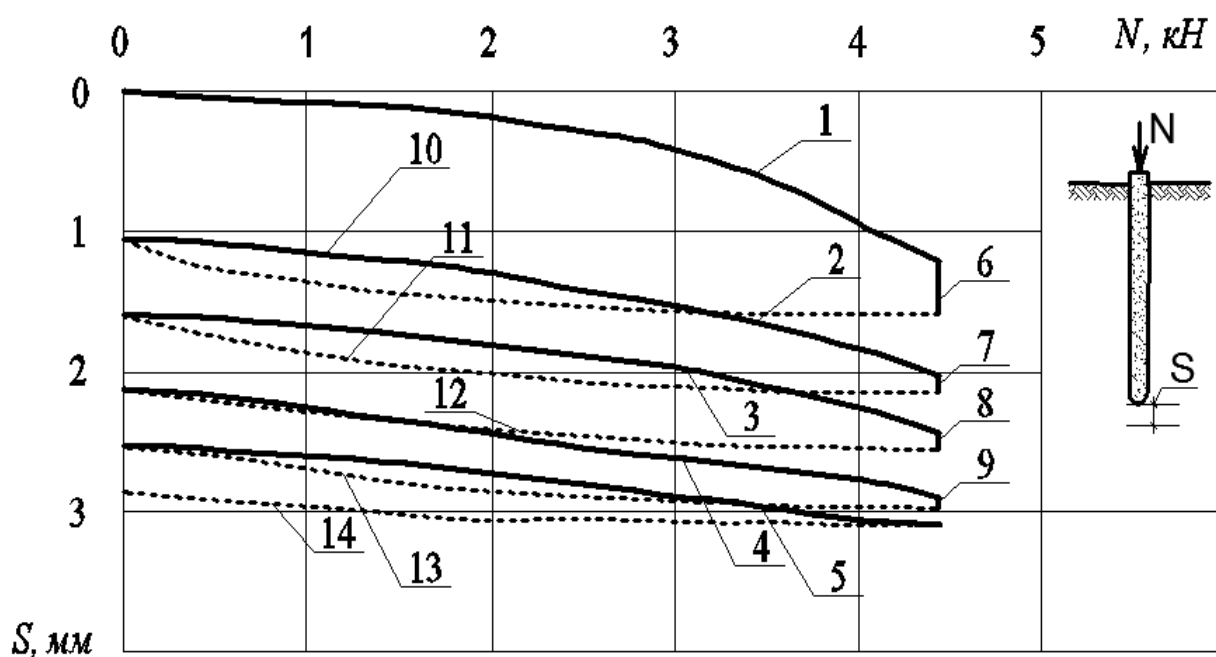


Рисунок 2.13 – Результаты испытаний модели сваи №1: 1-5 – соответственно этапы нагружения модели сваи без стабилизации осадки на первом и последующих этапах; 6-9 – участки стабилизации осадок на этапах нагружения; 10-14 – соответственно участки разгрузки сваи после каждого этапа нагружения

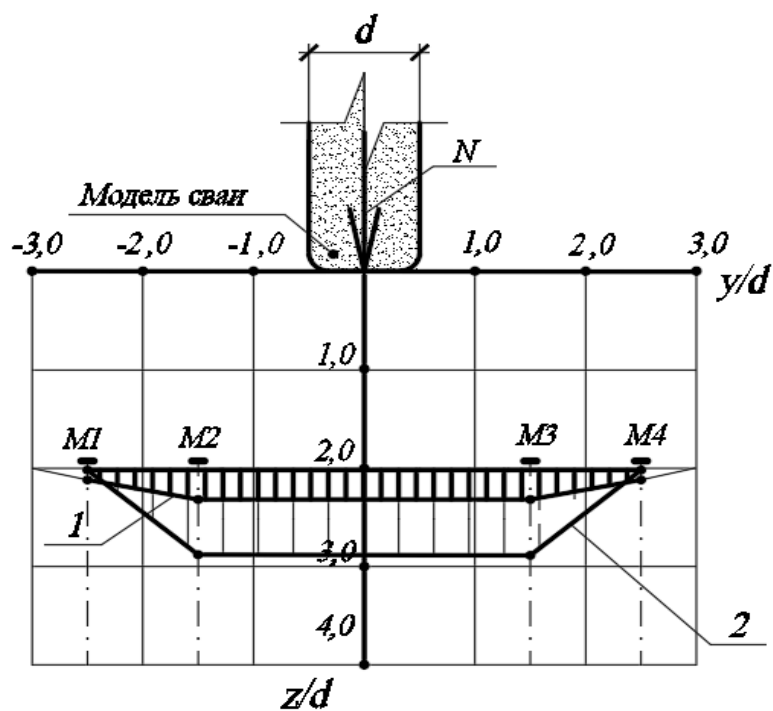


Рисунок 2.14 – Осадки глубинных марок М1-М4: 1 – эпюра перемещений грунта после первого этапа нагружения; 2 – то же, после пятого этапа. Масштаб эпюр перемещений показан условно

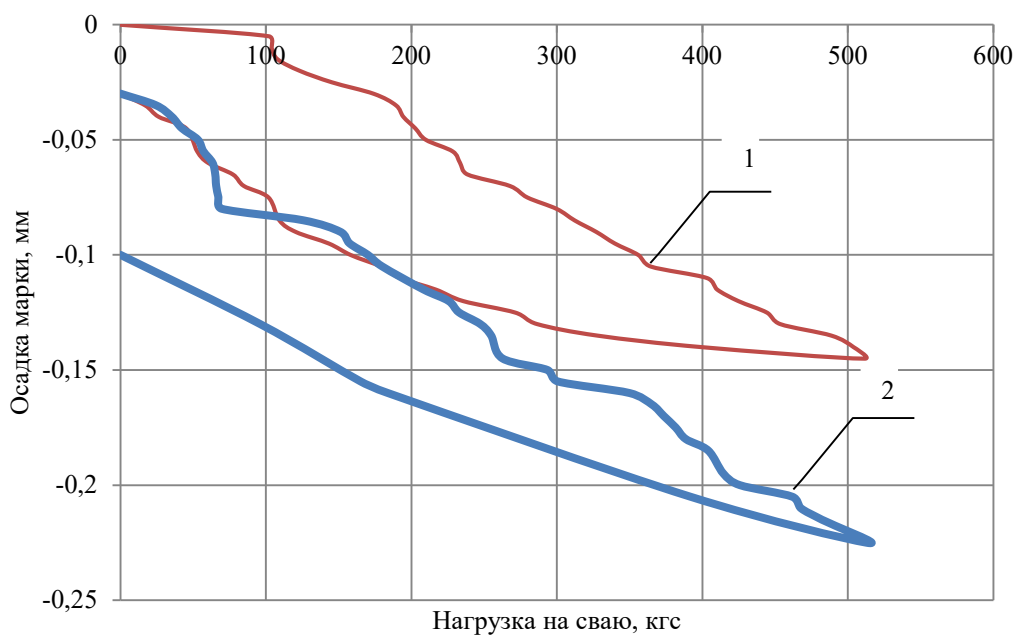


Рисунок 2.15 – Непрерывная запись перемещений глубинной марки 1 сваи №2 (данные фотоэлектронного датчика перемещений): 1 – первый этап нагружения; 2 – повторное нагружение

Таблица 2.7 – Сводные данные по результатам испытания модели сваи

№1

Параметры и характеристики моделей свай и грунтов основания	Значения характеристик и параметров на этапах нагружений:				
	этап I	этап II	этап III	этап IV	этап V
Суммарная осадка в конце каждого этапа нагружения, мм	1,59	2,15	2,56	2,91	2,98
Осадка за один этап нагружения, мм	1,59	1,09	0,96	0,78	0,28
Приращение осадки за этап нагружения мм	-	0,56	0,41	0,35	0,07
Модуль деформации грунта в основании модели E , МПа	103,1	109,6	112,8	125,8	147,7

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования работы моделей свай в глинистом грунте свидетельствуют о том, что их повторное нагружение приводит к повышению характеристик модуля деформации грунта в уровне нижних концов свай. При этом, повышение этих характеристик происходит в основном на втором и третьем этапах нагружения. Дальнейшее повторное нагружение моделей свай практически не оказывает влияние на изменение характеристик модуля деформации грунтов. Изменение характеристик сжимаемости должны учитываться при прогнозе осадок фундаментов сооружений.

2.3 Выводы по разделу 2

Обобщая представленные результаты экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено влияние повторных нагружений натуральных буронабивных свай на сжимаемость глинистых грунтов в их основании. Экспериментально выявлено увеличение модуля общей деформации глинистых грунтов в уровне нижних концов буронабивных свай после третьего этапа их нагружения на 17-18%.

2. Экспериментально выявлена зависимость приращения осадки сваи ΔS от отношения внешней нагрузки к прогнозируемой несущей способности сваи F_d . Установлено, что приращение осадки сваи ΔS начинает появляться при достижении внешней нагрузки на сваю N около 50-55% от прогнозируемой несущей способности F_d .

3. По результатам испытаний моделей буронабивных свай в глинистых грунтах установлено, что основное приращение осадок свайных фундаментов происходит на втором и третьем этапах повторных нагружений и составляет в среднем 20-22% от конечной осадки на первом этапе их нагружения.

4. Обобщая результаты испытаний моделей буронабивных свай в глинистых грунтах можно сделать вывод, что на четвертом и последующих этапах их нагружения приращение осадок свай является незначительным и не превышает 3-5% от осадки на первом этапе нагружения.

3. РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНОГО МЕТОДА РАСЧЁТА КОНЕЧНЫХ ОСАДОК КОЛЬЦЕВОГО СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА РЕЗЕРВУАРА

3.1. Исходные положения к обоснованию расчетной схемы

Развитие путей транспортировки нефти и нефтепродуктов требует строительства новых и модернизации существующих перегрузочных узлов, основными элементами которых являются вертикальные стальные резервуары. При строительстве резервуаров на глинистых грунтах, в том числе слабых водонасыщенных, широкое распространение нашли свайные фундаменты [90, 93, 94]. В результате исследований, выполненных в СПбГАСУ, НИИОСПе, КГАСУ и других организациях [3, 4, 92] выявлено, что в большинстве случаев использование кольцевых свайных фундаментов для резервуаров является наиболее эффективным решением, так как они получают меньшие осадки и являются более экономичными по сравнению с массивными свайно-плитными или плитными фундаментами. Кольцевой свайный фундамент предусматривает устройство стального гибкого днища под его центральной частью, а по краям резервуара кольцевого ростверка с однорядным, двух- или трехрядным расположением свай и со смещением главной вертикальной оси ростверка к его центру. При этом в основании гибкого днища устраивается промежуточная песчаная подушка. Для кольцевых свайных фундаментов резервуаров используются, в основном, забивные и буронабивные сваи.

Согласно результатам исследований [95, 96] примерно до 70% зафиксированных аварий резервуаров связаны с неравномерными осадками и кренами фундаментов. Установлено, что превышение допустимых осадок фундаментов резервуаров ($S > S_u$) может возникать после их гидравлических испытаний, когда резервуар эксплуатируется в штатном режиме. Фундаменты вертикальных стальных резервуаров при эксплуатации испытывают влияние большого числа повторных этапов нагружения и разгрузки, что приводит к развитию их дополнительных осадок ΔS . В настоящее время пока отсутствуют общепринятые

методы расчёта конечных осадок S кольцевых свайных фундаментов резервуаров с учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений.

3.2. Расчётная схема к определению осадок кольцевого свайного фундамента резервуара

В основе рассматриваемого метода лежит подход, предложенный Р.А. Мангушевым и Е.В. Городновой [34, 97] о расчёте конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров (2004-2005). Метод предусматривает использование решений К.Е. Егорова (1952-1958) и А.А. Бартоломея (1970) и других специалистов для вывода аналитических формул решаемых задач. В настоящей работе предусматривается отдельный расчёт осадок центральной части днища резервуара (далее - осадка днища) и железобетонного кольцевого свайного ростверка, устраиваемого по его краям (далее - осадка фундамента кольца). Днище резервуара при этом не имеет жесткой связи с фундаментом кольца (рис. 3.1).

Принимаем, что песчаная подушка в основании днища резервуара имеет толщину, равную 30-40 см и более (рис. 3.1а). Подушка выполняется с послойным уплотнением из крупного или средней крупности песка. В рассматриваемом случае песок классифицируется как малосжимаемый [29] и его деформационные характеристики на расчёт осадки днища резервуара практически не влияют. Края днища резервуара опираются на фундамент кольца и их перемещения ограничены его осадками. Следовательно, днище резервуара можно представить как гибкую круглую плиту на линейно-деформируемом основании. При этом днище имеет разные значения осадок в его центре и по краям. Фундамент кольца по краям резервуара можно рассматривать как массив из свай, ростверка и грунта. Его можно классифицировать как кольцевой ленточный фундамент, имеющий ширину, равную размеру b_c и глубину заложения, равную длине свай d_c (рис. 3.1а)

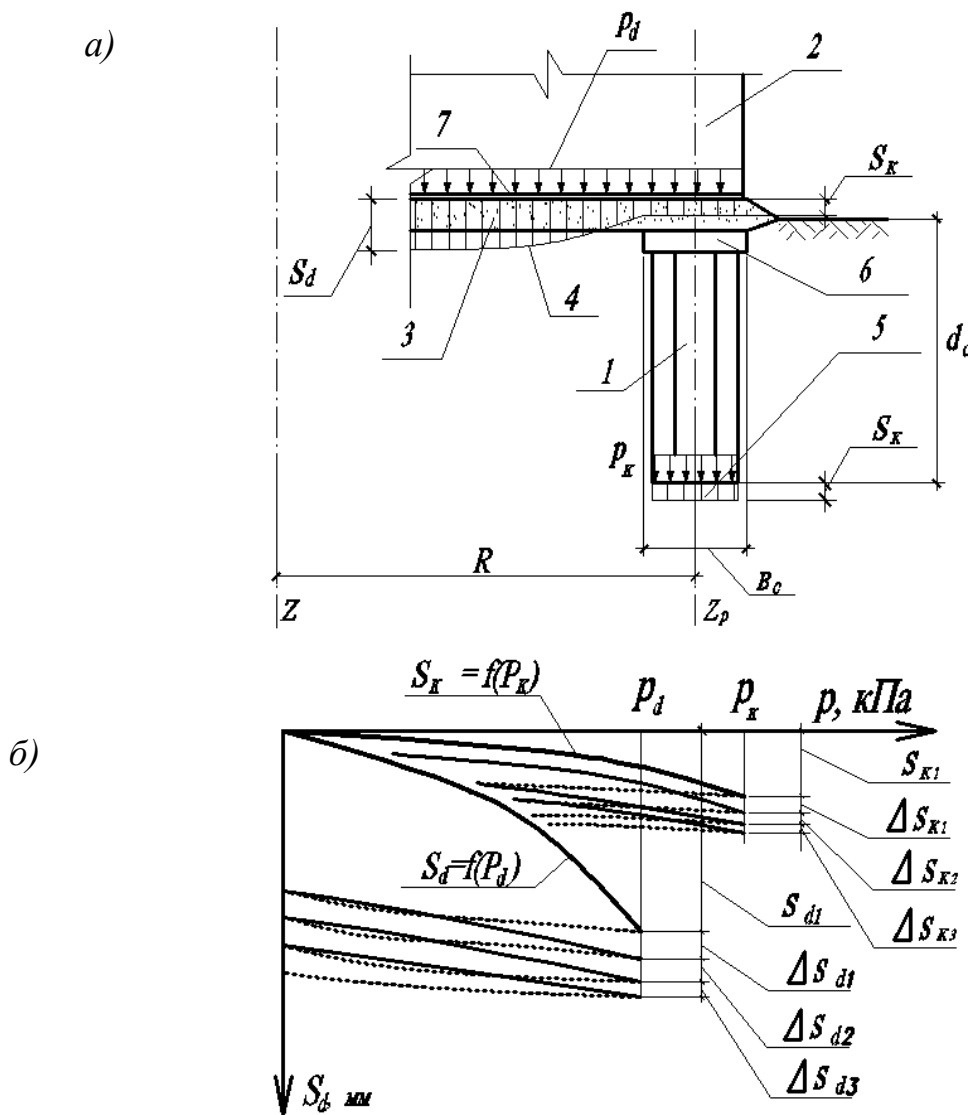


Рисунок 3.1 – Кольцевой свайный фундамент вертикального стального резервуара: а – схема конструктивного решения фундамента; б – зависимость осадок дна резервуара [$S_d = f(p_d)$] и кольцевого свайного фундамента [$S_k = f(p_k)$] от давления p_d и p_k ; 1- кольцевой свайный фундамент резервуара (фундамент кольца); 2 – вертикальный стальной резервуар; 3 – промежуточная песчаная подушка; 4 – эпюра осадки дна резервуара; 5 – эпюра осадки кольцевого свайного фундамента (осадки фундамента кольца); 6 – кольцевой ростверк; 7 – дно резервуара; z - центральная ось резервуара; z_p – главная вертикальная ось ростверка, p_d – давление на отметке дна резервуара, кПа; p_k – давление в уровне подошвы кольцевого свайного фундамента (фундамента кольца), кПа; s_d – осадка дна резервуара, см; s_k – осадка кольцевого свайного фундамента (фундамента кольца), см; s_{d1} – осадка дна резервуара на первом этапе нагружения, см; s_{k1} – то же, кольцевого свайного фундамента, см; $\Delta s_{d1}, \Delta s_{d2}, \Delta s_{d3} \dots \Delta s_{dn}$ – приращение осадки дна при повторном и последующих нагружениях резервуара, см; $\Delta s_{k1}, \Delta s_{k2}, \Delta s_{k3} \dots \Delta s_{kn}$ – то же, кольцевого свайного фундамента, см

3.3. Разработка методов расчёта осадок днища и фундамента кольца резервуара в глинистом грунте

Для расчёта осадки днища резервуара S_d воспользуемся методом М. И. Горбунова-Посадова и др. [47] для гибкого круглого фундамента на линейно-деформируемом основании. При этом осадка краев днища резервуара будет соответствовать вертикальным перемещениям (осадке) фундамента кольца, который с боков допускается ограничивать вертикальными плоскостями, проходящими по наружным граням кольцевого ростверка. Нижняя отметка подошвы фундамента кольца должна соответствовать нижним концам свай (рис. 3.1а). Отдельно следует отметить, что метод М.И. Горбунова-Посадова был разработан для гибких круглых плитных фундаментов и не предполагает ограничение боковых деформаций за счет устройства свайного кольца. При этом по результатам натурных испытаний опытных резервуаров в Тюменской области установлено уменьшение их осадок примерно на 30% и менее за счет устройства свайного кольца [4]. Поэтому при расчетах осадок днища резервуаров (по методу М.И. Горбунова-Посадова) применяем корректирующий коэффициент K , учитывающий ограничение боковых деформаций грунта в основании, равный 0,7.

Осадку днища резервуара S_{d1} (в центре) при первом этапе его нагружения (рис. 3.1б) можно определить по формуле:

$$S_{d1} = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot p_d \cdot \omega_{cp} \cdot K \cdot R}{E_d} \quad (3.1)$$

где S_{d1} – осадка днища резервуара в его центре при первом этапе нагружения основания, см; ν – коэффициент Пуассона; p_d – давление на отметке днища резервуара, кПа; K – корректирующий коэффициент, учитывающий ограничение боковых деформаций основания за счет устройства свайного кольца; R – радиус внутреннего диаметра ростверка, м; E_d – модуль деформации грунта в основании днища резервуара на первом этапе его нагружения, кПа; ω_{cp} – коэффициент ограничения сжимаемой толщи грунта .

Конечную осадку центральной части дна резервуара S_{δ} с учётом его повторных нагружений следует определять по формуле (рис. 3.1б):

$$S_{\delta} = S_{\delta I} + \Delta S_{\delta i} \quad (3.2)$$

где S_{δ} – конечная осадка дна резервуара (в его центре) с учетом повторных нагружений, см; $S_{\delta I}$ – то же, что и в (3.1), см; $\Delta S_{\delta i}$ – суммарное приращение осадок дна резервуара при его повторных нагружениях, см.

