

На правах рукописи



Шмидт Олег Александрович

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

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Полищук Анатолий Иванович

Официальные
оппоненты:

Невзоров Александр Леонидович
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический)
федеральный университет им. М.В. Ломоносова»,
кафедра инженерной геологии, оснований
и фундаментов, профессор;

Нуждин Леонид Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
(СибСтрин)», кафедра инженерной геологии,
оснований и фундаментов, профессор.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».**

Защита состоится «12» апреля 2022 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220). Тел./факс: 8 (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/shmidt-oleg-aleksandrovich>

Автореферат разослан «15» февраля 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В. В. Конюшков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы при строительстве резервуаров под нефтепродукты на глинистых грунтах все большее применение находят кольцевые свайные фундаменты из буронабивных свай. 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 кольцевых свайных фундаментов резервуаров и работы свай в их составе 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., Ляшенко П.А., Мангушева Р.А., Мирсаяпова И.Т., Невзорова А.Л., Нуждина Л.В., Парамонова В.Н., Пономарева А.Б., Пронозина 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 V.H., Viggiani C., Mandolini A. и др.

Специалистами АО «НИЦ «Строительство» - НИИОСП им. Н.М. Герсванова (г. Москва), СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург), ФГБОУ ВО ТИУ (г. Тюмень), КГАСУ (г. Казань) и др. были проведены исследования, обобщен отечественный и зарубежный опыт расчета, конструирования и устройства свайных фундаментов резервуаров. Основное внимание уделялось особенностям нагружения таких фундаментов (нагрузка-разгрузка и последующие повторные нагружения), которые не свойственны для других сооружений промышленно-гражданского строительства. Следует также отметить

исследования специалистов ООО ПИ «Геореконструкция» (г. Санкт-Петербург) в рамках которых проводились статические испытания забивных железобетонных свай в глинистых грунтах. Программа их работ включала нагрузку-разгрузку и последующие повторные нагружения свай, что моделировало их работу в фундаментах резервуаров. 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 учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений.

Задачи исследований:

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 учетом 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 расчетные 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 исследования: кольцевой свайный фундамент резервуара из буронабивных железобетонных свай в глинистых грунтах.

Предмет исследования: 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 натуральных 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 осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров с учётом 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; (для предприятия ООО «ГеоПроект», 2016);

– при определении осадки кольцевого свайного фундамента силоса с плоским дном вместимостью 3 тыс. тонн зерна в ст. Дондуковской Гигинского района республики Адыгеи (для предприятия ООО «Оргпищепромпроект», 2017);

– 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

чении лекций для студентов 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 осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров. В разделе экспериментальных исследований использовались результаты натуральных буронабивных свай и полевых 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.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа, согласно своим научным результатам, соответствует пункту 4 паспорта научной специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения.

Степень достоверности 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 результатов. Основные положения диссертации были доложены и обсуждались на международных, всероссийских, национальных, региональных конференциях различного уровня в г. Воронеже (2019), г. Краснодаре (2015, 2019, 2021), г. Новочеркасске (2015, 2018), г. Перми

(2016, 2021), г. Санкт-Петербурге (2021), г. Тюмени (2018), а также научных семинарах кафедры «Основания и фундаменты» Кубанского ГАУ (г. Краснодар, 2017, 2018, 2021 гг.)

Личный вклад автора состоит:

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

– в разработке программы, методики проведения испытаний 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, четырех разделов, заключения, списка литературы из 115 наименований и 3 приложений. Общий объем работы составляет 131 страницу, включая 37 рисунков и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложены научная новизна, практическая и теоретическая значимость диссертации, приведены личный вклад автора, защищаемые положения и основные задачи по диссертационной работе.

В первом разделе выполнен обзор исследований по работе свайных фундаментов резервуаров. Дается классификация фундаментов резервуаров и особенности режима их нагружения.