Суммарное приращение осадок $\Delta S_{\delta i}$ дна резервуара (в его центре) может быть установлено из выражения:

$$\Delta S_{\delta i} = \sum_{i=1}^n \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot p_{\delta} \cdot \omega_{cp} \cdot K \cdot R}{E_{\delta i}} \quad (3.3)$$

где $\nu, p_{\delta}, R, \omega_{cp}$ – то же, что и в формуле (3.1); $E_{\delta i}$ – модуль деформации грунта на i -том этапе нагружения, кПа;

Приращение осадки $\Delta S_{\delta i}$ в формуле (3.3) рекомендуется определять для трех этапов нагружения дна резервуара, так как при последующих этапах их нагружения приращения осадки практически не происходит (см. параграф 2.2).

Характеристики модуля деформации грунтов $E_{\delta i}$ в формуле (3.3) рекомендуется определять по результатам компрессионных испытаний (ГОСТ 12248) по методике, учитывающей разгрузку и последующие повторные этапы нагружений [111]. При этом значения $E_{\delta i}$ в формуле (3.3) следует определять для второго и третьего этапов нагружения. Испытания грунтов при последующих этапах нагружений можно не выполнять, так как значения $E_{\delta i}$ при этом практически не изменяются. Допускается для глинистых грунтов результаты компрессионных испытаний (значения $E_{\delta i}$) корректировать с помощью повышающих коэффициентов m_{oed} до результатов, соответствующих штамповым испытаниям грунтов, согласно рекомендациям нормативных документов (СП 22.13330.2016, табл. 5.1 и др.).

Следует отметить, что для оценки сжимаемости основания дна резервуара целесообразно также использование характеристик $E_{\delta i}$, установленных

по результатам полевых испытаний грунтов гибким штампом. Такие исследования проводились Р.А. Мангушевым в условиях слабых грунтов [98] (1980), которые показали их целесообразность. Однако отсутствие государственного стандарта и других рекомендаций на испытания грунтов гибким штампом затрудняет применение таких результатов полевых и лабораторных испытаний в практике проектирования фундаментов резервуаров.

Расчёт осадки фундамента кольца S_{k1} на первом этапе его нагружения рекомендуется проводить с использованием метода А.А. Бартоломея [99], при этом конечная осадка S_k определяется как для ленточного свайного фундамента (рассматривается участок длиной 1 м). При разработке метода расчёта сделано допущение, что осадка фундамента кольца и осадка ленточного фундамента отличаются незначительно. В условиях плоской и осесимметричной задач вследствие большого радиуса фундамента кольца (более 14 м) результаты расчётов их осадок не превышают 2-3 %.

Ширина фундамента кольца b_c принимается по наружным граням кольцевого ростверка, глубина d_c – по отметке заложения нижних концов свай. Грунт считается линейно-деформируемым (рис. 3.1а). В результате решения задачи о взаимодействии фундамента с грунтом основания (задача теории упругости) А.А. Бартоломеем была предложена формула [99]:

$$S_{k1} = \frac{p_k \cdot (1 - \nu^2)}{\pi E_k} \delta_0 \quad (3.4)$$

где E_k – модуль деформации грунта в основании фундамента кольца, устанавливаемый на первом этапе его нагружения, кПа; ν – коэффициент Пуассона; p_k – давление на отметке уровня подошвы фундамента кольца, кПа; δ_0 – коэффициент пропорциональности, принимаемый по [99].

Конечная осадка фундамента кольца S_k с учетом его повторных нагружений определяется по формуле:

$$S_k = S_{k1} + \Delta S_{ki} \quad (3.5)$$

где S_{k1} – то же, что и в (3.4), см; ΔS_{ki} – суммарное приращение осадок фундамента кольца резервуара при его повторных нагружениях, см.

Суммарное приращение осадок ΔS_{ki} может быть установлено из выражения:

$$\Delta S_{ki} = \sum_{i=1}^n \frac{p_k \cdot (1 - \nu^2) \cdot \delta_0}{\pi E_{ki}} \quad (3.6)$$

где ν , p_k , δ_0 – то же, что и в формуле (3.4); E_{ki} – модуль деформации грунта в основании фундамента кольца на i -ом (рассматриваемом) этапе нагружения, кПа;

Приращение осадок ΔS_{ki} в формуле (3.6) также, как и для днища резервуара [см формулу (3.3)], следует определять для трех этапов нагружения фундамента кольца. Модуль деформации грунта E_{ki} при этом в формуле (3.6) рекомендуется принимать не по результатам компрессионных испытаний (на этапе инженерно-геологических изысканий), а по результатам оценки его значений в основании нижнего конца используемых свай (для конкретного рассматриваемого этапа нагружения). Это объясняется тем, что основание фундамента кольца практически всегда находится в сложном напряженно-деформированном состоянии с учётом внешней нагрузки N , фактических осадок свай S и условно принятой ширины подошвы фундамента b_c (рис. 3.1а). Поэтому характеристика E_{ki} определяется при действующем напряженно-деформированном состоянии основания фундамента кольца, действующих внешних нагрузок и осадок натуральных свай. В рассматриваемом случае при определении характеристик E_{ki} предлагается использовать метод для заглубленного жесткого штампа, тип IV, площадью 600 см² (винтовой штамп, ГОСТ 20276.1.2020. Грунты. Метод испытания штампом, который базируется на применении формулы Шлейхера [100]. При этом могут использоваться и другие методы определения характеристик модуля деформации грунта E_{ki} в основании нижнего конца натуральных свай по результатам их статических испытаний (например, метод И.З. Гольдфельда, 2011 г. [32]).

3.4. Метод определения модуля деформации грунта для расчёта осадок фундамента кольца

Метод предусматривает определение характеристик модуля деформации грунта E_{ki} по результатам испытаний одиночных натуральных свай (забивных, буронабивных) статической вдавливающей нагрузкой. При этом испытания натуральных свай проводятся с учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений (рис. 3.2). Тогда, согласно ГОСТ 20276.1-2020, модуль деформации грунта E_{ki} в основании нижнего конца сваи (в основании винтового штампа) устанавливается по формуле:

$$E_{ki} = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot D \cdot \frac{\Delta p}{\Delta S} \quad (3.7)$$

где E_{ki} – модуль деформации грунта в основании натурной сваи, см; K_p – коэффициент, принимаемый в зависимости от заглубления нижнего конца сваи h к ее диаметру D (соотношение глубины штампа h к его диаметру D), принимаемый по ГОСТ 20276.1-2020, табл. 5 [101], $K_p=0,7$; K_1 – коэффициент, принимаемый в зависимости от формы нижнего конца сваи (формы штампа), равный $K_1 = 0,79$ при круглой форме штампа; ν - коэффициент Пуассона, принимаемый равным $\nu = 0,35$ для суглинков, $\nu = 0,42$ для глин.

Следует отметить, что коэффициент K_p был предложен Егоровым К.Е. для оценки влияния заглубления штампа на результаты испытаний [102]. В последующем результаты этих исследований использовались в работах Лушников В.В. (2016 г.), Болдырева Г.Г. (2016 г.) и других.

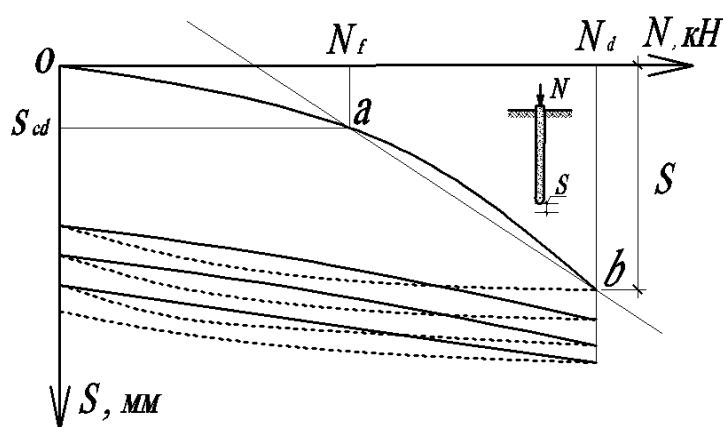


Рисунок 3.2 – График зависимости осадки сваи S от внешней нагрузки N на первом этапе нагружения, при разгрузке и последующих повторных нагружениях

В настоящее время поправочный коэффициент K_p применяется в расчётах модуля деформации E в основании винтовых штампов (тип IV по ГОСТ 20276.1-2020 [101]). Считается, что в случае использования жестких круглых штампов в открытых котлованах (дудках и др.), когда окружающий массив грунта отсутствует, коэффициент K_p следует принимать равным 1 [103].

Определение характеристик E_{k1} на первом этапе нагружения основания следует рассматривать в интервале нагрузок на сваю от N_f до N_∂ , где N_f - нагрузка на сваю, при которой заканчивается линейная зависимость на графике осадок $S=f(N)$, участок oa (рис. 3.2). N_∂ - нагрузка на сваю, соответствующая криволинейной зависимости на графике осадок. Осадка S , соответствующая предельному состоянию глинистого грунта на боковой поверхности сваи, называется сдвиговой $S=S_{cd}$ (рис. 3.2) [75]. До нагрузки N_f свая работает в основном за счёт сопротивления грунта по боковой поверхности, а нижний конец сваи в рассматриваемом интервале нагружения (на участке oa) практически не работает, что отмечается в исследованиях Лапшина Ф.К. и др. [75]. Дальнейшее увеличение внешней нагрузки N (от N_f до N_∂) приводит к тому, что в работу включается нижний конец сваи. При нагрузке $N = N_f$ свая получает осадку $S=S_{cd}$, а её нижний конец при этом начинает работать как заглубленный жесткий штамп. Затем вся внешняя нагрузка N по мере ее увеличения на сваю на участке ab передается на основание ее нижним концом. Это позволяет вычислять характеристики модуля деформации грунта E_k в основании (для участка ab) на первом этапе нагружения сваи. Подставим в формулу (3.7) вместо ΔS выражение $(S - S_{cd})$, вместо $D \cdot \Delta p$ выражение $4(N_\partial - N_f)/\pi D$, получим:

$$E_{ki} = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot \frac{4}{\pi D} \cdot \frac{N_\partial - N_f}{S - S_{cd}} \quad (3.8)$$

где S_{cd} - сдвиговая осадка сваи; N_∂ - нагрузка на сваю, соответствующая криволинейной зависимости на графике осадок, кН; N_f - нагрузка на сваю, при которой заканчивается линейная зависимость на графике осадок $S=f(N)$: участок oa (нагрузка на сваю, передаваемая на грунт ее боковой поверхностью), кН;

Нагрузка на сваю N_d определяется из выражения:

$$N_d = F_d / \gamma_k \quad (3.8a)$$

где F_d – несущая способность сваи, кН; γ_k – коэффициент надежности по грунту, принимаемый равным $\gamma_k = 1,2$ согласно СП 24.13330.2011.

Сдвиговая осадка сваи S_{cd} в формуле (3.8) определяется экспериментально в зависимости от разновидности грунта, залегающего вокруг рассматриваемой сваи. Однако для инженерных расчётов, не требующих большой точности, можно воспользоваться данными Далматова Б. И., Лапшина Ф. К. и др., которые установили значения сдвиговых осадок на основе экспериментальных данных для различных видов и разновидностей дисперсных грунтов (табл. 3.1) [90]. Экспериментальные данные значений S_{cd} были получены по результатам анализа графиков многочисленных статических испытаний натуральных свай, выполненных специалистами Ленинграддорстроя (1965-1975 гг). На логарифмической шкале графиков статических испытаний свай авторами были выявлены точки излома с резким увеличением угла наклона касательной к графику испытаний. Эти точки, по мнению Далматова Б. И., Лапшина Ф. К. и др., соответствовали предельному сопротивлению грунта по боковой поверхности свай и их сдвиговой осадке S_{cd} .

Таблица 3.1 - Сдвиговые осадки свай S_{cd} в различных грунтах

Грунты	S_{cd} , мм
Песок мелкозернистый средней плотности	5
Супесь легкая пылеватая, средней плотности	6
Супесь пылеватая, мягкопластичная	7
Суглинок тугопластичный	8
Суглинок пылеватый с гравием, мягкопластичный (морена)	10
Суглинок пылеватый слоистый мягкопластичный	15
Суглинок пылеватый ленточный мягкопластичный	18
Глина пылеватая ленточная тугопластичная	22
Глина пылеватая ленточная мягкопластичная	25

3.5. Рекомендации по расчёту конечных осадок кольцевого свайного фундамента резервуара

В общем виде порядок расчёта осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров может выполняться по следующему алгоритму:

1. Готовится программа и проводятся компрессионные испытания грунтов, залегающих в основании днища резервуара, с разгрузкой и последующими повторными нагружениями. По результатам испытаний определяются значения модуля деформации грунта в основании днища резервуара при первом $E_{\partial 1}$ и повторных $E_{\partial i}$ этапах нагружения. Рекомендуется данные компрессионных испытаний корректировать с помощью повышающих коэффициентов m_{oed} до результатов, соответствующих штамповым испытаниям грунтов (СП 22.13330.2016, табл. 5.1 и др.). Полученные значения $E_{\partial 1}$ и $E_{\partial i}$ используются для определения осадок днища резервуара на первом $S_{\partial 1}$ и последующих $\Delta S_{\partial i}$ этапах нагружения, а также его конечной осадки S_{∂} с использованием формул (3.1), (3.2) и (3.3).

2. Готовится программа и проводятся испытания натуральных свай статической вдавливающей нагрузкой с промежуточной разгрузкой и последующими повторными нагружениями.

Выбор продолжительности испытаний обусловлен скоростью заполнения резервуаров нефтепродуктами [104]. При достижении заданной нагрузки N следует выполнять стабилизацию осадок свай вплоть до достижения критерия, равного скорости осадки менее 0,1 мм за 1 ч наблюдений. Разгрузка свай выполняется с постоянной скоростью за тот же промежуток времени, что и при нагружении. Число этапов нагружений свай следует принимать не менее трех. За критерий исчерпания несущей способности сваи F_{∂} рекомендуется принимать предельно допустимую скорость осадки, соответствующую значению 1,2 мм/мин [105]. По результатам испытаний строятся графики осадки сваи S от прикладываемой внешней нагрузки N [$S=f(N)$] (рис. 3.2) для определения характеристик E_k , N_{∂} и N_f .

3. Определяются значения модуля деформации грунта E_k для испытываемых свай по формуле (3.8). Число испытываемых свай принимается по ГОСТ 5686-2012. При этом параметры N_d , N_f и S в формуле (3.8) устанавливаются по графику $S=f(N)$ согласно настоящего раздела по п. 2. Полученные значения E_{k1} и E_{ki} используются для определения осадок фундамента кольца на первом S_{k1} и последующих ΔS_{ki} этапах нагружения, а также его конечной осадки S_k с использованием формул (3.4), (3.5) и (3.6).

4. Полученные значения осадки днища резервуара S_d , осадки фундамента кольца S_k сравниваются с предельно допустимыми значениями S_{du} , S_{ku} .

3.6. Выводы по разделу 3

1. На основании анализа опыта проектирования кольцевых свайных фундаментов резервуаров разработана расчётная схема к определению его конечных осадок. Ее использование предусматривает отдельный расчёт осадок днища резервуара (осадка днища) и железобетонного кольцевого ростверка с одно- двух- или трехрядным расположением свай (осадка фундамента кольца).

2. Усовершенствован метод расчёта конечных осадок кольцевого свайного фундамента, который учитывает дополнительные его осадки, обусловленные повторными нагружениями и разгрузкой основания резервуара за счёт периодического изменения уровня нефтепродуктов в емкости.

3. Усовершенствован метод определения модуля деформации грунта в основании буронабивных свай, который позволяет определять изменение характеристик сжимаемости грунтов в уровне их нижнего конца при разгрузке и последующем повторном нагружении.

4. Разработаны рекомендации по расчёту конечных осадок кольцевого свайного фундамента резервуара, которые учитывают время заполнения резервуаров емкостью свыше 10 тыс. м³ нефтепродуктами, а также наличие их разгрузки и последующих повторных нагружений.

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Практическое применение инженерного метода расчета конечных осадок кольцевого свайного фундамента резервуара

Результаты проведенных исследований (разделы 2 и 3) использовались при проектировании фундаментов резервуаров в г. Туапсе Краснодарского края (2013-2016). В настоящем параграфе рассмотрен пример определения конечных осадок кольцевого свайного фундамента резервуара емкостью 10000 куб. м.

Исходные данные. Резервуар был запроектирован на территории нефтеперегрузочного комплекса, его высота составляла $h=17,9$ м, диаметр $d=28,5$ м. Под рассматриваемый резервуар был запроектирован кольцевой свайный фундамент с двухрядным расположением буронабивных свай длиной 7 м (в грунте) и монолитным железобетонным кольцевым ростверком с поперечным сечением 1,6 x 0,4 м (рис. 4.1). Плотность нефтепродукта $\rho=9$ кН/м³. Грунтовые условия до глубины 15,0 м представлены следующими данными [110]. С поверхности земли (отм. 0,000) до отметки -0,4 м залегает насыпной слой грунта (ИГЭ-1), который представлен суглинком туго- и мягкопластичным, гумусированным, с включениями растительности, строительного мусора и др. Удельный вес насыпного грунта $\gamma_0=20,1$ кН/м³. С отметки -0,4 м и до отметки -2,5 м залегает мягкопластичный суглинок (ИГЭ-2), имеющий следующие характеристики: удельный вес $\gamma_I=18,4$ кН/м³; коэффициент пористости $e = 0,87$; угол внутреннего трения $\varphi=17$ град; удельное сцепление $c=16$ кПа; модуль деформации по результатам компрессионных испытаний $E_{\partial 1}=7,7$ МПа (при повторных этапах нагружения $E_{\partial 2}=34,2$ МПа, $E_{\partial 3}=36,0$ МПа - соответственно); коэффициент Пуассона $\nu=0,35$. С отметки - 2,5 м и ниже залегает полутвердый суглинок (ИГЭ-3),

имеющий следующие характеристики: удельный вес $\gamma_l=17,8$ кН/м³; угол внутреннего трения $\varphi=26$ град; удельное сцепление $c=19$ кПа; модуль общей деформации $E_{\partial 1}=19,5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu=0,35$.

Решение. Расчёт осадок фундамента резервуара выполнялся в следующей последовательности:

1. По результатам компрессионных испытаний грунтов, залегающих в основании дна резервуара, были получены следующие значения модуля деформации: при первом этапе нагружения $E_{\partial 1}=7,7$ МПа; соответственно при втором и третьем этапах нагружения $E_{\partial 2}=34,2$ МПа и $E_{\partial 3}=36,0$ МПа. По таблице 5.1 СП 22.13330.2016 [111] устанавливаем значения переходного коэффициента, который при коэффициенте пористости $e=0,87$ равен $m_{oed}=1,7$. Соответственно, значения штампового модуля деформации грунта будут равны $E_{\partial 1}=13,1$ МПа; $E_{\partial 2}=58,1$ МПа и $E_{\partial 3}=61,2$ МПа.

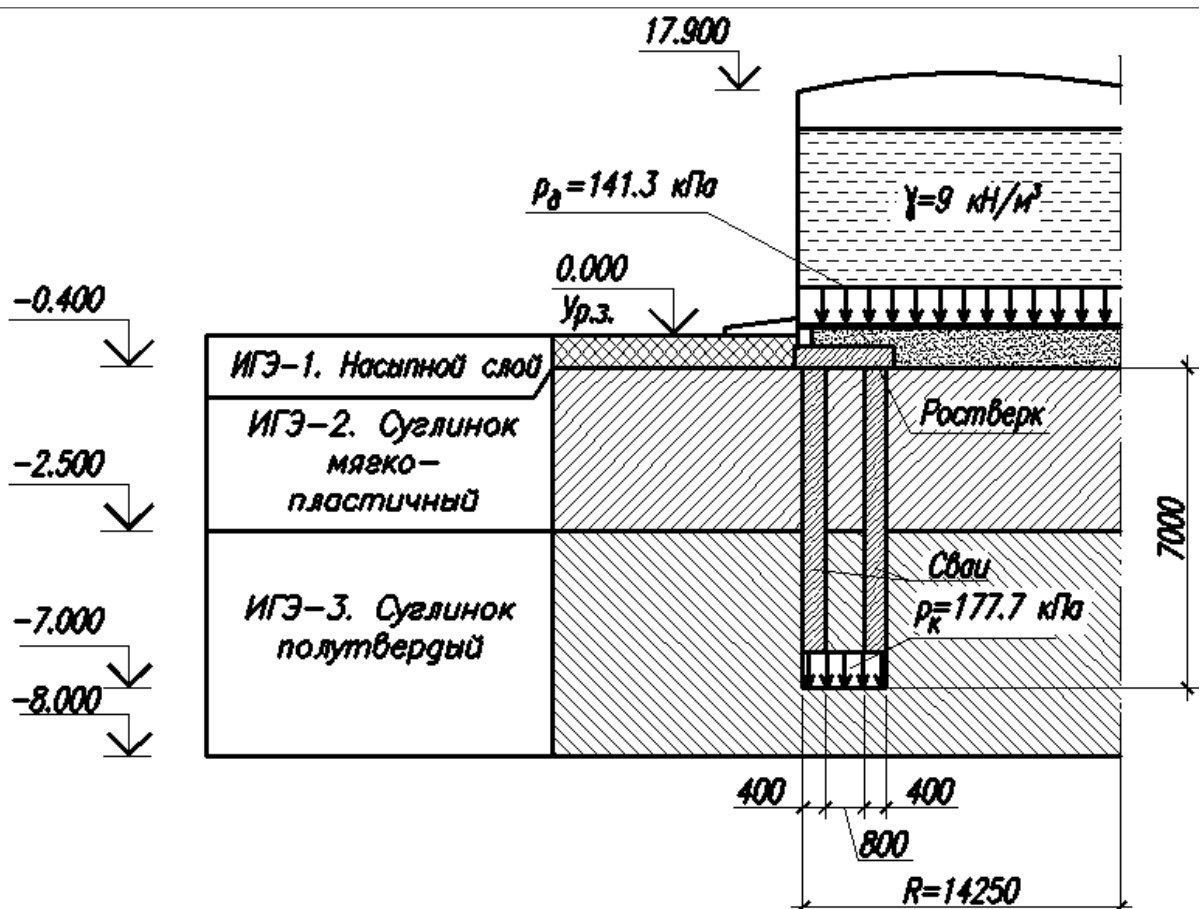


Рисунок 4.1 – Схема к расчёту осадок кольцевого свайного фундамента резервуара

По формуле (3.1) была определена осадка днища $S_{\partial I}$ резервуара на первом этапе нагружения:

$$S_{\partial I} = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot p_{\partial} \cdot \omega_{CP} \cdot K \cdot R}{E_{\partial}} = \frac{2 \cdot (1 - 0,35^2) \cdot 141,3 \cdot 0,85 \cdot 0,7 \cdot 14,25}{13,1} = 16,1 \text{ см};$$

По формуле (3.3) было установлено приращение осадки на втором и третьем этапах нагружения днища резервуара $\Delta S_{\partial i}$:

$$\Delta S_{\partial i} = \sum_{i=1}^n \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot p_{\partial} \cdot K \cdot R}{E_{\partial i}} = \frac{2 \cdot (1 - 0,35^2) \cdot 141,3 \cdot 0,85 \cdot 0,7 \cdot 14,25}{58,1} + \frac{2 \cdot (1 - 0,35^2) \cdot 141,3 \cdot 0,85 \cdot 0,7 \cdot 14,25}{61,2} = 3,64 + 3,43 = 7,1 \text{ см};$$

По формуле (3.2) определим конечную осадку днища S_{∂} резервуара:

$$S_{\partial} = S_{\partial I} + \Delta S_{\partial i} = 16,1 + 7,1 = 23,2 \text{ см}$$

2. Переходим к рассмотрению осадки фундамента кольца. По результатам статических испытаний свай [110] строим график зависимости осадки S от действующей внешней нагрузки $N: S=f(N)$ (рис. 4.2);

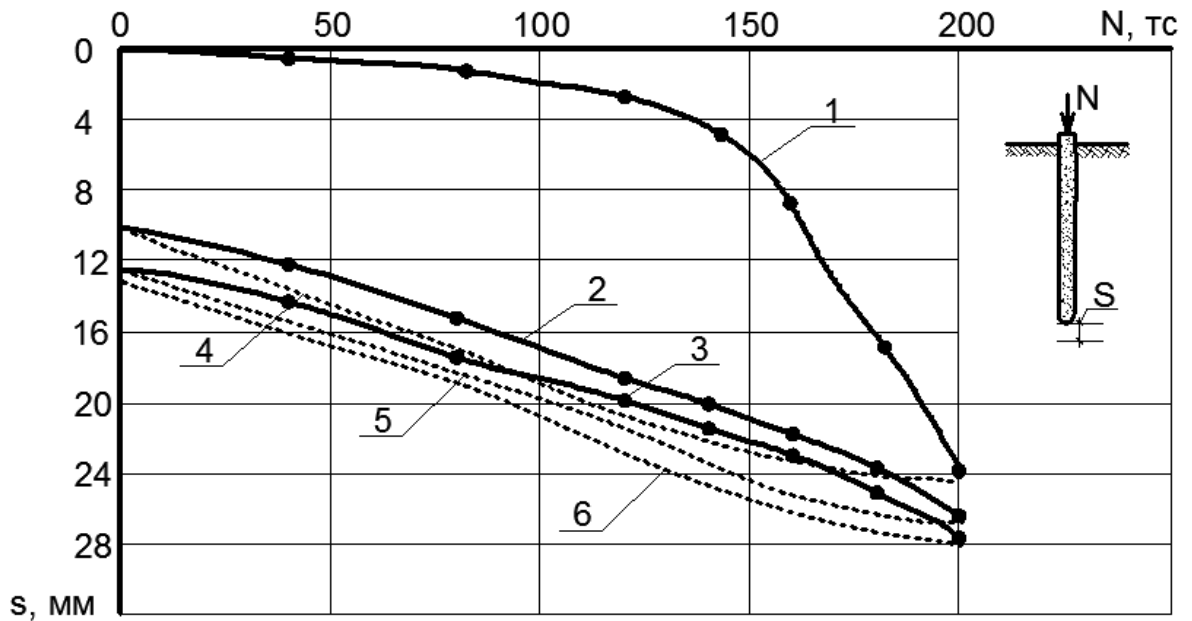


Рисунок 4.2 – Результаты статических испытаний натурной сваи: 1-3 – соответственно нагружение сваи на 1-3 этапах; 4-6 – соответственно разгрузка сваи на во время испытаний [110]

3. Определяем модуль деформации E_k на трех этапах нагружения в уровне нижнего конца сваи (ИГЭ-3). Для этого:

- по табл. 3.1 настоящей работы устанавливаем, что сдвиговая осадка сваи $S_{сд}$ составляет $S_{сд} = 8$ мм;

- определим значения модуля деформации грунта E_{k1} для суглинка полутвердого (ИГЭ-3) на первом этапе нагружения, используя формулу (3.8):

$$E_{k1} = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot \frac{4}{\pi D} \cdot \frac{N_d - N_f}{S - S_{сд}}$$

$$= (1 - 0,35^2) \cdot 0,6 \cdot 0,79 \cdot \frac{4}{3,14 \cdot 0,4} \cdot \frac{2000 - 1649}{23,9 - 8} = 29,2 \text{ МПа}$$

При этом значение $S_{k1}=23,9$ мм, устанавливается по графику (рис. 4.2) на первом этапе нагружения.

По формуле (3.8) определим значение модуля деформации грунта E_{k2} на втором этапе нагружения:

$$E_{k2} = (1 - 0,35^2) \cdot 0,6 \cdot 0,79 \cdot \frac{4}{3,14 \cdot 0,4} \cdot \frac{2000 - 1137}{26,4 - 18,1} = 137,9 \text{ МПа};$$

При этом значение $S_{k2}=26,4$ устанавливается по графику (рис. 4.2) на втором этапе нагружения.

По формуле (3.8) определим значение модуля деформации грунта E_{k3} на третьем этапе нагружения:

$$E_{k3} = (1 - 0,35^2) \cdot 0,6 \cdot 0,79 \cdot \frac{4}{3,14 \cdot 0,4} \cdot \frac{2000 - 1183}{27,9 - 20,5} = 146,3 \text{ МПа}.$$

Значение $S_{k3}=27,9$ устанавливается по графику (рис. 4.2) на третьем этапе нагружения.

По формуле (3.4) определяем осадку фундамента кольца $S_{к1}$ резервуара на первом этапе нагружения:

$$S_{к1} = \frac{p_k \cdot (1 - \nu^2)}{\pi E_k} \delta_0 = \frac{177,7 \cdot (1 - 0,35^2)}{3,14 \cdot 29,2} 2,5 = 4,3 \text{ см};$$

По формуле (3.6) определим приращение осадки фундамента кольца резервуара ΔS_{ki} на втором и третьем этапах нагружения:

$$\begin{aligned} \Delta S_{ki} &= \sum_{i=1}^n \frac{p_k \cdot (1 - \nu^2) \cdot \delta_0}{\pi E_{ki}} \\ &= \frac{(1 - 0,35^2) \cdot 177,7 \cdot 2,5}{3,14 \cdot 137,9} + \frac{(1 - 0,35^2) \cdot 177,7 \cdot 2,5}{3,14 \cdot 146,3} = 0,9 + 0,8 \\ &= 1,7 \text{ см;} \end{aligned}$$

По формуле (3.5) определяем конечную осадку фундамента кольца S_k резервуара:

$$S_k = S_{k1} + \Delta S_{ki} = 4,3 + 1,7 = 6,0 \text{ см}$$

4. Полученные значения осадки днища резервуара $S_d=23,2$ см, а также фундамента кольца $S_k = 6,0$ см резервуара сравниваем с предельно допустимыми значениями S_u . Предельное значение осадки S_u принимаем по приложению Г СП 22.13330.2016 [111] для элеваторов. В соответствии с п. 4 [111], предельная осадка рассматриваемого резервуара составляет $S_u = 40$ см. Условие $S < S_u$ для днища ($S = 23,2$ см) и фундамента кольца ($S = 6$ см) выполняется ($S = 23,2$ см $< S_u = 40$ см; и $S = 6,0$ см $< S_u = 40$ см), следовательно, фундамент запроектирован правильно. Относительную разность осадок днища и фундамента кольца резервуара не проверяем, так как этот параметр в рамках представленной работы не рассматривался.

4.2. Численный метод расчёта конечных осадок кольцевого свайного фундамента резервуара на основе использования ПК Midas GTS NX

Краткая характеристика программного комплекса. Программный комплекс *Midas GTS NX* разработан компанией *MIDAS Information Technology Co., Ltd. (MIDAS IT)* для плоских и пространственных расчётов зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях [115]. В программном комплексе реализованы различные методы расчётов, такие как: статический, динамический методы расчёта грунтов основания, расчёт фильтрации и консолидации грунтов, расчёт этапности возведения зданий и сооружений и

др. Эффективность расчётов в ПК *Midas GTS NX* обеспечивается применением конечно-элементных моделей, разработанных для грунтов основания фундаментов зданий, сооружений. Всего в программном комплексе реализовано около 50 различных моделей грунтов, которые могут быть применены с учётом наличия подземных (грунтовых) вод, специфических свойств грунтов и др. Сетка конечных элементов при построении численных моделей грунтов генерируется автоматически. Настройка размеров конечных элементов может также корректироваться вручную в отдельных областях для повышения достоверности результатов расчета.

Исходные данные для примера расчёта. В программном комплексе *Midas GTS NX* была создана пространственная модель кольцевого свайного фундамента резервуара и схема ее посадки на инженерно-геологический разрез строительной площадки (рис. 4.3 и 4.4). Для расчётов грунтов основания фундамента сооружения была принята модифицированная модель грунта Мора-Кулона, которая учитывает его упрочнение при повышении внешней нагрузки. Она применяется для расчёта дисперсных грунтов, представленных супесями, суглинками, глинами и песками различной плотности сложения. Модифицированная модель Мора-Кулона предназначена для применения ее в расчётах, которые сочетают в себе нелинейно-упругое и пластическое поведение грунта. Модифицированная модель грунта Мора-Кулона использует гиперболическую зависимость деформации от девиаторных напряжений, что соответствует реальному поведению грунта [107, 108]. В рассматриваемую модель могут вводиться характеристики модуля деформации грунта, установленные при его повторном нагружении. Для выполнения численных расчётов основания резервуара и моделирования работы свай в составе его фундамента необходимы данные по характеристикам грунтов и параметрам сооружения. Физико-механические характеристики и параметры грунтов основания, а также параметры кольцевого свайного фундамента резервуара представлены в табл. 4.1 и 4.2.

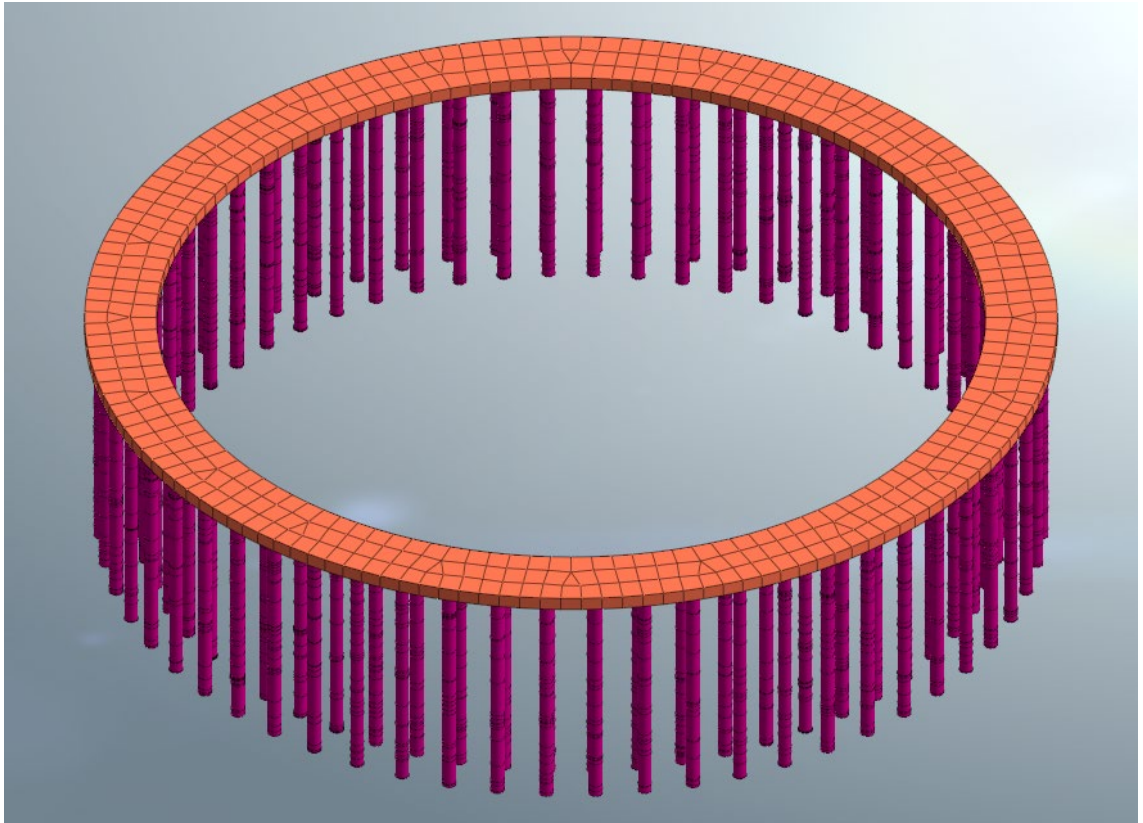


Рисунок 4.3 – Пространственная модель кольцевого свайного фундамента

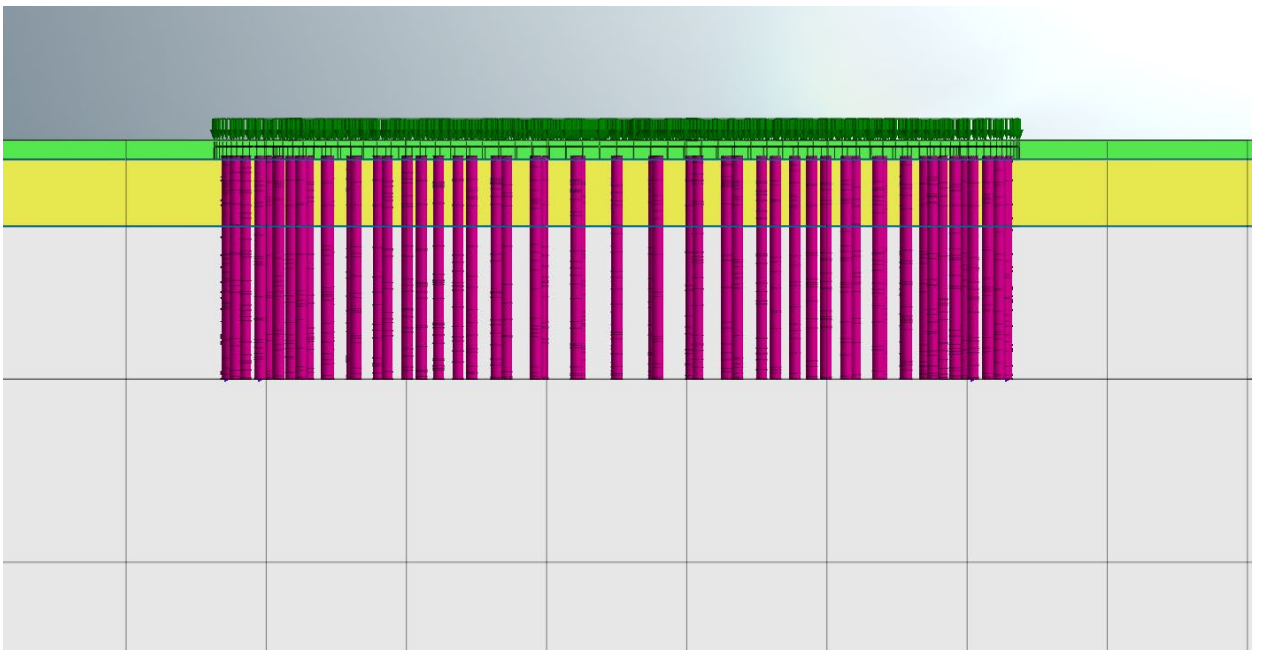


Рисунок 4.4 – Схема посадки пространственной модели на инженерно-геологический разрез строительной площадки

Таблица 4.1– Характеристики грунтов и параметров в основании резервуара для численных расчетов в ПК в Midas GTS NX

Характеристики и параметры	Обозначения	Грунты в основании кольцевого свайного фундамента		
		ИГЭ-1 насыпной слой	ИГЭ-2- суглинок мягкопластичный	ИГЭ-3 суглинок полутвердый
Коэффициент Пуассона	ν	0,25	0,25	0,25
Модель грунта	<i>Model</i>	Modified Mohr-Coulomb	Modified Mohr-Coulomb	Modified Mohr-Coulomb
Удельный вес водонасыщенного грунта, кН/м ³	γ_{sat}	20,1	19	20
Секущий модуль деформации, кПа	E_{50ref}	-	13100	29200
Модуль деформации по ветви вторичного нагружения, кПа	E_{uref}	-	60000	142000
Пористость, д.ед.	<i>Porosity</i>	-	0,87	0,83
Угол внутреннего трения, град.	<i>Friction Angle at shear</i>	-	17	26
Удельное сцепление, кПа	C	-	16	19
Одометрический модуль деформации, кПа	E_{oedref}	-	13100	29200

Таблица 4.2 – Параметры и характеристики свайного фундамента резервуара

Параметры и характеристики	Наименование характеристик, параметров	Значение
Материал фундамента	<i>Material type</i>	Elastic
Модуль упругости	E , МПа	$3,0 \cdot 10^7$
Плотность	ρ , кН/м ³	25
Коэффициент Пуассона	ν	0,2

Методика и результаты расчёта осадок численным методом. В рассматриваемой методике расчёт осадок днища и фундамента кольца рассчитывался как единый фундамент. В целом расчёт осадок кольцевого свайного фундамента резервуара производился поэтапно. Величина его осадок фиксировалась в двух расчётных точках: в центральной точке днища резервуара (максимальная) и на внешнем крае фундамента кольца (ростверка), при этом фундамент резервуара рассматривается как кольцевой свайный. Днище резервуара было принято в виде стального гибкого материала (листа), установленного под гравийно-песчаную подготовку толщиной 40 см. Жесткость стального днища резервуара в поверочных расчётах не учитывалась. Были приняты следующие стадии расчёта:

1. Определение нагрузок от собственного веса грунта.
2. Определение нагрузок на основании от веса кольцевого свайного фундамента. Устройство кольцевого свайного фундамента предусматривается с использованием буронабивных железобетонных свай. Взаимодействие боковой поверхности сваи с грунтом основания задавалось с помощью программных элементов (интерфейсов), а именно параметров снижения прочности на контакте свая-грунт. Длина буронабивных свай была принята 7 м, как и в инженерном методе расчёта.