Исследованиями работы свайных фундаментов резервуаров занимались Абелев М.Ю., Бахолдин Б.В., Битайнис А.Г. Винников Ю.Л., Городнова Е.В., Готман А.Л., Ещенко О.Ю., Землянский А.А. Жусупбеков А.Ж., Иванов Ю.К., Карлов В.Д., Коновалов П.А., Конюшков В.В., Ляшенко П.А., Мангушев Р.А., Мирсаяпов И.Т., Новожилов Г.Ф., Нуждин Л.В., Невзоров А.Л., Парамонов В. Н., Пономарев А.Б., Пронозин Я.А., Россихин Ю.В., Седин В.Л., Сотников С.Н., Тарасенко А.А., Тер-Мартirosян З.Г., Улицкий В.М., Федоровский В.Г., Шадунц К.Ш., Шашкин А.Г.,

Шулятьев О.А., Brandl H., B.H. Fellenius, C. Viggiani, A. Mandolini, Zhu B., Ren Y., Chen R.-P., Wang Z. Y., Poulos H. G. и др. В качестве основных особенностей работы фундаментов резервуаров следует отметить постоянное изменение нагрузок на фундаменты (основания), наличие разгрузки и повторных последующих нагружений. Установлено, что для свай, эксплуатируемых в составе фундаментов резервуаров, наблюдается повышение их несущей способности во времени. При этом на повторных нагружениях выявляется дополнительное приращение осадок фундаментов.

В результате обзора технической литературы о работе свайных фундаментов резервуаров в различных грунтовых условиях установлено, что в существующих методах расчёта осадок разгрузку и повторные последующие нагружения обычно не учитывают. В стандартах на испытания свай (ГОСТ 5686-2020, ГОСТ 20276.1.2020) возможность их повторного нагружения не предусмотрена. На основании анализа результатов исследований работы свайных фундаментов резервуаров были сформулированы цель и задачи исследований.

Во втором разделе представлен анализ результатов статических испытаний натуральных буронабивных свай и моделей свай в глинистых грунтах. Программа испытаний натуральных буронабивных свай включала нагрузку-разгрузку и их повторные последующие нагружения. Всего было проанализировано 16 испытаний. Для анализа использовались архивные данные статических испытаний буронабивных железобетонных свай, выполненных на строительных площадках Краснодарского края организациями ООО «СевКавТИСИЗ», ООО «Гидротехнические сооружения», ООО «Гидротехника», и др. (2011–2016 гг.), в которых автор принимал участие.

Грунтовые условия рассматриваемых площадок классифицировались как сложные (по СП 47.13330.2016). С поверхности до разведанной глубины (15-25м) залежали супеси, суглинки и глины от твердой до мягкопластичной консистенции. Глинистые грунты в пределах длины свай и сжимаемой толщи основания свайных фундаментов не обладали специфическими неблагоприятными свойствами. По боковой поверхности свай залежали преимущественно глинистые грунты (на отдельных площадках с прослойками песка, галечника). Заглубление нижних концов свай в несущий слой основания (глинистые грунты) на всех строительных площадках составляло не менее 1 м. Уровень подземных вод на рассматриваемых площадках находился на глубине 2-8 м от поверхности земли.

Рассматриваемые сваи являлись буронабивными. Длина испытываемых свай составляла 11–24 м. Армирование свай было выполнено пространственными сварными каркасами. Нагружение свай производилось

гидравлическими домкратами. Опорная конструкция для установки домкрата выполнялась в виде сварных стальных балок, закрепляемых к анкерным сваям. Для определения осадок испытываемых свай использовались прогибомеры конструкции Н.Н. Максимова с ценой деления 0,01 мм.

Статические испытания буронабивных свай проводились с разгрузкой и последующими повторными нагружениями. На каждой ступени нагружения сваи снимались отсчёты осадок по ГОСТ 5686-2020. Из анализа результатов испытаний натуральных свай было выявлено, что после разгрузки и последующих повторных нагружений происходит увеличение их осадки S по сравнению с первым этапом нагружения (рис. 1).