3. Определение нагрузок от веса надземных строительных конструкций резервуара (без учета заполнения жидкостью).

4. Определение нагрузок от веса жидкости. Предполагалось полное нагружение резервуара до уровня максимального разлива. Данное действие повторяется в 3 этапа разгрузки и последующих повторных нагружений. Значения осадок устанавливались для каждого отдельного этапа.

После создания расчётных схем основания и фундамента резервуара, поэтапного определения нагрузок, включая нагрузки от веса жидкости, были получены данные о распределении напряжений и перемещений в основании и установлены осадки днища и фундамента кольца резервуара (рис. 4.5-4.9).

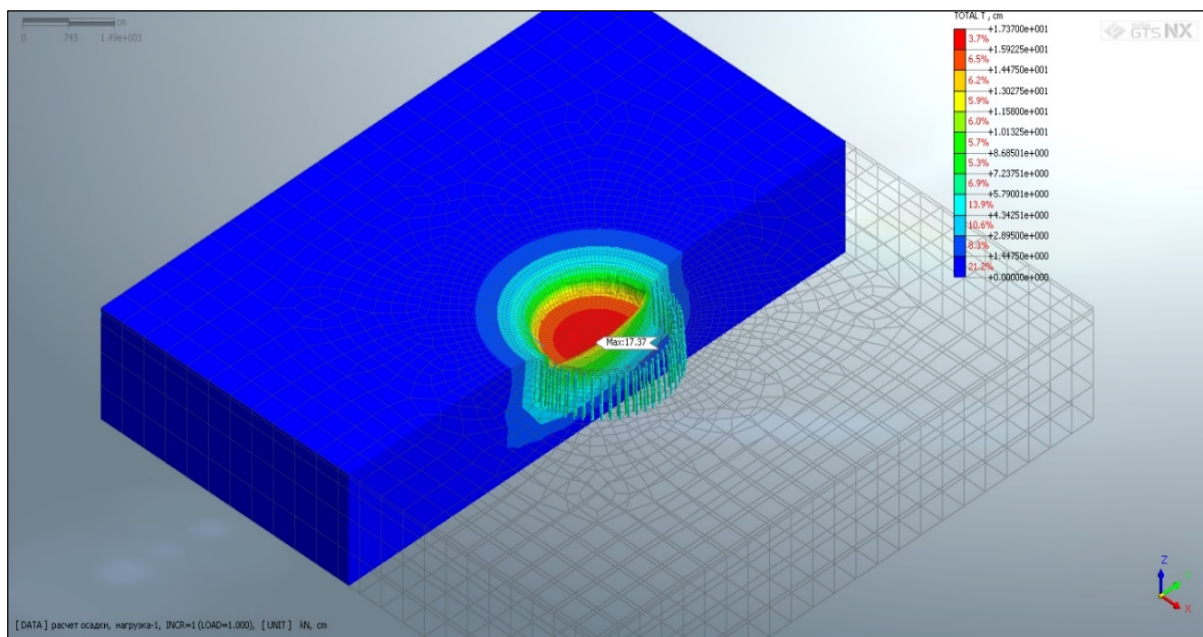


Рисунок 4.5 – Пространственная расчётная схема системы «фундамент сооружения – основание».

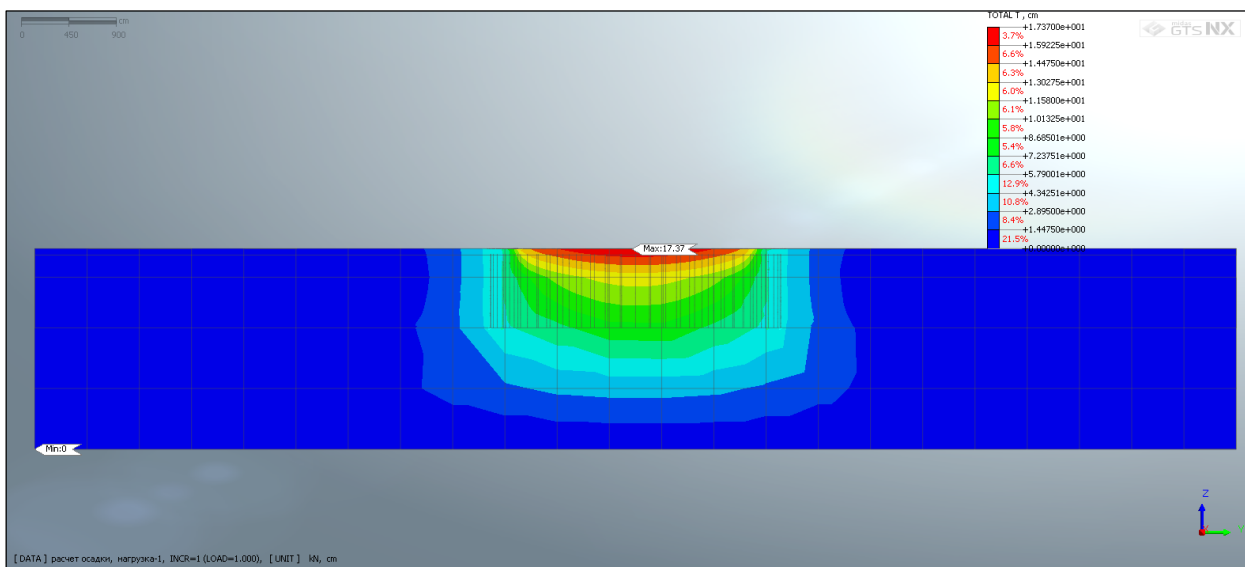


Рисунок 4.6 – Схема поперечного разреза системы «фундамент сооружения – основание». Полученные данные свидетельствуют о максимальных перемещениях (осадках) грунта в центральной части днища резервуара.

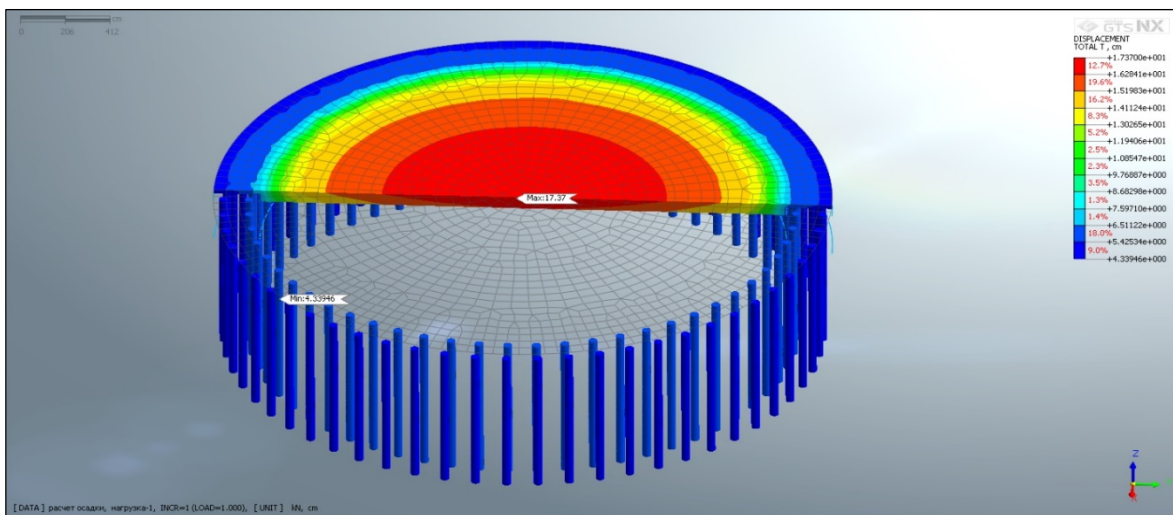


Рисунок 4.7 – Результаты расчёта осадок дна и фундамента кольца резервуара на первом этапе нагружения

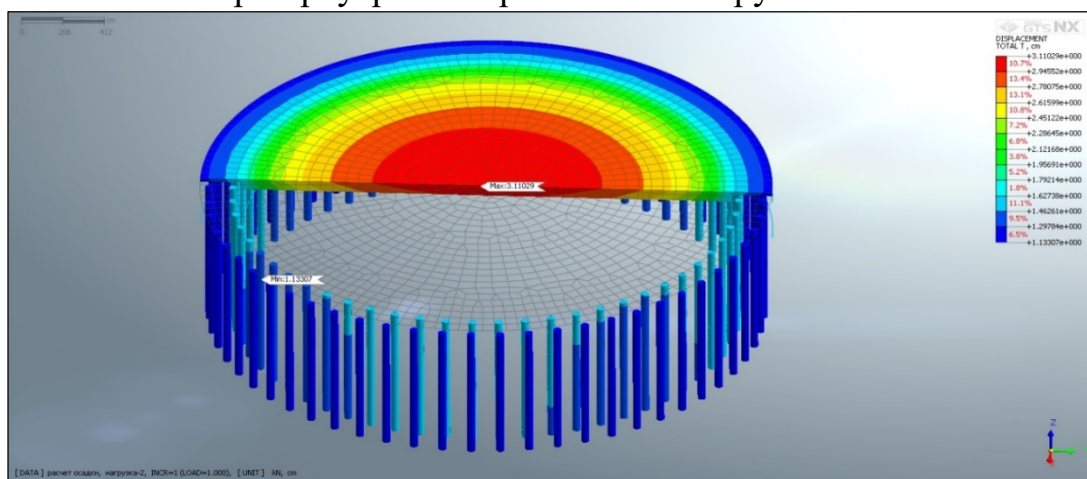


Рисунок 4.8 – Результаты расчёта осадок дна и фундамента кольца резервуара на втором этапе нагружения

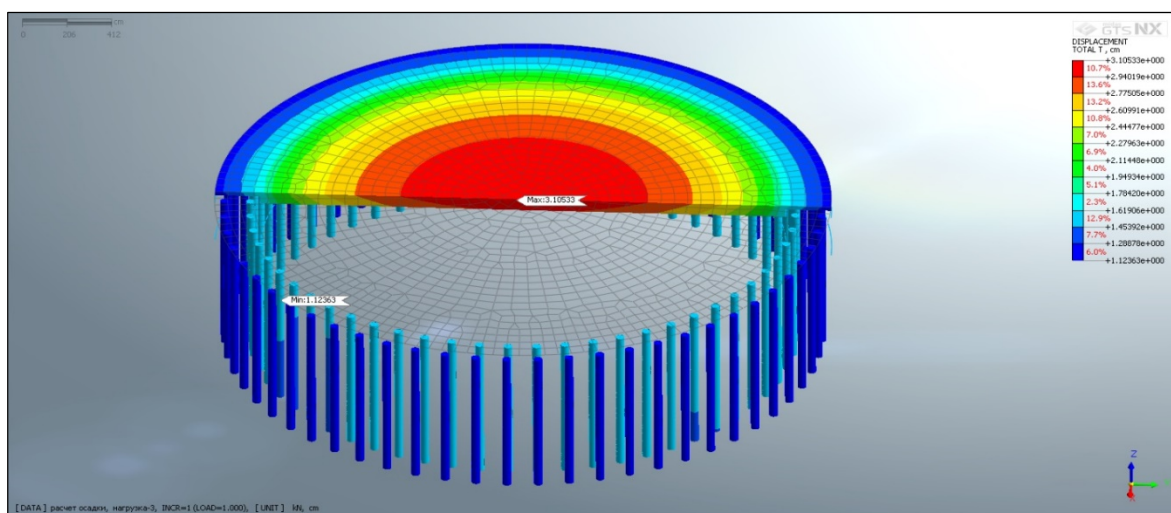


Рисунок 4.9 – Результаты расчёта осадок дна и фундамента кольца резервуара на третьем этапе нагружения

По результатам расчёта суммарное значение конечной осадки днища резервуара (три этапа нагружения) составило $S_d=23,6$ см, осадки фундамента кольца $S_k = 6,6$ см (табл. 4.3).

Таблица 4.3 –Результаты численного метода расчёта конечных осадок фундамента резервуара

№ п/п	Этап нагружения	Осадка днища, см	Осадка фундамента кольца, см
1	Первый этап	17,4	4,3
2	Второй этап	20,5	5,4
3	Третий этап	23,6	6,6

Таким образом, конечная осадка днища резервуара $S_d=23,6$ см, а также осадка фундамента кольца $S_k = 6,6$ см находятся в допустимых пределах по п. 4 [7, 11], где предельная осадка рассматриваемого резервуара составляет $S_u = 40$ см.

4.3. Данные геодезического мониторинга осадок фундамента резервуара емкостью 10000 м³ в г. Туапсе

Исходные данные для геодезического мониторинга. Геодезический мониторинг осадок фундамента резервуара емкостью 10 тыс. м³ для хранения нефтепродуктов проводился в 2015 - 2016 гг. Резервуар был выполнен стальным вертикальным емкостью 10 тыс. м³ по типовому проекту 704-1-170.84 «Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 10000 куб. м» [106, 109]. Сооружение расположено на территории парка резервуаров в г. Туапсе, на строительной площадке, расположенной вблизи левого берега реки Туапсе. Конструктивное решение фундамента резервуара состоит из монолитного железобетонного ростверка (с поперечным сечением 1600x400 мм) с двухрядным расположением буронабивных свай длиной 7 м, диаметром 400 мм. На участке внутреннего диаметра ростверка устроена промежуточная щебеночная подушка толщиной

40 см с коэффициентом уплотнения 0,95-0,96, которая является основанием для днища резервуара. Грунтовые условия рассматриваемой площадки приведены в параграфе 4.2. Размещение резервуара на территории нефтебазы в г. Туапсе приведено на рис. 4.10

Методика геодезических наблюдений. Для оценки осадок резервуара были установлены шестнадцать светоотражающих марок, которые устраивались в уровне верха ростверка на вертикальной стенке резервуара. Схема установки геодезических марок на вертикальной стенке резервуара и схема установки неподвижного репера приведена на рис. 4.11

Марки представляли собой картонные листы с нанесенной светоотражающей маркировкой (рис. 4.12). Марки закреплялись на стенке резервуара за счёт самоклеящейся поверхности. После установки марок были определены их координаты относительно реперной системы с применением тахеометра. Линейно-угловые измерения положения марок выполнялись электронным тахеометром марки Leica TS07 с применением визирных марок Leica (рис. 4.13).

Центрирование тахеометра и визирных марок осуществлялось оптическими центрирами с погрешностью не более 0,5 мм. Измерения вертикальных углов и длин линий выполнялись в прямом и обратном направлениях. Линейные измерения выполнялись встроенной светодальномерной частью электронного тахеометра Leica TS07. Каждая из длин сторон измерялась в прямом и обратном направлениях.

Мониторинг проводился по специальной программе, продолжительность которой составила один год. Основные контролируемые параметры – осадки резервуара, их неравномерность по секторам.



Рисунок 4.10 – Место размещения резервуара емкостью 10 тыс. м³ на территории нефтебазы в г. Туапсе

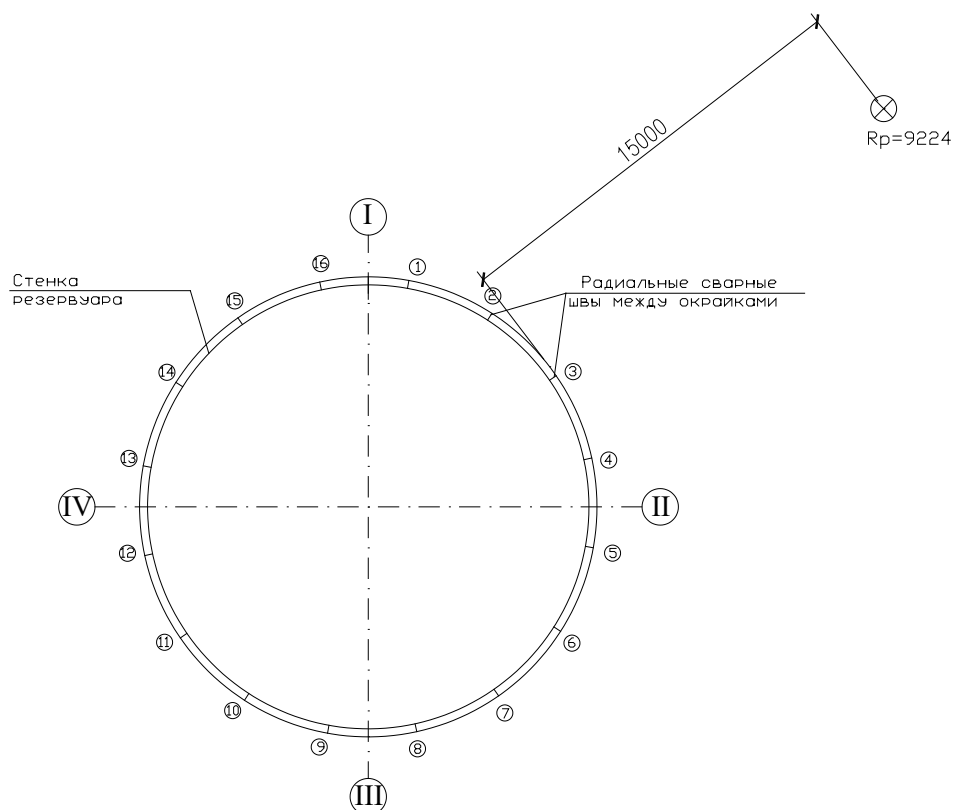


Рисунок 4.11 – Принципиальная схема установки геодезических марок и репера системы [110]



Рисунок 4.12 – Общий вид светоотражающей марки для контроля перемещений, устраиваемой на вертикальной стальной стенке резервуара



а)



б)

Рисунок 4.13 – Оборудование для геодезического мониторинга за перемещениями рассматриваемого резервуара:
а - электронный тахеометр Leica TS07 ; б - визирная марка Leica

Геодезический мониторинг резервуара проводился в три этапа:

1. Подготовительный этап. Этап проводился до начала работ по геодезическому мониторингу. В рамках данного этапа разрабатывалась программа работ, устанавливались реперы с закрепленными координатами. Производился сбор исходных данных – проектной и исполнительной документации, результатов расчётов и др.

2. Этап гидравлических испытаний. На рассматриваемом этапе проводилась геодезическая съемка марок в процессе заполнения резервуара жидкостью с подъемом ее уровня каждые 2,5 метра.

3. Этап эксплуатации. В процессе эксплуатации резервуара проводилась съемка его осадок каждые 2 месяца в течение одного года. В случае, если осадки резервуара стабилизировались раньше установленного времени наблюдений, то наблюдения за состоянием резервуара прекращались.

Результаты геодезического мониторинга. Результаты геодезического мониторинга светоотражающих марок на стенке резервуара приведены на рис. 4.14.