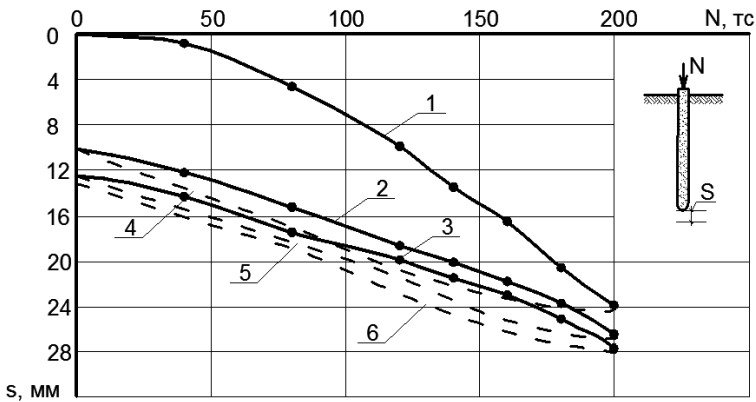


Рисунок 1 – Результаты статических испытаний натурной сваи №16: 1–3 – соответственно нагружение сваи на этапах 1–3; 4–6 – то же разгрузка сваи

Для анализа результатов статических испытаний свай использовалось приращение осадки Δs при повторных нагружениях, а также изменение модуля деформации грунта основания E в процессе испытаний. Для рассматриваемых буронабивных свай производилась оценка их прогнозируемой несущей способности F_d и ее изменение при повторном нагружении. Изменение осадки свай S , их несущей способности F_d и модуля деформации E грунта в основании рассчитывалось в процентах от значений, полученных на первом этапе нагружения свай. Модуль деформации грунта E в основании нижних концов натуральных свай определялся по результатам компрессионных испытаний, а также по методу заглубленного штампа согласно ГОСТ 20276.1.2020 (тип IV, винтовой штамп) и методу И.З. Гольдфельда (2011).

После обработки полученных данных было установлено, что в большинстве случаев наблюдалось увеличение значений модуля деформации грунтов основания E при повторном нагружении на 13–14% по отношению к E , установленному на первом этапе нагружения. После третьего этапа нагружения свай модуль деформации грунтов E в основаниях увеличивается в среднем на 17–18%. Исследованиями было установлено, что для рассматриваемых свай наблюдается линейная зависимость между модулем деформации грунта E основания свай при повторном нагружении и их конечной осадкой S .

Таким образом, анализ результатов испытаний натуральных свай в глинистых грунтах позволил установить влияние повторных нагружений на их осадки. При анализе результатов статических испытаний было выявлено приращение осадок свай Δs на 20–22% по сравнению с осадками на первом этапе нагружения.

Далее были выполнены экспериментальные исследования работы моделей свай в глинистых грунтах при их разгрузке и повторных последующих нагружениях. Опыты с моделями свай проводились для оценки изменения их осадок при многократных повторных этапах нагружения (больше трех). Испытания проводились на опытной площадке в г. Краснодаре. В пределах исследуемой сжимаемой толщи грунтов в основании моделей свай (один метр и более) залегают элювиальные отложения четвертичного возраста, представленные суглинками тяжелыми преимущественно полутвердой консистенции. В результате лабораторных испытаний были установлены следующие физико-механические характеристики грунтов: плотность $\rho = 1,77\text{--}1,80$ г/см³, влажность $W = 26\text{--}27\%$, предел раскатывания $W_L = 26\%$; предел текучести $W_p = 39\text{--}40\%$; показатель текучести $I_L = 0,00\text{--}0,08$; число пластичности $I_p = 13\text{--}14\%$; коэффициент пористости $e = 0,92\text{--}0,93$; коэффициент водонасыщения $S_r = 0,77\text{--}0,79$; модуль общей деформации (по результатам компрессионных испытаний) $E = 9,0\text{--}9,5$ МПа; удельное сцепление $c = 22\text{--}23$ кПа; угол внутреннего трения $\varphi = 16\text{--}17$ град.

Методика устройства моделей свай заключалась в следующем. Модели свай были выполнены из мелкозернистого бетона с армированием, диаметром 100 мм и длиной 1000 мм. Армирование моделей выполнялось одним стержнем арматуры диаметром 10 мм класса А400 по длине свай. После устройства свай устанавливался технологический перерыв в течение месяца для твердения бетонной смеси и восстановления структуры грунта на участке его контакта с бетоном.