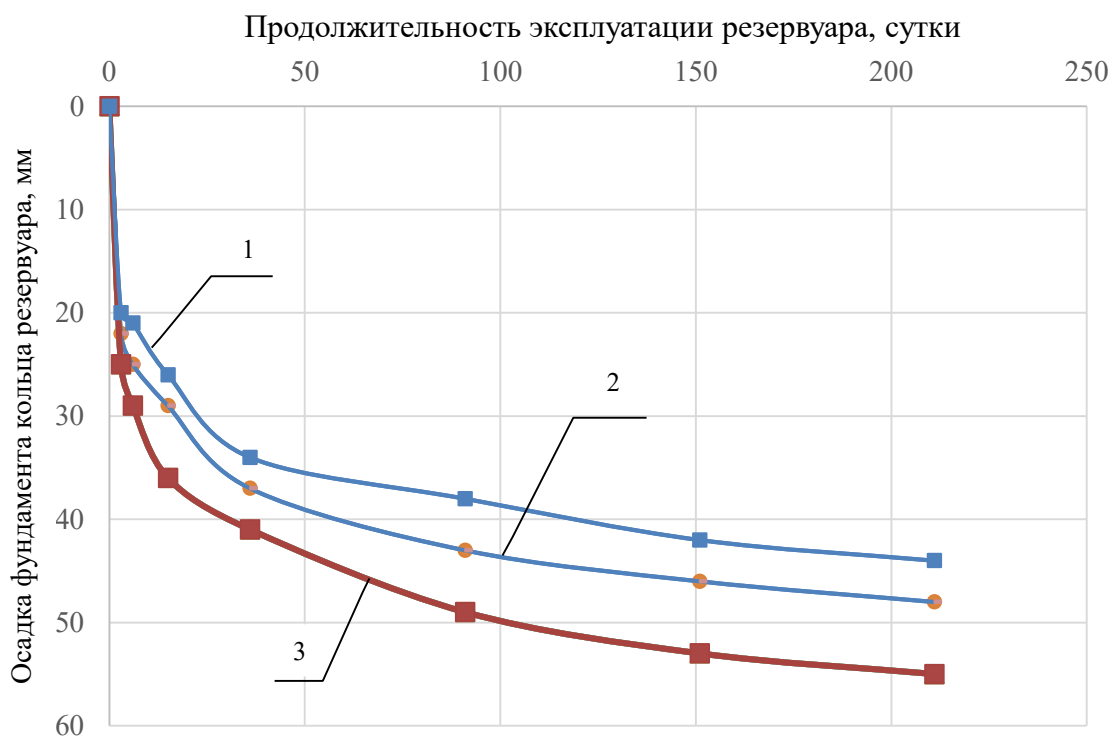


Рисунок 4.14 – Результаты геодезического мониторинга осадок фундамента кольца резервуара: 1, 2, 3 – соответственно графики осадки марок №4, №6, №11

Анализируя перемещения шестнадцати марок (на рис. 4.14 представлены графики осадки трех марок), следует отметить, что разность осадок между

минимальным и максимальным значением составила 1,1 см. На рисунке 4.14 приведены наиболее характерные значения полученных осадок (марки №4, №6 и №11). В результате геодезического мониторинга установлено, что осадка фундамента кольца резервуара S_k составила от 4,4 до 5,5 см, неравномерность осадки $\Delta S/L$ составила 0,0003. Осадки центральной части днища резервуара не устанавливались ввиду отсутствия технической возможности. После прекращения наблюдений следует отметить, что стабилизация грунтов основания спустя полгода практически завершилась и за два последних месяца наблюдений приращение осадки составляло 2-3 мм.

4.4. Сопоставление результатов инженерного и численного методов расчёта с данными геодезического мониторинга осадок фундамента резервуара, их анализ и обобщение

Результаты инженерного и численного методов расчёта, а также данные геодезического мониторинга осадок кольцевого свайного фундамента резервуара приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Сопоставление результатов расчёта с данными геодезических наблюдений

№ п/п	Определяемый параметр	Результаты инженерного метода расчёта, см	Результаты численного метода расчёта, см	Результаты геодезического мониторинга, см
1	Осадка днища резервуара на первом этапе нагружения, см	16,1	17,4	-
2	То же, на втором этапе нагружения, см	19,7	20,5	-
3	То же, на третьем этапе нагружения, см	23,2	23,6	-
4	Осадка фундамента кольца на первом этапе нагружения, см	4,3	4,3	-

5	То же, на втором этапе нагружения, см	5,2	5,4	-
6	То же, на третьем этапе нагружения, см	6,0	6,5	5,5

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что расхождение данных аналитического и численного расчётов осадок днища резервуара составило 2,7%; осадок фундамента кольца – 8,3%, при этом результаты расчёта осадок фундамента кольца (по инженерному и численному методам) вполне соответствуют данным геодезического мониторинга, погрешность составляет 12-14%, что вполне допустимо для рассматриваемого случая. Полученную погрешность расчёта и результатов геодезических измерений (мониторинга) перемещений фундамента можно объяснить недостаточной точностью определения характеристик сжимаемости грунта, а также промежутком времени геодезических наблюдений за перемещениями резервуара.

4.5. Направление дальнейших научных исследований

В настоящее время в процессе увеличения объемов добычи нефти, строительства перспективных направлений транспортировки нефтепродуктов возникают проблемы строительства парков резервуаров в стесненных условиях. Так, существующий парк резервуаров НК «Роснефть» в г. Туапсе расположен на искусственной щебеночной насыпи вблизи побережья Черного моря. Соответственно, многократно возрастает проблема освоения территории города под потребности нефтяного хозяйства. Основные тенденции, развивающиеся в области строительства резервуаров, направлены на сокращение расстояний между сооружениями, увеличением их высоты с уменьшением занимаемой площади. При этом следует отметить, что нормативными документами, действующими на территории РФ, не предусмотрено строительство резервуаров вместимостью более 120 тыс. м³ и

высотой налива нефти не более 16,5 м. Международными нормами в это же время допускается налив нефти до высоты 19,5 м с высотой сооружения 21,5 м [110], что позволяет уменьшить занимаемую площадь строительства резервуаров на 15%.

Не менее важным фактором, влияющим на технико-экономические параметры устройства парков резервуаров, является также расстояние между соседними сооружениями в парке. В настоящее время российскими нормами предусмотрены лишь расстояния между сооружениями, исходя из правил пожарной безопасности [111]. В данном случае расстояния между резервуарами принимаются равными половине их диаметра, но не более 30 м. В международных регламентирующих нормативных документах расстояния между двумя соседними резервуарами с понтонной крышей принимаются 10 м при диаметре резервуара до 45 м и 15 м при диаметре резервуара свыше 45 м. В настоящее время отсутствует привязка данных расстояний к грунтовым условиям строительства, в результате чего в отдельных случаях возникают крены резервуаров из-за взаимного влияния фундаментов [110].

В результате анализа были сформированы следующие направления дальнейших научных исследований:

1. Разработка эффективных конструкций фундаментов стальных резервуаров с высотой более 18 м. Сотрудниками ФГБОУ ВО Кубанского ГАУ были предложены и запатентованы два конструктивных решения надземной части резервуаров с составной вертикальной стенкой, позволяющие их выполнять высотой 25 м и более [113-114]. Разработка фундаментов под такие резервуары позволит существенно уменьшить площадь под строительство парков резервуаров.

2. Исследование взаимного влияния близко расположенных крупных резервуаров в различных грунтовых условиях строительства. Решение этих вопросов позволит регламентировать расстояние между фундаментами крупных резервуаров на глинистых и других дисперсных грунтах.

3. Совершенствование систем геотехнического мониторинга крупных резервуаров в период их строительства и эксплуатации.

4.6. Выводы по разделу 4

1. Разработанный инженерный метод и рекомендации по расчёту конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров использованы при их проектировании в грунтовых условиях г. Туапсе. Полученные результаты показывают, что осадки кольцевого свайного фундамента (днища и фундамента кольца) на первом этапе нагружения составляет 74% от конечных значений. Суммарная осадка фундамента резервуара на втором и третьем этапах его нагружения составляет 20-22% от конечной.

2. В результате сопоставления инженерного и численного методов расчёта с данными геодезического мониторинга осадок кольцевого свайного фундамента резервуара установлено, что расхождение данных по осадке днища составило 2,7%; фундамента кольца – 8,3%. Следует отметить, что результаты расчёта осадок фундамента кольца (по инженерному и численному методам) вполне соответствуют данным геодезического мониторинга, погрешность составляет 12-14%.

3. Определены направления дальнейших научных исследований, которые позволят уменьшить площадь, занимаемую парками резервуаров, а также повысить надёжность их строительства и эксплуатации.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что существующие методы расчёта конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах не учитывают влияние на их работу этапов разгрузки и последующих повторных нагружений основания, поэтому в практике эксплуатации фундаментов резервуаров наблюдаются несоответствие расчётных и фактических значений осадок.

2. При анализе результатов испытаний 16-ти натурных буронабивных свай статической вдавливающей нагрузкой на площадках строительства резервуаров установлено влияние их разгрузки и последующих повторных нагружений на сжимаемость глинистых грунтов в основании. Экспериментально выявлено увеличение модуля общей деформации глинистых грунтов в уровне нижних концов буронабивных свай после третьего этапа их нагружения на 17-18%.

3. По результатам испытаний моделей буронабивных свай в глинистых грунтах установлено, что основное приращение осадок свайных фундаментов происходит на втором и третьем этапах повторных нагружений и составляет в среднем 20-22% от конечной осадки на первом этапе их нагружения. На четвертом и последующих этапах нагружения моделей свай приращение осадок свайных фундаментов является незначительным и не превышает 3-5% от осадки на первом этапе нагружения. Эти данные являются основой для разработки метода конечных расчёта осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров.

4. На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований разработан инженерный метод расчёта конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров из буронабивных свай в глинистых грунтах, учитывающий их разгрузку и последующие повторные нагружения. Метод предусматривает отдельный расчёт осадок центральной

части резервуара (осадка днища) и железобетонного кольцевого ростверка с одно- двух- или трехрядным расположением свай (осадка фундамента кольца).

5. Результаты исследований были внедрены при проектировании кольцевого свайного фундамента стального резервуара емкостью 10000 м³ для хранения нефти на территории перегрузочного комплекса НК «Роснефть» в г.Туапсе. Достоверность инженерного метода подтверждается сопоставлением расчётных данных по предлагаемому методу, результатами численного метода расчёта и результатами геодезических наблюдений за осадками фундамента резервуара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фучуань Л. Российская нефть для китайской экономики / Л. Фучуань // Обозреватель-Observer. – 2004. – №11 (178). – С. 28-34.
2. Денисова А.В. Топ-10 Нефтепроводов России / А.В. Денисова // Топнефтегаз [электронный ресурс]. – №5. – 2011. – С.27-28
3. Основания и фундаменты резервуаров/ Ю.К. Иванов, П.А. Коновалов, Р.А. Мангушев, С.Н. Сотников; Под ред. П.А. Коновалова. - М.: Стройиздат, 1989. –223 с.
4. Коновалов П.А. и др. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований / Научное издание: М: Издательство АСВ, 2009. - 336 с.
5. Рекомендации по проектированию оснований резервуаров с ограничением боковых перемещений грунтов / Научно-практическое пособие. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 1985. – 25 с.
6. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов: (Напряженно-деформативные и прочностные характеристики). – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.
7. Терцаги К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств. – М.: Госстройиздат, 1933. – 392 с.
8. Мангушев Р.А. Механика грунтов: учебник / Р.А. Мангушев, В.Д. Карлов, И.И. Сахаров. – М.: изд-во АСВ, 2011. – 264 с.
9. Шадунц К.Ш. Испытания буронабивных свай фундаментов крупных резервуаров / К.Ш. Шадунц, О.Ю. Ещенко, В.В. Угринов // Труды КубГАУ. – 2003. - №3. - С. 37-41
10. ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. – М.: Стандартиформ, 2016. – 98 с.
11. РД 153-39.4-078-01. Правила технической эксплуатации резервуаров магистральных нефтепроводов и нефтебаз. – М.: Минэнерго РФ, 2001. – 46 с.

12. Мангушев Р.А. Устройство оснований и фундаментов под стальные резервуары емкостью 50 тыс. м³ с плавающей крышей / Р.А. Мангушев, Е.В. Городнова // Сб. тр. 59-й научной конференции СПбГАСУ. – СПб, 2002. – Ч.1. – С. 36-38.
13. Чеботарев Г.П. Механика грунтов, основания и земляные сооружения / Г.П. Чеботарев. – М.: Стройиздат, 1968. – 616 с.
14. Егоров К.Е. Расчёт оснований под круглой фундаментной плитой конечной жесткости / К.Е. Егоров, О.П. Коновалова. – В кн.: Труды к VII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. М.: Стройиздат, 1969. – С. 93-95.
15. Россихи, Ю.В., Битайнис А.Г. Осадки строящихся сооружений/ Под ред. А. М. Скудры. – Рига: Зинатне, 1980. – 339 с.
16. Седин В.Л. О влиянии повторных нагружений набивных свай в пробитых скважинах на деформативность их оснований / В.Л. Седин, Ю.Л. Винников, Е.М. Бикус // Вестник ПНИПУ. – 2014. - №3. – с 112-120.
17. Брандль Х. Предварительное нагружение свай для уменьшения неравномерных деформаций зданий. – Санкт-Петербург: Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2005. - №9. – с 118-131.
18. Гуменский Б. М. Основы физикохимии глинистых грунтов и их использование в строительстве / Б. М. Гуменский. – Л., М.: С. И., 1965
19. Швечиков Ю.В. Результаты повторных испытаний забивных железобетонных свай статической нагрузкой в условиях Санкт-Петербурга / Ю.В. Швечиков, Г.В. Левинтов // Реконструкция городов и геотехническое строительство, №9, 2005, С. 246-250.
20. Zhu B., Ren Y., Chen R.-P., Wang Z. Y. (2009). Model test on bearing capacity and accumulated settlement of single pile subjected to axial cyclic loading. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. №32. pp. 186-193
21. H. G. Poulos. (1988) Cyclic Stability Diagram for Axially Loaded Piles Journal of Geotechnical Engineering №114 (8). pp. 186-193

22. Chan S.-F., Hanna T. H. (1980) Repeated Loading on Single Piles in Sand, Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 106 (2), pp. 171 – 188
24. Wang G. Kasali G. Sitar N. (2011) Static and Dynamic Axial Response of Drilled Piers. I: Field Tests, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(12), pp.1133-1142. DOI 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000547
25. Новожилов Г.Ф. Проектирование и возведение фундаментов транспортных зданий и сооружений из свай и оболочек в сложных грунтовых условиях / Г.Ф. Новожилов, Б.В. Бахолдин // НТО ж/д транспорта. Л., 1974.
26. Парамонов В.Н. Изменение несущей способности забивных свай во времени на открытых площадках и нагруженных конструкциями / В.Н. Парамонов, Т.А. Дунаевская // Реконструкция городов и геотехническое строительство, №8, 2004, С. 101-106.
27. Парамонов В.Н., Тихомирова Л.К. Изменение несущей способности забивных свай во времени / В.Н. Парамонов, Л.К. Тихомирова // Реконструкция городов и геотехническое строительство. №1 // СПб: Геореконструкция, 2000 с. 127–131.
28. ГОСТ 5686-2020. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. – М.: Стандартиформ, 2020. – 51 с.
29. СП 24.13330.2016. Свайные фундаменты. – М.: Стандартиформ, 2016. – 90 с.
30. Приклонский В.В. Отвечает ли ГОСТ 5686-2012 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» потребностям текущего момента? / В.В. Приклонский, В.В. Пузанов // Инженерные изыскания №10-11/2015 С. 18-22
31. Горевой М.М. Методы определения деформационных характеристик крупнообломочных грунтов / М.М. Горевой, В.В. Левенстамм // Строительство и техногенная безопасность. - №11. – 2005. – С. 92-94.
32. Гольдфельд И. З. Графоаналитическая обработка результатов статических испытаний грунтов забивными сваями и зондированием/И. З. Гольдфельд, Е. А. Смирнова // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2011. - №5. – С.

35-40.

33. Гольдфельд И.З. Практика расширенного анализа результатов полевых испытаний грунтов сваями и зондированием / И.З. Гольдфельд // Международный журнал «Геотехника». – 2013. - №3. – С. 48-66.

34. Городнова Е.В. Оценка осадок кольцевых свайных фундаментов на неоднородном основании. – автореф. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Спб.: СПбГАСУ, 2005. – 20 с.

35. ASTM D1143. Standard test methods for piles under static axial compressive load. ASTM, 2007.

36. Галеев В. Б. Напряженно-деформированное состояние резервуаров, построенных на слабых переувлажненных грунтах: 05.15.13: дисс. ... док. техн. наук / В. Б. Галеев; ТИИ. – Тюмень, 1987. – 668 с.

37. Егоров Е. А. Особенности работы и инженерный расчет вертикальных цилиндрических резервуаров / Е. А. Егоров. – Текст: непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 1977. - № 12. – С. 48-59.

38. Землянский А. А. Принципы конструирования и экспериментально-теоретические исследования крупногабаритных резервуаров: 05.23.01, 05.23.02: дисс. ... док. техн. наук / А. А. Землянский; СГТУ. – Балаково, 2006. – 416 с

39. Сафарян М. К. Металлические резервуары и газгольдеры / М. К. Сафарян. – Москва: Недра, 1987. – 200 с. – Текст: непосредственный.

40. Сотников С. Н. Проектирование и строительство резервуаров на слабых грунтах / С. Н. Сотников, Р. А. Мангушев. – Москва: ВНИИОЭНГ. – 51 с.

41. Тарасенко А. А. Разработка научных основ методов ремонта вертикальных стальных резервуаров: 05.15.13: дисс. ... док. техн. наук / А. А. Тарасенко; ТюмГНГУ. – Тюмень, 1999. – 299 с

42. Землянский А.А. Новые принципы конструирования резервуаров повышенной эксплуатационной надежности / А.А. Землянский // Наука и технологии. – Миасс, 2003. – С. 102-119.

43. Ещенко О.Ю. Особенности инженерно-геологических изысканий для строительства и реконструкции стальных резервуаров, предназначенных для хранения нефти и нефтепродуктов / О.Ю. Ещенко // Инженерные изыскания. - №9. – 2011. – с. 62-67.
44. Любушкин В. В. Исследование осадки основания и напряженного состояния днища стального вертикального резервуара: 05.15.0 : дисс. ... канд. техн. наук / В. В. Любушкин; УГНТУ. – Уфа, 1979. – 229 с.
45. Мариничев М.Б. Особенности расчета деформаций оснований свайно-плитных фундаментов с применением забивных свай / М.Б. Мариничев, А.Ю. Маршалка, Р.О. Выходцев // тр. Международной конф. «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении. – Новочеркасск: ЮРГПУ им. М.И. Платова, 2012. – 10 с.
46. Nevzorov A., Nikitin A., Korshunov A., Veshnyakov V. Estimation of bearing capacity of piles while reconstructing buildings/ Testing and design methods for deep foundations. Proceedings of 9th International conference. Kanazava, Japan, 18-20 September, 2012. p.847-852.
47. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов. – Москва: Стройиздат, 1973. - 134с.
48. Егоров, Е. А. Особенности работы и инженерный расчет вертикальных цилиндрических резервуаров / Е. А. Егоров // Нефтяное хозяйство. - 1977. - № 12. - С. 48-59.
49. Коновалов П. А. Предельные значения средних и неравномерных осадок металлических резервуаров / П. А. Коновалов, Ю. К. Иванов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1985. – № 5. – С. 27.
50. Нуждин Л.В. Численное моделирование свайных фундаментов в расчетно-аналитическом комплексе SCAD Office / Л.В. Нуждин, В.С. Михайлов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. - №1. – 2018. – с. 5-16.
51. Мангушев Р.А. Сваи и свайные фундаменты / Р.А. Мангушев, А.Л. Готман, В.В. Знаменский, А.Б. Пономарев. – М.: Изд-во АСВ, 2015. – 320 с.

52. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под. ред. Р.А. Мангушева и В.А. Ильичева. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 1040 с.
53. Полищук А.И. Развитие метода расчета осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров / А.И. Полищук, О.А. Шмидт // Основания, фундаменты и механика грунтов. –2021. – № 5. – с. 2-7.
54. Пронозин Я. А. Регулирование напряженно-деформированного состояния основания комбинированных ленточно-свайных фундаментов [Текст] / Я. А. Пронозин, М. А. Степанов, Д. В. Волосюк // Основания, фундаменты, механика грунтов. - 2016. - № 3. - С. 16-20.
55. Пронозин Я.А. Определение несущей способности свай типа «Атлант» / Я.А. Пронозин, И.С. Сальный, Е.П. Брагарь // В сборнике: нефть и газ: технологии и инновации. материалы национальной научно-практической конференции. – Тюмень: ТИУ, 2019. с. – 135-138.
56. ГОСТ 19912-2012. Грунты. Методы полевых испытаний динамическим и статическим зондированием. – М.: НИЦ «Строительство, 2012. – 27 с.
57. Невзоров А.Л. Оценка несущей способности забивных свай в фундаментах реконструируемых зданий / А.Л. Невзоров, Ю.В. Саенко // Геотехника. – 2016. - №4. – С. 50-57.
58. Nevzorov, A. Evaluation of pile bearing capacity in the foundation of existing buildings / A Nevzorov, Y Saenko // Proceedings of the 19th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – Seoul, 2017. – P. 2845-2848.
59. Глазачев А.О. Исследование взаимодействия вертикально нагруженных буронабивных свай с основанием и их расчет с использованием статического зондирования: 05.23.02: дисс. ... канд. техн. наук / А.О. Глазачев; ПНИПУ. – Пермь, 2014. – 187 с.
60. Пономарев А.Б. Свайные фундаменты в России. Современное состояние и дальнейшие тенденции исследований / А.Б. Пономарев // Тезисы Международной научно-технической конференции по геотехнике: «Современные теоретические и практические вопросы геотехники: новые

материалы, конструкции, технологии и методики расчетов». – Спб.: СпбГАСУ, 2021. – 64 с.