Нагружение моделей свай производилось с помощью специальной установки, которая позволяла моделировать их работу по заданной программе. Измерение осадок моделей свай производилось с помощью фотоэлектронных

датчиков перемещений марки ФЭП с ценой деления 0,005 мм, которые дублировались индикаторами часового типа марки ИЧ-10 (цена деления 0,01 мм). Для определения вертикальных перемещений грунта в основании моделей свай были изготовлены марки специальной конструкции. Подробно методика проведения статических испытаний моделей свай изложена в параграфе 2.2.2 диссертации. В результате испытаний установлено, что конечные осадки S моделей свай в процессе их повторных нагружений при одинаковой внешней нагрузке N на каждом этапе увеличиваются. Анализ перемещений грунта в основании моделей свай (по данным перемещений марок) показывает его уплотнение, которое завершается обычно после 3-х этапов нагружения (рис. 2).

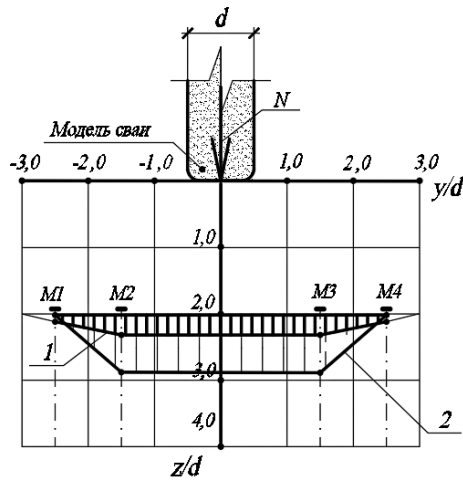


Рисунок 2. Осадки глубинных марок $M1 \dots M4$ в основании моделей свай: 1 – эпюра перемещений грунта после первого этапа нагружения; 2 – то же, после пятого этапа. Масштаб эпюр перемещений показан условно

Модуль деформации грунтов E в основании моделей свай, рассчитанный по методу И.З. Гольдфельда (2011), увеличивался с каждым этапом нагружения и в конце четвертого этапа испытаний составил $E = 30\text{--}31$ МПа (опыты 2, 3). На первом этапе нагружения характеристика модуля деформации E грунтов основания моделей свай составляла 9-10 МПа. Таким образом, по результатам статических испытаний моделей свай была выявлена зависимость их осадок $s = f(N)$ с учетом разгрузки и повторных последующих нагружений. Установлено, что основное приращение осадок Δs моделей свай происходит на втором и реже третьем этапах повторных

нагружений. На последующих этапах нагружения (этапы 4–8) приращение осадок Δs моделей свай является незначительным и не превышает 3–5% от осадки на первом этапе нагружения.

В третьем разделе рассматривается развитие метода расчета осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров на глинистых грунтах. Метод предусматривает раздельный расчет осадок центральной части резервуара (осадка днища) и железобетонного кольцевого ростверка с одно- двух- или трехрядным расположением свай (осадка фундамента кольца). Днище резервуара не имеет жесткой связи с фундаментом кольца.

В основу расчёта осадки днища резервуара S_d принят метод М.И. Горбунова-Посадова и др. (1984) для гибкого круглого фундамента на линейно-деформируемом основании. Конечную осадку днища резервуара S_d (центральной части) с учетом его повторных нагружений следует определять по формуле (рис. 3):

$$S_d = S_{d1} + \Delta S_{di}, \quad (1)$$

где S_{d1} – осадка днища резервуара в его центре при первом этапе нагружения основания, см; ΔS_{di} – суммарное приращение осадок днища резервуара при его повторных нагружениях, см. Формулы для определения осадок S_{d1} и ΔS_{di} приведены в диссертации (параграф 3.3).

Характеристики модуля деформации грунтов, необходимых для определения осадки днища резервуара S_d по условию (1), определяются обычно при компрессионных испытаниях (ГОСТ 12248) по методике, учитывающей разгрузку и последующие повторные этапы нагружения основания. Допускается для глинистых грунтов результаты компрессионных испытаний корректировать с помощью повышающих коэффициентов (m_{oed}) до результатов, соответствующих штамповым испытаниям грунтов, согласно рекомендациям нормативных документов (СП 22.13330.2016 и др.).

Приращение осадки ΔS_{di} в формуле (1) рекомендуется определять для трех этапов нагружения днища резервуара, так как при последующих этапах их нагружения приращения осадки практически не происходит.

Расчёт конечной осадки фундамента кольца S_k на первом и последующих этапах его нагружения производится с использованием метода А. А. Бартоломея (1982). При этом конечная осадка S_k определяется как для ленточного свайного фундамента (рассматривается участок длиной 1м). 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%.

Конечная осадка фундамента кольца S_k с учетом его повторных нагружений определяется по формуле (рис. 3):

$$S_k = S_{k1} + \Delta S_{ki}, \quad (2)$$

где S_{k1} – осадка фундамента кольца резервуара при первом этапе нагружения основания, см; ΔS_{ki} – суммарное приращение осадок фундамента кольца резервуара при его повторных нагружениях, см. Формулы для определения осадок S_{k1} и ΔS_{ki} приведены в диссертации (параграф 3.3).

При выполнении расчетов следует отметить, что ширина фундамента кольца b_c принимается по наружным граням кольцевого ростверка, глубина d_c – по отметке заложения нижних концов свай. (рис. 3).

Приращение осадок ΔS_{ki} в формуле (2) также, как и днища резервуара [см. формулу (1)], следует определять для трех этапов нагружения фундамента кольца. Модуль деформации грунта E , необходимый для определения осадки фундамента кольца, 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 учетом внешней нагрузки N , фактических осадок свай S и условно принятой ширины подошвы фундамента b_c (рис. 3). В рассматриваемом случае при определении характеристик модуля деформации грунта E предлагается использовать метод заглубленного жесткого штампа площадью 600 см² (по ГОСТ 20276.1.2020, тип 1V, винтовой штамп).

Метод предусматривает определение характеристик модуля деформации грунта E_{ki} в основании нижних концов свай по результатам одиночных натурных испытаний (буронабивных, забивных) статической вдавливающей нагрузкой. При этом их испытания проводятся с учетом разгрузки и последующих повторных нагружений (рис. 4). Тогда, согласно ГОСТ 20276.1-2020, характеристика E_{ki} в основании нижнего конца сваи устанавливается по формуле:

$$E_{ki} = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot D \cdot \frac{\Delta p}{\Delta S}, \quad (3)$$

где все характеристики и параметры приведены в ГОСТ 20276.1-2020.

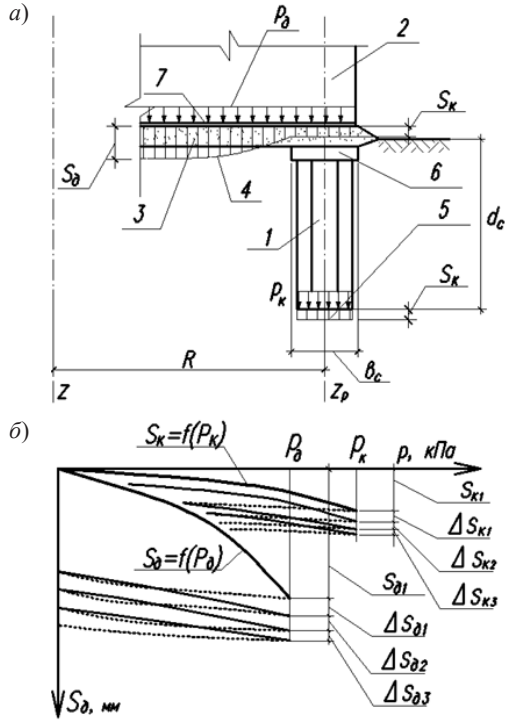


Рисунок 3 – Кольцевой свайный фундамент вертикального стального резервуара: *а* – схема конструктивного решения фундамента; *б* – зависимость осадок дна резервуара [$S_d = f(p_d)$] и кольцевого свайного фундамента [$S_k = f(p_k)$] от давления p_d и p_k ; 1 – кольцевой свайный фундамент резервуара (фундамент 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 – днище 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; Δs_{d1} , Δs_{d2} , $\Delta s_{d3} \dots \Delta s_{dn}$ – приращение осадки дна при повторном и последующих нагружениях резервуара, см; Δs_{k1} , Δs_{k2} , $\Delta s_{k3} \dots \Delta s_{kn}$ – то же, кольцевого свайного фундамента, см