61. Нуждин Л.В. Методы численного моделирования системы "Свайный фундамент - грунтовое основание" в условиях сейсмических воздействий / Л.В. Нуждин, М.Л. Нуждин, В.С. Михайлов // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2019. – [№5 \(42\)](#) . – С. 28–34.

62. Nuzhdin, L.V. Models and calculation methods of the pile foundation in SCAD Office / L.V. Nuzhdin, M.V. Mikhaylov // Geotechnical Hazards and Risks: Proc. of the XVI DECGE. European conf. on Geotechnical Engineering. V.2, Issue 2-3. – Ernst & Sohn, ce/papers, 2, 2018. – P.487–492.

63. Шулятьев О.А. Натурные измерения распределения нагрузок между сваями в фундаменте / О.А. Шулятьев, А.И. Харичкин // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2009. – [№ 6](#). – С. 17-22.

64. Шулятьев О.А. Особенности взаимодействия свай между собой и с грунтом в составе групп / А.И. Харичкин а.и., О.А. Шулятьев, С.В. Курилло, В.Г. Федоровский // В сборнике: вопросы проектирования и устройства надземных и подземных конструкций зданий и сооружений. межвузовский тематический сборник трудов: Санкт-петербург, 2018. – С. 56-67.

65. Ещенко О.Ю. Особенности строительства резервуаров на укрепленных склонах / О.Ю. Ещенко, И.В. Болгов // Строительство и архитектура, 2016. - Т.4. - [№1\(10\)](#). – С:10-13

66. Отчёт о инженерно-изыскательской работе «Испытания грунтов вертикальной статической нагрузкой на буроинъекционные сваи диаметром 630 мм на объекте: Многоэтажный жилой комплекс с торгово-офисно-деловым центром в г. Сочи по ул. Горького 87». – Сочи: ООО «Гидротехника», 2011. – 31 с. (Руководитель работ Белов С.В., ответственный исполнитель Сальников В.Г.).

67. Отчёт о полевых испытаниях грунтов вертикальной статической нагрузкой на забивные сваи на объекте: «Жилой комплекс "Европейский" по ул. Кожевенной в г. Краснодаре». – Сочи: ОАО ЦНИИС «Научно-исследовательский центр «Морские берега», 2007. – 17 с. (Руководитель работ Шахин В.М., ответственный исполнитель Тлявин Р.М.).
68. Программа испытания грунтов вертикальной статической нагрузкой на буроинъекционные сваи диаметром 400мм на объекте: «Гостиничный комплекс на углу улиц Красная - Длинная в г. Краснодаре». – Краснодар: ФГБОУ ВО КубГАУ, 2008. – 7с. (Руководитель работ Шадунк К.Ш., ответственный исполнитель Мариничев М.Б.).
69. Отчёт о инженерно-изыскательской работе по теме: «Испытание грунтов вертикальной статической нагрузкой на буроинъекционные сваи диаметром 630мм на объекте: «Жилой квартал г. Сочи по ул. Гастелло, 27». 2-й этап. Жилой дом №4». – Сочи: ООО «Гидротехника, 2012. – 20 с. (Руководитель работ Белов С.В., ответственный исполнитель Сальников В.Г.).
70. Технический отчёт о статических испытаниях буроинъекционных свай на объекте: «Многоквартирные жилые дома для размещения временного персонала, волонтеров и сил безопасности, привлекаемых на период проведения XXII зимних олимпийских игр и XI паралимпийских зимних игр 2014 г в г. Сочи (проектные и изыскательские работы, строительство)» площадка N2. Жилой квартал в селе Веселое Адлерского района города Сочи по ул. Таврическая – Акаций» [Текст]. – Сочи: ООО «Гидротехника», 2012 г. – 29 с. (Руководитель работ Белов С.В., ответственный исполнитель Сальников В.Г.).
71. Полищук А.И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструированных зданий [Текст] / А.И. Полищук. – 3-е изд., доп. – Нортхэмптон: STT; Томс : STT, 2007. – 476 с.
72. Россихин Ю.В. Осадки строящихся сооружений [Текст] / Ю.В. Россихин, А.Г. Битайнис: под ред. А.М. Скудры. – Рига: Рига Зинатне, 1980. – 339 с.

73. Пономарев А.Б. Несущая способность забивных свай в слабых водонасыщенных грунтах с учетом фактора времени / А.Б. Пономарев, М.А. Безгодов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – №1. – 2014. – 9 с.
74. Голли О.Р. Определение характеристик деформируемости грунтов оснований для прогноза осадок при строительстве и реконструкции зданий / О.Р. Голли // Реконструкция городов и геотехническое строительство. - №7. – 2003. – С. 225-232.
75. Лапшин Ф. К. Расчет свай по предельным расстояниям / Ф.К. Лапшин. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 152с.
76. Корякин В.С. О роли пяты в общем сопротивлении буронабивных свай / В.С. Корякин // Сб. Основания, фундаменты и механика грунтов. Материалы III Всесоюзного совещания., Будивельник, 1971, С. 312-315.
77. NeSmith, W. and Siegel, T. (2009) Shortcomings of the Davisson Offset Limit Applied to Axial Compressive Load Tests on Cast-in-Place Piles. Hawthorne: Contemporary Topics in Deep Foundations: pp. 568-574. doi: 10.1061/41021(335)71.
78. Pailkowsky, S.G., and Tolosko, T.A., 1999. Extrapolation of Pile Capacity From Non-Failed Load Tests. – U.S. Department of Transportation, 157 p.
79. Chin, F.K., 1971. Estimation of the Ultimate Load Not Carried to Failure. – Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference of Soil Engineering, pp. 81-90.
80. Chin, F.K., and Vail, A.J., 1973. Behavior of Piles in Alluvium. – Proceedings of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 47-52.
81. Brinch-Hansen, J., 1963. “Hyperbolic Stress-strain Response: Cohesive Soils” Discussion, American Society of Civil Engineers Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 89, No. SM4, pp. 241-242.
82. Moore, D. and McCabe G., Introduction to the Practice of Statistics, 3th Edition. Freeman, 1998.

83. Глазачев А.О. Экспериментальные исследования вертикально нагруженных маломасштабных буронабивных свай / А.О. Глазачев // Вестник МГСУ. - №4. – 2014. – С. 70-78.
84. СП 43.13330.2012 Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85. – М.: Минрегион России, 2013. – 97 с.
85. Герасименко А.А. Прогнозирование остаточного ресурса стальных вертикальных резервуаров по параметрам циклической трещиностойкости в условиях двухосного нагружения. – дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Спб.: ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой институт «Горный». – 160 с.
86. Ляшенко П.А., Обухов И.М. Анализ результатов статических испытаний буронабивных свай, выполненных в различных грунтовых условиях Краснодарского края / П.А. Ляшенко, И.М. Обухов // Тр. Кубанского государственного аграрного университета. - № 6(21). – 2009. – С. 153-156.
87. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Совершенствование метода компрессионных испытаний грунтов постоянно возрастающей нагрузкой: монография / В.В. Денисенко, П.А. Ляшенко. – Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2017. – 173 с.
88. Ляшенко П.А., Исследование на модели развития осадки буронабивной сваи [Электронный ресурс] У. – №90(06). – 2013. – 20 с.
89. Ляшенко П.А. Исследование развития осадки буронабивной сваи в глинистых грунтах при повторном приложении статической нагрузки [Электронный ресурс]/ П.А. Ляшенко, Д.В. Гохаев, О.А. Шмидт // Электронный журнал КубГАУ. – №120 (06). – 2016. – 20 с. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/104.pdf> (дата обращения: 10.08.2016).
90. Далматов Б.И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б.И. Далматов, Ф.К. Лапшин, Ю.В. Россихин. – Л.: Стройиздат, 1975. – 240 с.

91. Удинцова Н.М. Эконометрика / Н.М. Удинцова, Н.А. Коптева. – зерноград: ФГБОУ ВО «Донской ГАУ», 2017. – 93 с.
92. Мирсаяпов И.Т. Расчётная модель осадки основания фундаментов при статичко-циклическом нагружении / И.Т. Мирсаяпов, И.В. Королева, Д.Д. Сабирзянов // Известия Казанского архитектурно-строительного университета. - №1 (35). – 2016. – С. 102-110.
93. Справочник геотехника: основания, фундаменты и подземные сооружения, изд. 2-е, доп. и перераб. /под общ. ред. В. А. Ильичева и Р. А. Мангушева. Глава 6. Конструирование и армирование свайных фундаментов / А. Л. Готман, В. В. Знаменский, А. Б. Пономарев, Н. З. Готман. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – С. 227-339.
94. Инъекционная свая / Полищук А.И., Тарасов А.А., Шалгинов Р.В. Патент на полезную модель №87718. Россия, Е 02D 5/34 (2006.01). Зарегистр. 20.10.2009. Бюл. №29.
95. Чепур П.В., Влияние параметров неравномерной осадки на возникновение предельных состояний в резервуаре/П. В. Чепур, А. А. Тарасенко // Фундаментальные исследования. - 2014. № 8-7. С. 1560-1564.
96. Кондрашова О. Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров [электронный ресурс] / О. Г. Кондрашова, М. Н. Назарова // Нефтегазовое дело. – 2004. – №2. – 8с.
97. Мангушев Р.А. О расчете осадки кольцевых свайных фундаментов большеобъемных резервуаров с плавающей крышей / Р.А. Мангушев, Е.В. Городнова // Геотехнические проблемы строительства крупномасштабных и уникальных объектов: Тр. международной геотехнической конференции, Алматы, 2004. – С.: 542-546.
98. Мангушев Р.А. Исследование деформаций оснований стальных вертикальных цилиндрических резервуаров (в условиях слабых грунтов): / Р.А. Мангушев. – дисс. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛИСИ, 1980. – 240 с.

99. Бартоломей А. А. Расчёт осадок однорядных и многорядных свайных фундаментов / А. А. Бартоломей. – Пермь: Ротапринт Пермского политехнического института, 1970. – 126 с.
100. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. – 437 с.
101. ГОСТ 20276. 1-2020. Грунты. Метод испытания штампом. – М.: Стандартиформ, 2020. – 14 с.
102. Егоров К.Е. К расчёту деформаций оснований (Сборник статей) / К.Е. Егоров. – М.: ВНИИТПИ, 2002. – 400 с.
103. Болдырев Г.Г. Испытания грунтов винтовым штампом / Г.Г. Болдырев [и др.] // Инженерно-геологические изыскания. - №9. – 2016. – С. 12-24.
104. ГОСТ Р 58623-2019. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные. Правила технической эксплуатации. – М.: ООО «НИИ Транснефть», 2019. – 79с.
105. Шмидт О. А. Выбор критерия исчерпания несущей способности сваи при статических испытаниях плавно возрастающей нагрузкой / О.А. Шмидт // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – Т. 3, №3. – 2017. – С. 97 – 102.
106. Ещенко О. Ю. Анализ взаимного влияния резервуаров на слабых грунтах / О. Ю. Ещенко, Н.А. Кликун, И.В. Болгов // В сб. «Научное обеспечение АПК». – Краснодар: изд-во КубГАУ, 2012. – с. 396-398.
107. Парамонов, В.Н. Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геотехники. - СПб: Геореконструкция, 2012 - 262 с.
108. Code for practice for oil storage installations. – Hong Kong: Building Authority, 1992. – 22 p.
109. СП 155.13130.2014 Свод правил склады нефти и нефтепродуктов требования пожарной безопасности. – М.: Стандартиформ, 2014. – 84 с.

110. Восстановление проектного положения днища резервуаров РВС-10, РВС-11 на базе ОАО НК "Роснефть-Тупсенефтепродукт". Краснодар, НТЦ "ГеоПроект", 2013.
111. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – М.: Минстрой России, 2016. – 228 с.
112. ASTM D 1143–81. Standart Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load. – Philodelphia: American Society for Testung and Materials, 1994. – 11 p.
113. Патент РФ на полезную модель №179914. Резервуар для нефтепродуктов / Серга Г.В., Шмидт О.А. // МПК E04H 7/06 (2006.01); заявитель – ФБГОУ ВПО Кубанский государственный аграрный университет - №2017128651; Заявл. 16.09.2016; опубл. 29.05.2018, Бюл. №16 – 8с.
114. Патент РФ на полезную модель №179279. Резервуар для нефти и нефтепродуктов / Серга Г.В., Шмидт О.А. // МПК E04H 7/02 (2018.02); заявитель – ФБГОУ ВПО Кубанский государственный аграрный университет - №2017128654; Заявл. 16.09.2016; опубл. 07.05.2018, Бюл. №13
115. Midas GTS NX. On-Line Manual. – Seoul: MIDAS Information Technology Co., Ltd., 2020. – 217 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

к диссертационной работе Шмидта О.А.

Приложение А

Графики зависимости осадок натуральных буронабивных свай от внешней нагрузки по результатам их статических испытаний с разгрузкой и последующими повторными нагружениями

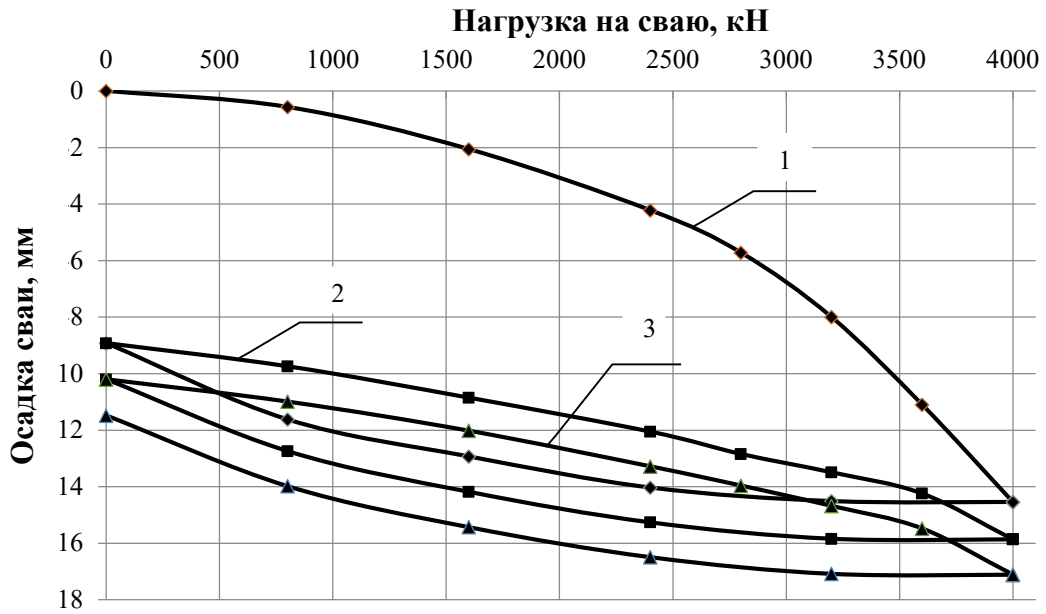


Рисунок 1 – Результаты статических испытаний сваи №1 на строительной площадке по ул. Таврической в г. Сочи: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

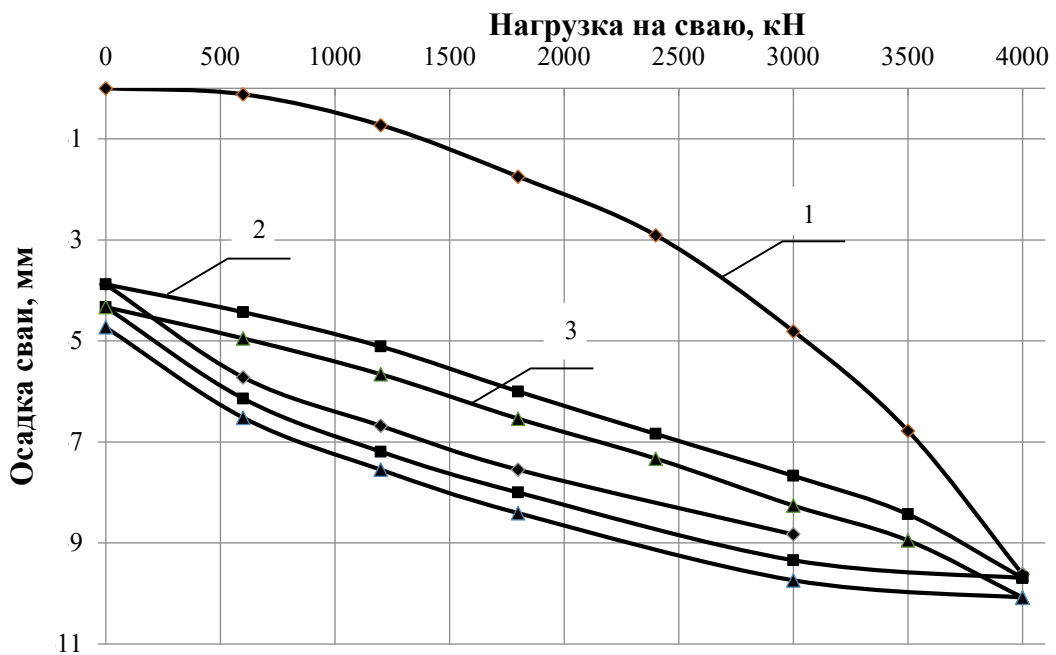


Рисунок 2 – Результаты статических испытаний сваи №2 на строительной площадке по ул. Таврической в г. Сочи: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

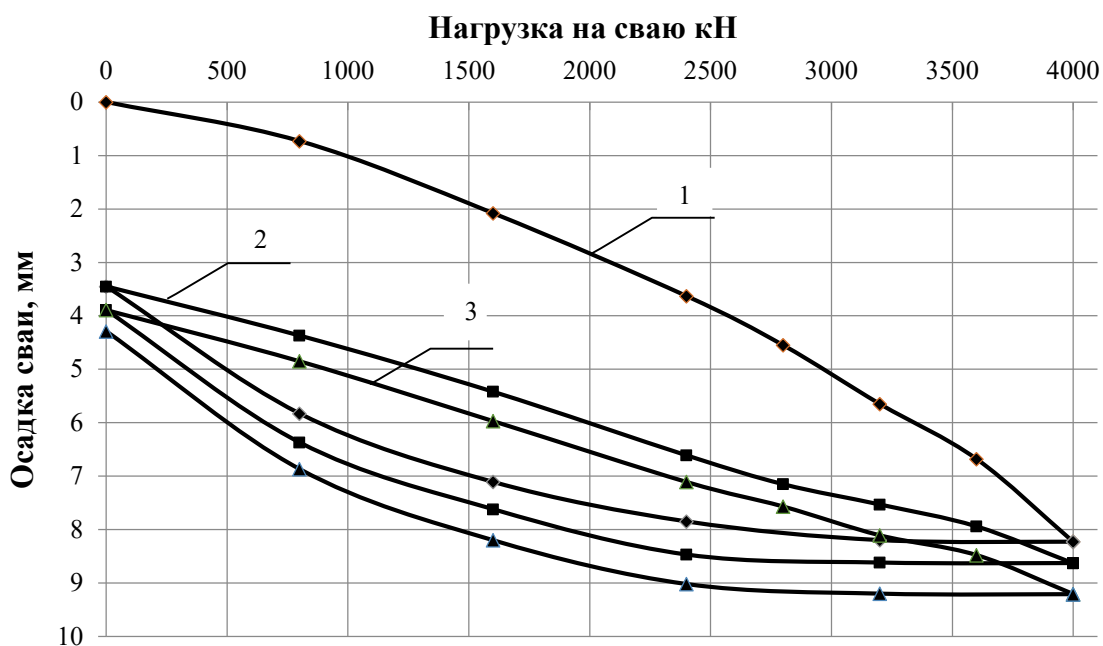


Рисунок 3 – Результаты статических испытаний сваи №3 на строительной площадке по ул. Таврической в г. Сочи: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

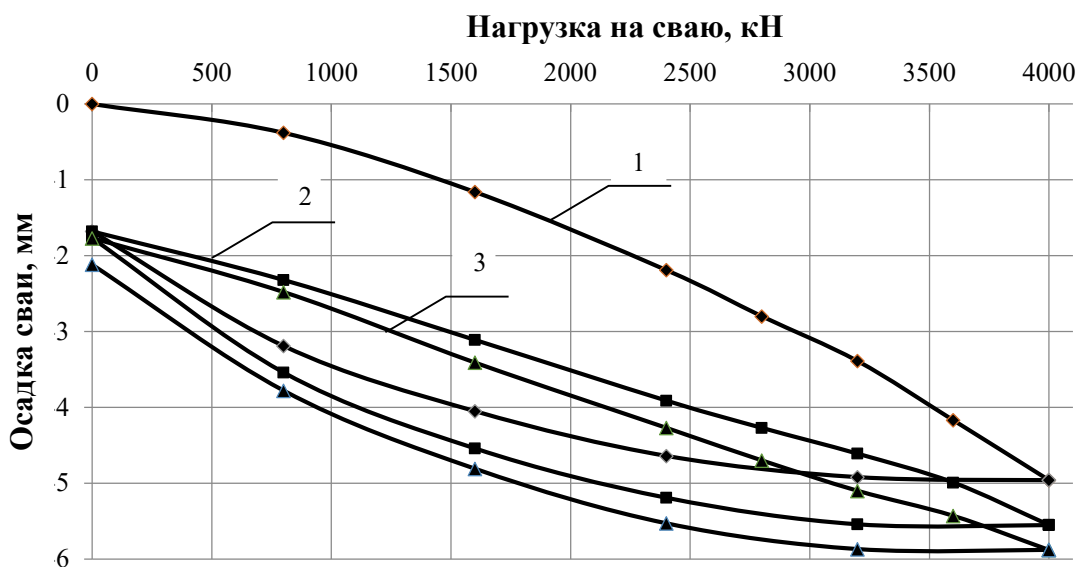


Рисунок 4 – Результаты статических испытаний сваи №4 на строительной площадке по ул. Таврической в г. Сочи: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

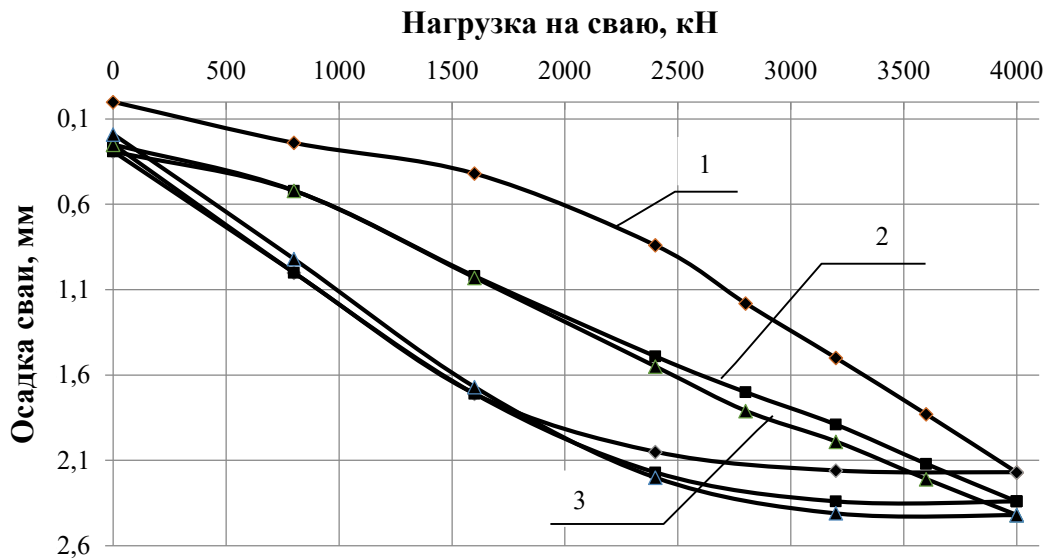


Рисунок 5 – Результаты статических испытаний сваи №5 на строительной площадке по ул. Таврической в г. Сочи: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

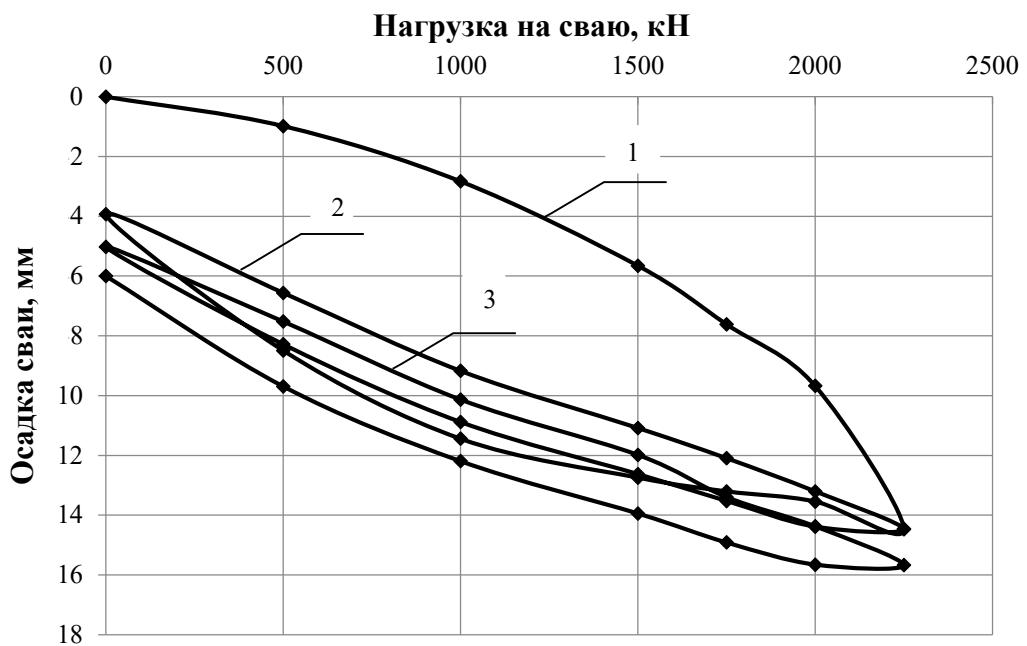


Рисунок 6 – Результаты статических испытаний сваи №6 на строительной площадке по ул. Красной в г. Краснодаре: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

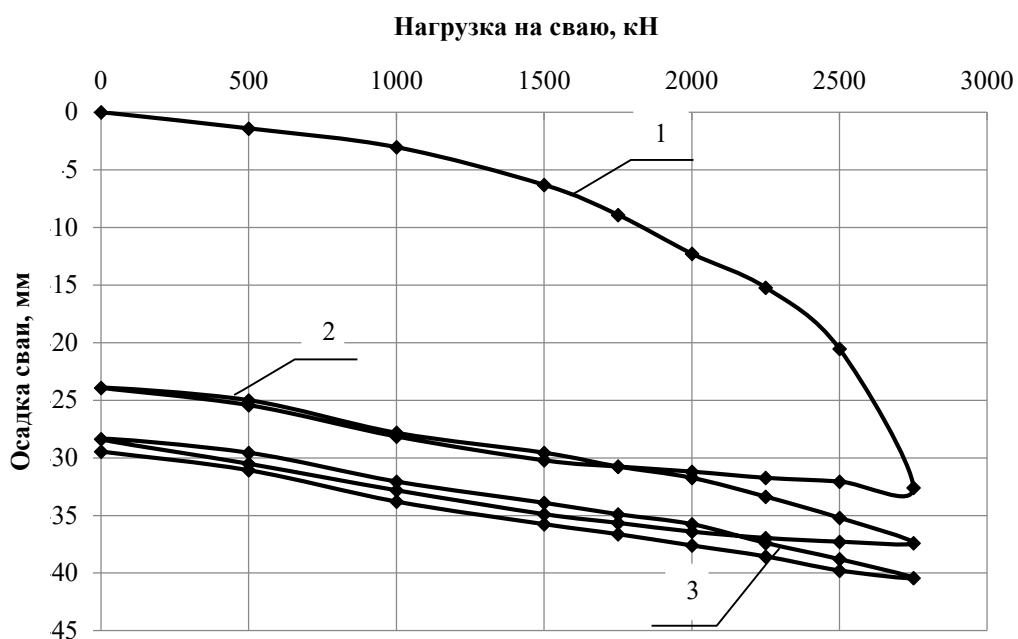


Рисунок 7 – Результаты статических испытаний сваи №7 на строительной площадке по ул. Красной в г. Краснодаре: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

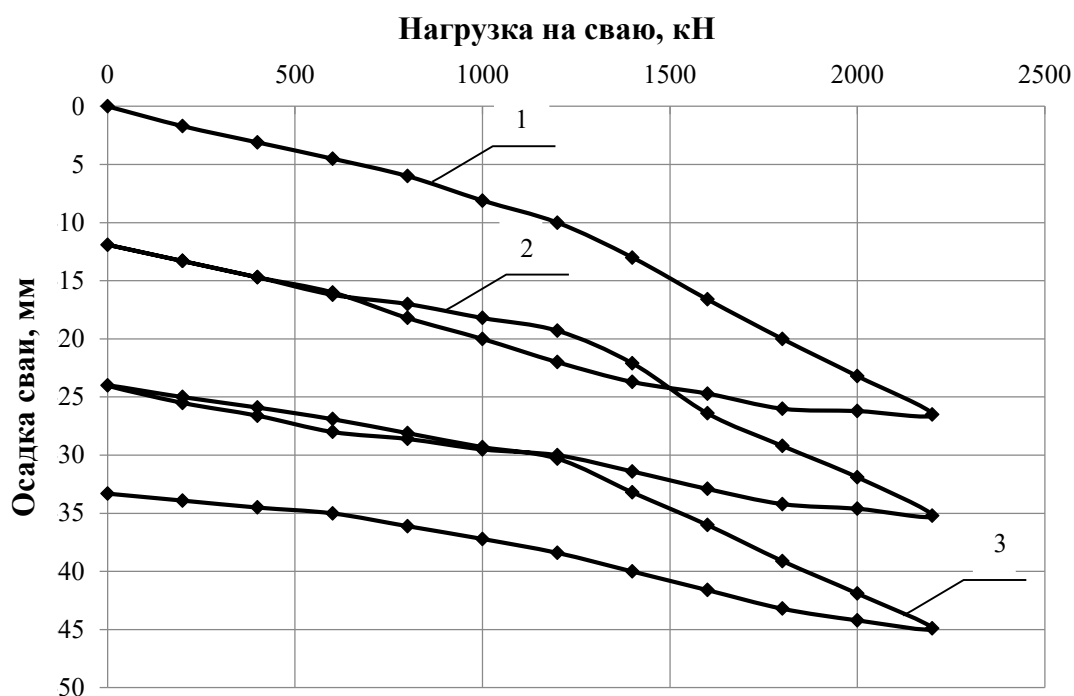


Рисунок 8 – Результаты статических испытаний сваи №8 на строительной площадке в Темрюкском районе Краснодарского края: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

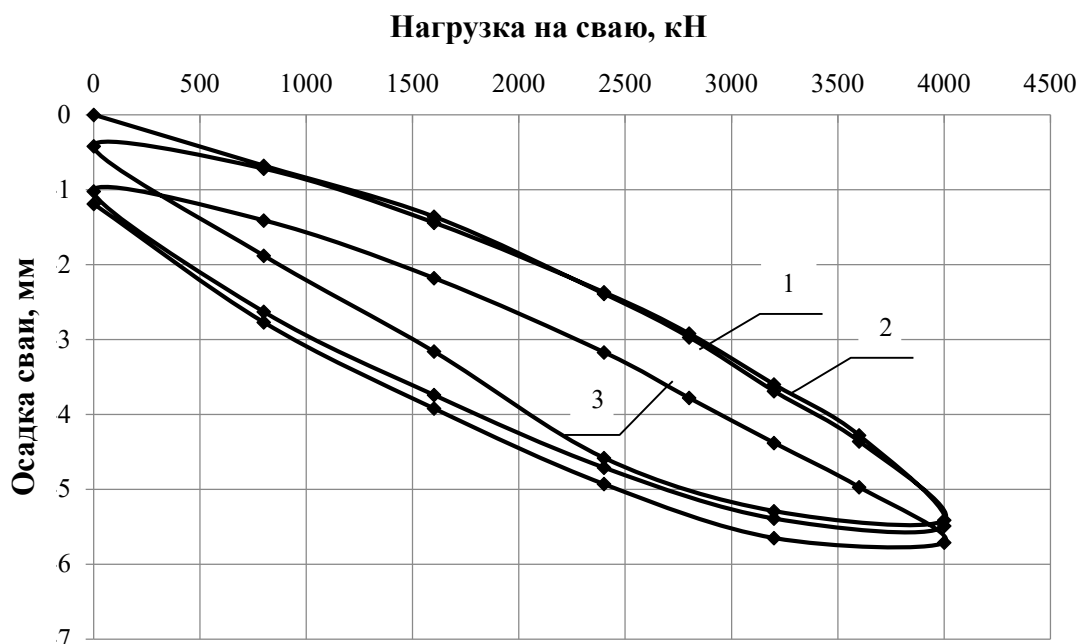


Рисунок 9 – Результаты статических испытаний сваи №9 на строительной площадке в г. Сочи по ул. Гастелло: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

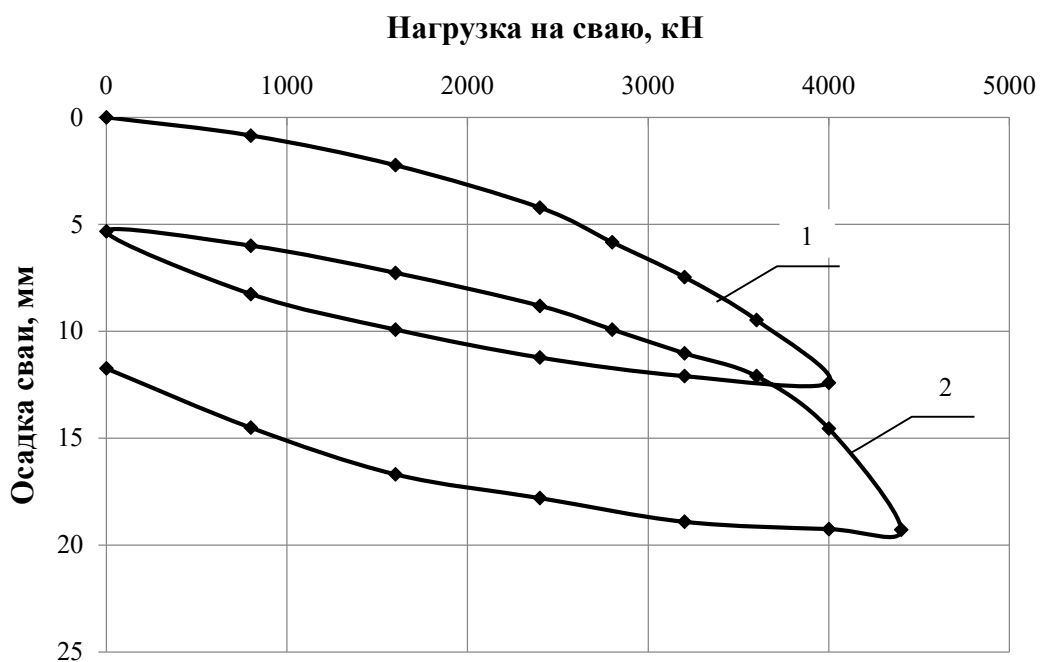


Рисунок 10 – Результаты статических испытаний сваи №10 на строительной площадке в г. Сочи по ул. Гастелло: 1 – первый этап нагружения; 2 – второй этап нагружения

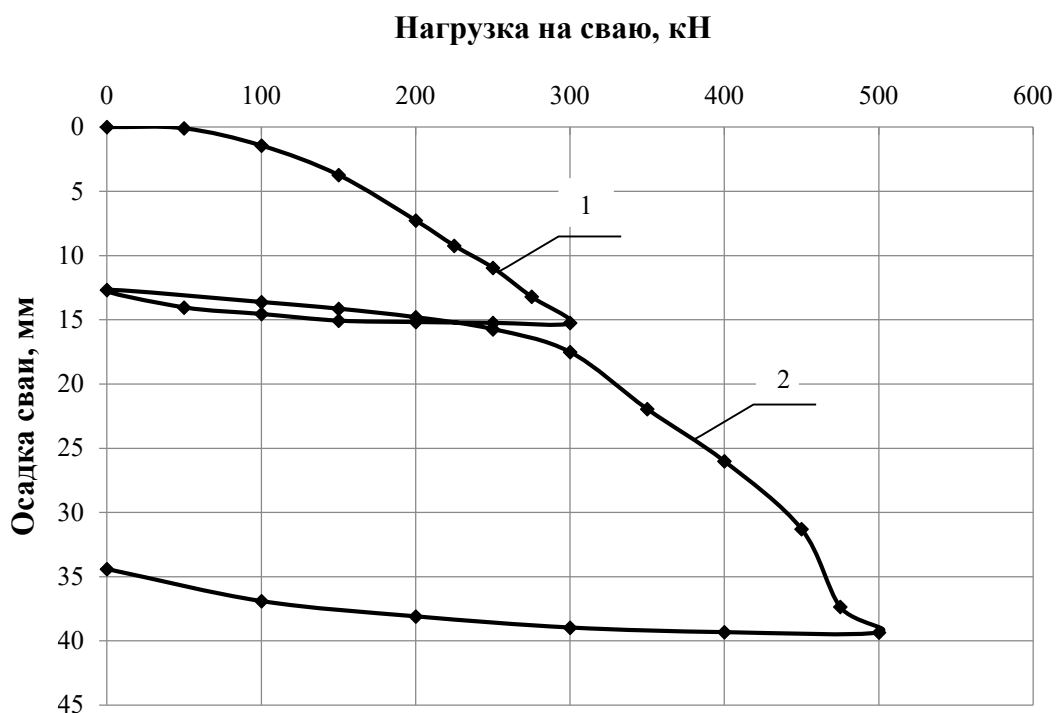


Рисунок 11 – Результаты статических испытаний сваи №11 на строительной площадке в г. Сочи по ул. Горького: 1 – первый этап нагружения; 2 – второй этап нагружения

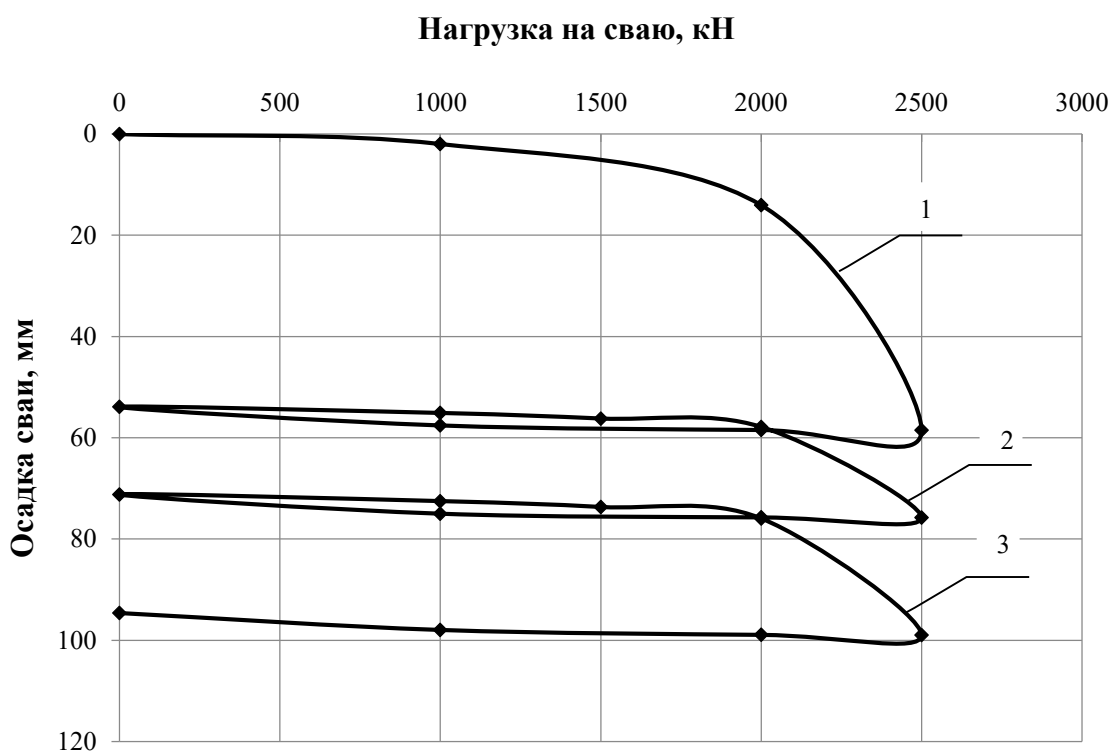


Рисунок 12 – Результаты статических испытаний сваи №12 на строительной площадке в г. Сочи по ул. Горького: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