Определение характеристик E_{ki} на первом этапе нагружения основания следует рассматривать в интервале нагрузок на сваю от N_f до N_d . При этом N_f – нагрузка на сваю, при которой заканчивается линейная зависимость на графике осадок $S = f(N)$, участок oa (рис. 4); N_d – нагрузка на сваю, соответствующая криволинейной зависимости на графике осадок. Осадка S , соответствующая пределу ному состоянию глинистого грунта на боковой поверхности сваи, называется сдвигом $S = S_{cd}$ (рис. 4). Подставим в формулу (3) вместо ΔS выражение $(S - S_{cd})$, вместо $D \cdot \Delta p$ выражение $4(N_d - N_f)/\pi D$, получим:

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

где S_{cd} – сдвиговая осадка сваи, см; N_d – 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;

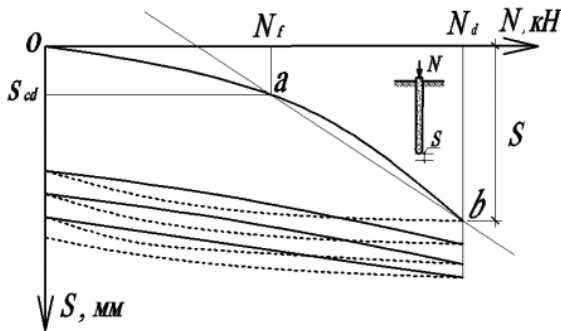


Рисунок 4 – График зависимости осадки сваи S от внешней нагрузки N на первом этапе нагружения, при разгрузке и последующих повторных нагружениях

Для определения значения сдвиговой осадки S_{cd} следует воспользоваться табличными данными Далматова Б. И., Лапшина Ф. К. и др., которые приведены в диссертации и публикациях автора для различных видов и разновидностей дисперсных грунтов.

В диссертации (параграф 3.5) автором разработаны рекомендации по расчету конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров

на глинистых грунтах с учётом их разгрузки и последующих повторных нагружений, которые могут быть использованы в проектной практике.

В четвертом разделе диссертации рассматривается практическое применение разработанного инженерного метода расчёта конечных осадок кольцевого свайного фундамента резервуара, возводимого в г. Туапсе Краснодарского края. Проведен также численный метод расчёта, проанализированы результаты геодезического мониторинга и выполнено сопоставление полученных данных по рассматриваемому сооружению.

Инженерный метод расчёта осадок использовался для кольцевого свайного фундамента резервуара емкостью 10 тыс. м³ (г. Туапсе), который проектировался в составе парка резервуаров по материалам выполненных инженерно-геологических изысканий. Рассматриваемый метод предусматривал раздельный расчёт осадок центральной части резервуара (осадка днища) и железобетонного кольцевого ростверка (осадка фундамента кольца). В расчёте учитывались дополнительные осадки днища и фундамента кольца, обусловленные повторными нагружениями и разгрузкой основания резервуара.

Численный расчёт кольцевого свайного фундамента проводился в программном комплексе *Midas GTS NX*. За основу расчёта осадок днища и фундамента кольца резервуара была принята модифицированная модель Мора-Кулона. Нагружение и разгрузка кольцевого свайного фундамента резервуара в программном комплексе проводилась в три этапа. Рассматриваемая методика предусматривает выполнение расчёта осадок как для единого фундамента. Результаты численного метода определения осадки кольцевого свайного фундамента резервуара на первом этапе его нагружения приведены на рис. 5.