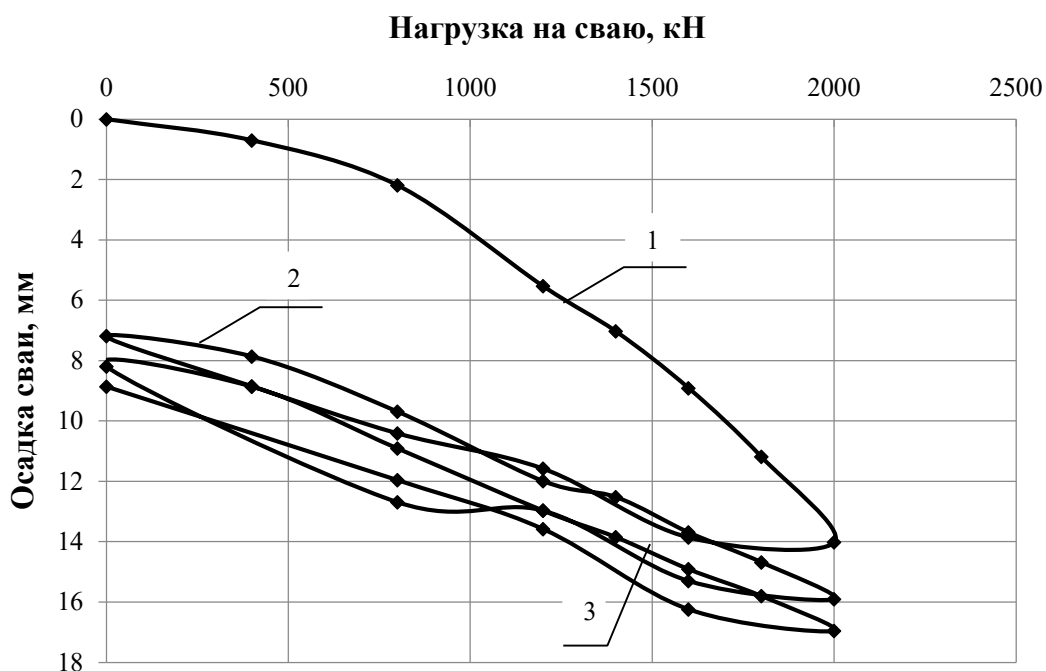


Рисунок 13 – Результаты статических испытаний сваи №13 на строительной площадке в г. Краснодаре по ул. Кожевенной: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

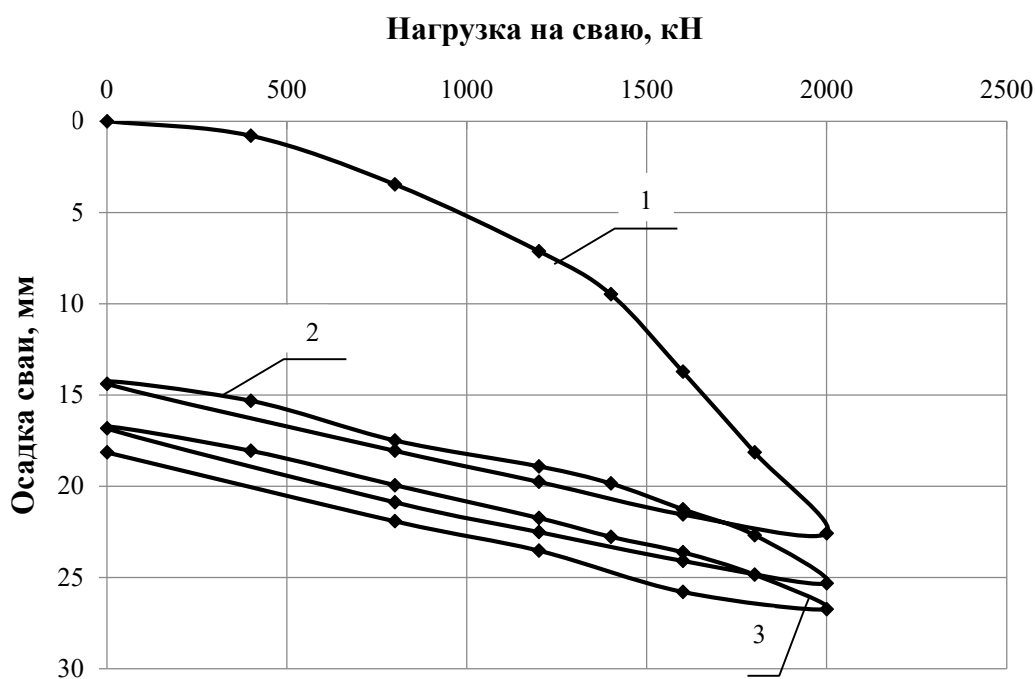


Рисунок 14 – Результаты статических испытаний сваи №14 на строительной площадке в г. Краснодаре по ул. Кожевенной: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

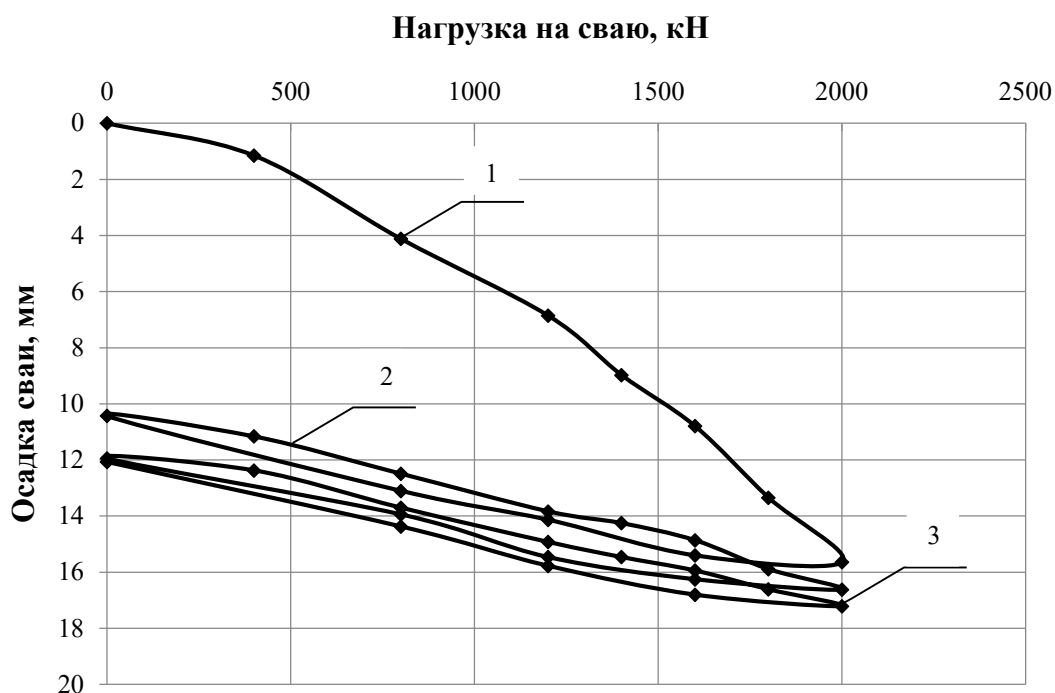


Рисунок 15 – Результаты статических испытаний сваи №15 на строительной площадке в г. Краснодаре по ул. Кожевенной: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

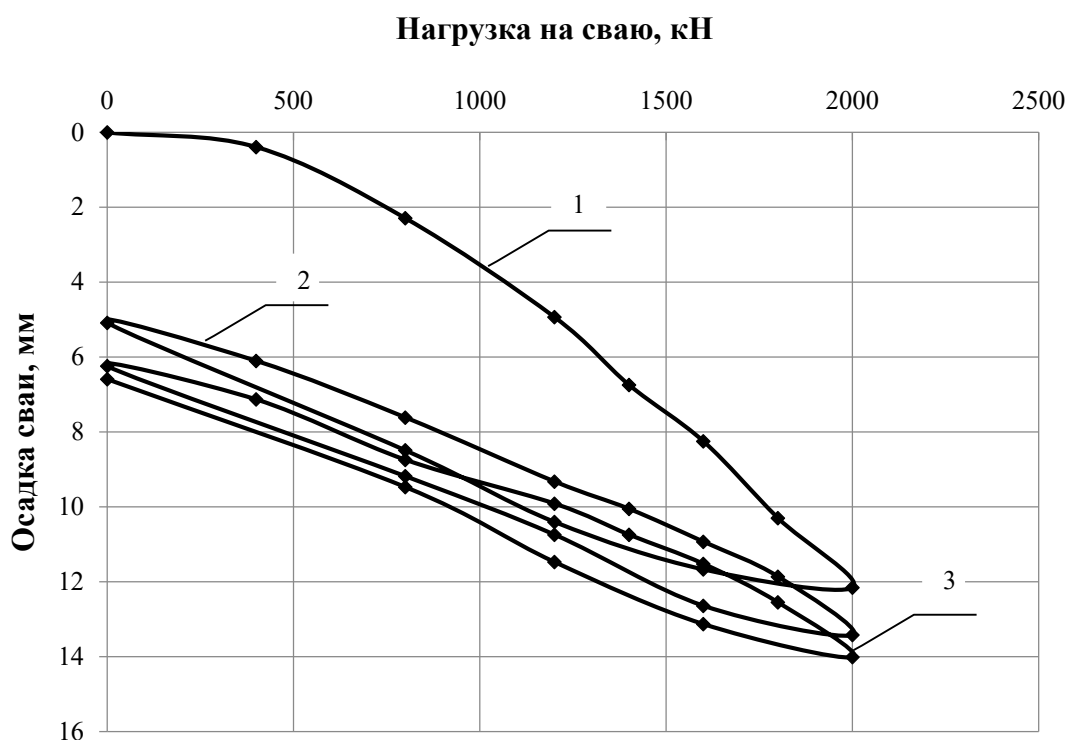


Рисунок 16 – Результаты статических испытаний сваи №16 на строительной площадке в г. Краснодаре по ул. Кожевенной: 1 – первый этап нагружения; 2, 3 – соответственно второй и третий этапы нагружения

Приложение Б

Лицензионное соглашение на пользование программным комплексом
«MIDAS GTS NX»

Предоставлено предприятием ООО
«ГЕОТЕК» по договору о научно-
техническом сотрудничестве с
подразделением АСФ Кубанского ГАУ
№ 025 от 05.02.2019

MIDAS FAMILY PROGRAM

End User License Agreement



MIDAS FAMILY PROGRAM

End User License Agreement

End User License Agreement for Using MIDAS Family Programs

This License Agreement is entered into by and between MIDAS IT Co., LTD. (referred to as "MIDAS" hereinafter) and the user (referred to as "User" hereinafter) of the MIDAS software product(s) (referred to as "Program" hereinafter). By installing this software, User indicates acceptance of this Agreement.

1. License

The User hereby retains the right to use the Program by accepting this License Agreement. The User shall utilize the Program for in-house usage only and install each license on a single designated computer station unless MIDAS specifically authorizes the User to utilize the License on the basis of multi-station usage. Should the Program apply to multiple locations, a service charge will be supplemented. The User shall not revise, alter, translate, copy, sell, lease, publish or otherwise distribute the Program, documentation, printed materials, the License and/or any part thereof without prior express written consent of MIDAS.

2. Use of License

No Program shall be provided for use by the User by virtue of this License Agreement alone. This License Agreement shall become validated upon the issuance of a purchase order by the User and the acceptance of the purchase order by MIDAS, and the full payment of the agreed price has been remitted to MIDAS or its authorized representative, unless MIDAS specifically permits the use of the Program otherwise.

3. License Transfer

MIDAS does not grant the User the right of transfer or assign the Program, security device or License to any other person without prior express written consent of MIDAS. User shall not sell, rent, lease, lend, transfer, network, publish, disclose, display or otherwise make available any portions of the Program or copies thereof to others. Moreover, the User shall be responsible for safeguarding the security device.

4. Copyright

MIDAS shall have and retain the ownership of the Program and all associated documents, which are copyrighted and protected by the governing copyright laws. The User may copy the Program and print the related documents for backup or archival internal purpose use. The User shall not alter, copy, translate, issue, publish, distribute, assign or transfer the original or duplicate the Program or related documents either physically or electronically for other purposes without prior written authorization of MIDAS.

5. Responsibility

MIDAS makes no warranty or representation in connection with the Program, services and the related materials, express or implied, by operation of law or otherwise, including any implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose. MIDAS and any other affiliated companies shall not be held liable for loss of profit, loss of business or other financial loss which may be caused directly or indirectly by the inadequacy of the Program for any purpose or use thereof or by a defect or deficiency therein. Accordingly, the User is encouraged to fully understand the bases of the Program and become familiar with the Users Manuals. The User shall also independently verify the results produced by the Program.

6. Warranty

MIDAS provides the warranty contained in this Clause 6 only to the extent of the physical fitness of the Program, which consists of the executable software, security device and manuals in an electronic format. MIDAS shall replace the Program, which exhibits manufacturing defects with one in proper working order within the first year of the purchase of the License for free of charge. The Program replacement shall not apply to damages caused as a result of the User's carelessness, ill treatment or misuse of the Program for free of charge.

7. Term

The User may terminate the License Agreement by returning the Program including the security device and purging all copies thereof. MIDAS may also terminate the License Agreement in the event of default on the terms and conditions of this License Agreement by the User. Within five (5) business days of cancellation, User shall return the Program to MIDAS.

8. Maintenance

MIDAS and its authorized representatives shall provide user support including updates to the Program for a period of first twelve (12) months of the License purchase at a predetermined fee in connection with the use of the Program. Subscription to the subsequent maintenance and user support services will be provided at a predetermined fee. Leased Program is entitled to maintenance and user support at no additional cost. Updates herein means modifications or corrections of errors in the preceding version.

9. Online Services

The User hereby acknowledges and accepts that MIDAS provides online based web notices for Program updates, validates the license and provides other Program related online services when using the Program. This service is provided for the benefit of licensed Users.

10. Governing Law

This License Agreement will be governed by and construed in accordance with the substantive laws in force in the State of California, USA.

11. Acknowledgement

The User acknowledges that he/she has read and understood the entire contents of this License Agreement and hereby agrees to the terms and conditions as set forth herein. Also, this Agreement and the terms and conditions herein supersede and replace all prior proposals and agreements.

AS WITNESS this Agreement has been signed by the parties (or their duly authorized representatives) on the date stated at the bottom of this Agreement.

Signed by :

End User Signature

Name _____

on behalf of _____ [End User Company]

MIDAS IT Signature



Name Vitaly Terentyev

on behalf of MIDAS Information Technology, Co., Ltd.

Dated : 12 . 02 . 2015



MIDAS Information Technology Co., Ltd.
MIDAS IT Tower, Pangyo Seven venture Valley 17, Pangyo-ro 228beon-gil,
Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13487

Tel +82-31-789-2000 | Fax +82-31-789-2110

MIDAS FAMILY PROGRAM

End User License Certificate for Using MIDAS Family Programs

Product Title : *midas FEANX (GTS NX)*

Product No. : *RUENFAX000014*

No. of Users : *1*

Name of Group (User) : *ООО „ГЕОТЭК“*

MIDAS IT hereby confers this **End User License Certificate** for using the above product(s) and related documents to the above-designated individual or group User(s).

The product contains a MIDAS Family Program and related documents, which are copyrighted and protected by the governing international copyright laws. The End User License Agreement governs the use of a MIDAS Family Program. The User shall be required to safeguard this End User License Certificate as this Certificate serves as evidence to the license and qualifies for maintenance including program updates and user support pursuant to the End User License Agreement.



Date presented 12.02.2015

Presented by Vitaly Terentyev
Authorized Representative (Name & Signature)



Copyright © Since 1989 MIDAS Information Technology Co., Ltd. All rights reserved.

www.MidasUser.com

Приложение В

Справки о внедрении результатов исследований

№ 217
от 08 ноября 2021 г.

**СПРАВКА
о внедрении результатов научных
исследований соискателя кафедры оснований и
фундаментов ФГБОУ ВО Кубанского ГАУ
Шмидта Олега Александровича**

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертационной работы Шмидта Олега Александровича на тему «Развитие метода расчета осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров в глинистых грунтах», представленные на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в производственной деятельности предприятия ООО «ГеоПроект» при проектировании объекта «Строительство резервуара емкостью 10 тыс. куб. м. на территории нефтебазы НК «Роснефть» по адресу: Россия, Краснодарский край, г.Туапсе, ул. Сочинская, 1»

Личный вклад Шмидта О.А. заключался в разработке рационального конструктивного решения кольцевого свайного фундамента резервуара для хранения нефтепродуктов. Использованный Шмидтом О.А. инженерный метод расчета осадок кольцевого свайного фундамента показал высокую сходимость с результатами численных расчетов и данными геодезического мониторинга.

С уважением,

Директор
ООО «ГеоПроект»



Ещенко О.Ю.

Исп. Чумак М.В.
(918) 410-63-83
chumak_mv@geoproekt.net

РОССИЯ
Краснодарский край, г. Краснодар
**Общество с ограниченной
ответственностью
«ОРГПИЩЕПРОМПРОЕКТ»**
350000, г. Краснодар,
ул. Рашилевская, 106.
Телефон / факс (861)218-73-31/253-99-21
№211 от 22.11.2021 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований
соискателя кафедры оснований и
фундаментов Кубанского ГАУ
Шмидта Олега Александрович

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертационной работы Шмидта Олега Александровича, представленные на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в производственной деятельности ООО "ОРГПИЩЕПРОМПРОЕКТ" на объекте: "Реконструкция комбикормового завода в ст. Дондуковской Гиагинского района республики Адыгея.

Личный вклад Шмидта О.А. заключался в определении осадки кольцевого свайного фундамента силоса с плоским дном емкостью 3 тыс. тонн.

Использование разработанного Шмидтом О.А. метода расчета позволило спрогнозировать осадку силоса с учетом его разгрузки и последующих повторных нагружений.

С уважением,
Директор
ООО "Оргпищепромпроект"



Н.Р. Голубев

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Кубанский

государственный
аграрный университет

им. И. Т. Трубилина»

канд. экон. наук, доцент



А. В. Петух А. В. Петух

10 _____ 2021 г.

СПРАВКА

**об использовании результатов исследований старшего преподавателя
кафедры «Основания и фундаменты» Кубанского ГАУ Шмидта Олега
Александровича в учебном процессе**

Настоящей справкой подтверждаем, что в диссертационной работе Шмидта О.А. были решены вопросы развития метода расчета осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров на глинистых грунтах, что вносит существенный вклад в развитие теории и практики фундаментостроения. Полученные диссертантом результаты используются с 2018-2021 учебного года в учебном процессе Кубанского государственного аграрного университета им. И. Т. Трубилина при выполнении выпускных квалификационных работ студентами-магистрантами, обучающихся по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство», а также чтении лекций по дисциплине «Основания и фундаменты сооружений» для студентов специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

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

Д.Г. Серый

Заведующий кафедрой
«Основания и фундаменты»
д.т.н, профессор

А.И. Полищук