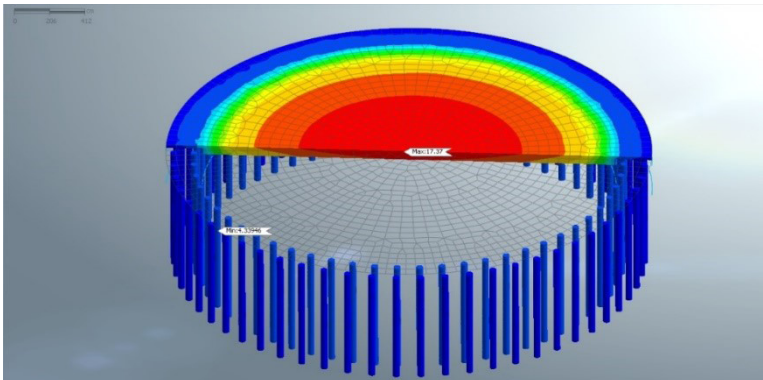


Рисунок 5 – Результаты определения осадки кольцевого свайного фундамента резервуара на первом этапе его нагружения (численный метод)

Геодезический мониторинг осадок рассматриваемого фундамента резервуара (емкость 10 тыс. м³) проводился в 2015–2016 гг. Для этого, в уровне его днища были установлены 12 светоотражающих геодезических марок. Была также проведена привязка светоотражающих марок к независимой реперной системе на территории объекта. Наблюдения за осадками кольцевого свайного фундамента резервуара велись в три этапа: подготовительный этап, в процессе проведения гидравлических испытаний, а также в течение года его эксплуатации. Результаты геодезического мониторинга за осадками резервуара приведены на рис. 6 (марки 4, 6 и 11). Было установлено, что конечная осадка фундамента кольца резервуара S_k составила 4,4 ... 5,5 см, неравномерность осадки $\Delta S/L$ равна 0,0003.

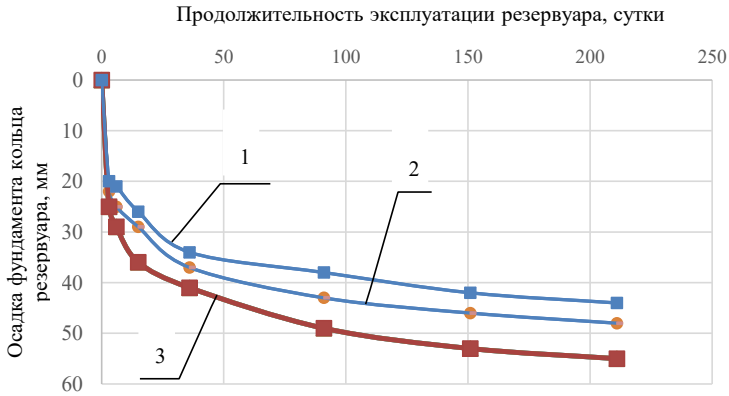


Рисунок 6 – Результаты геодезического мониторинга осадок фундамента кольца резервуара: 1, 2, 3 – соответственно графики осадки марок № 4, № 6, № 11

Результаты инженерного и численного методов расчёта, а также данные геодезического мониторинга осадок кольцевого свайного фундамента резервуара приведены в табл. 1. Анализируя полученные результаты, следует отметить, что расхождение данных аналитического и численного расчётов осадок днища резервуара составило 2,7%; осадка фундамента кольца – 8,3%. Следует при этом отметить, что 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 грунтов, а также промежуток времени геодезических наблюдений за перемещениями светотражающих марок.

Результаты проведенных исследований были использованы при проектировании кольцевого свайного фундамента резервуара объемом 10 тыс. м³ перегрузочного комплекса в г. Туапсе (ООО «Геопроект», 2016), а также при определении осадки кольцевого свайного фундамента силоса с плоским дном емкостью 3 тыс. тонн зерна в ст. Дондуковской Гиагинского района республики Адыгеи (ООО «Оргпищепромпроект», 2017).

Таблица 1 – Сопоставление результатов расчёта осадок кольцевого свайного фундамента резервуара 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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 натуральных буронабивных свай статической вдавливающей нагрузкой на площадках строительства 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 расчета осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров.

4. На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований разработан инженерный метод расчета конечных осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров из буронабивных свай в глинистых грунтах, учитывающий их разгрузку и последующие повторные нагружения. Метод предусматривает раздельный 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. Тупапсе. Достоверность инженерного метода подтверждается сопоставлением расчётных данных по предлагаемому методу, результатами численного метода расчёта и результатами геодезических наблюдений за осадками фундамента резервуара.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК:

1. Ляшенко, П.А. Исследование на модели развития осадки буронабивной сваи / П.А. Ляшенко, Д.В. Гохаев, **О.А. Шмидт** // Научный журнал

КубГАУ [Электронный ресурс]. – №90(06). – С. 300–319. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/06/pdf/09.pdf>

2. Ляшенко, П.А. Исследование развития осадки буронабивной сваи в глинистых грунтах при повторном приложении статической нагрузки / П.А. Ляшенко, Д.В. Гохаев, **О.А. Шмидт** // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – 2016. – №120(06). – С. 1558–1575. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/104.pdf>

3. Ляшенко, П.А. Упрочнение и разупрочнение глинистого грунта / П.А. Ляшенко, В.В. Денисенко, Д.В. Гохаев, **О.А. Шмидт** // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – №120(06). – С. 1541–1557. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/103.pdf>

4. **Шмидт, О.А.** Совершенствование метода расчета осадок свайных фундаментов резервуаров с учетом повторяемости их нагружения и разгрузки / О.А. Шмидт // Вестник ПНИПУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2018. – Т.9, №2. – С. 125–133. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.2.12

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science

5. Shmidt, O.A., Bolgov, I.V, Klikun N.A. (2019) The Parameters for a Retaining Wall Interaction Mathematical Model with a Reservoir in the Ground Conditions Determination in the Krasnodar Territory. – Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development. – pp. 218–226.

6. Polishchuk A.I. and **Shmidt, O.A.** (2021) Method for calculating the settlement of ring pile foundations of tanks. – Journal of Physics: Conference Series. – doi:10.1088/1742-6596/1928/1/012043.

7. Polishchuk A.I. and **Shmidt, O.A.** (2021) Justification of the method for determining the final settlement of ring pile foundations tanks in clay soils. – «Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction (GFAC 2021)». – CRC/Balkema. – p. 216–221.

8. 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.

Статьи в других печатных изданиях

9. Ляшенко, П.А. Анализ результатов статических испытаний натурных буровых свай в глинистых грунтах / П.А. Ляшенко, Д.В. Гохаев, **О.А. Шмидт** // Строительство и архитектура. Опыт и современные

технологии [Электронный ресурс]. – 2015. – №4. – Режим доступа: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=&s=249>.

10. Ляшенко, П.А. Оценка изменения деформационных характеристик глинистых грунтов в основании буронабивных свай при повторном нагружении / П.А. Ляшенко, Д.В. Гохаев, **О.А. Шмидт** // Вестник ПНИПУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2016. – Т.7, №4. – С. 123–132. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.4.012.

11. **Шмидт, О.А.** Выбор критерия исчерпания несущей способности свай при статических испытаниях плавно возрастающей нагрузкой разгрузки / Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – Т. 3, №3. – С. 97–102.

Патенты РФ на изобретения и полезные модели

12. Патент РФ на изобретение №2594954, МПК E02D 1/00. Тензометрический штамп / П.А. Ляшенко, В.В. Денисенко, **О.А. Шмидт**, Д.В. Гохаев, К.С. Азаренко, И.О. Саенко // Заявл. 30.12.2014; опубл. 28.07.2016, Бюл. №16.

13. Патент РФ на полезную модель №179914, МПК E04H 7/06. Резервуар для нефтепродуктов / Г.В. Серга, **О.А. Шмидт** // Заявл. 16.09.2016; опубл. 29.05.2018, Бюл. №16.

14. Патент РФ на полезную модель №179279, МПК E04H 7/02. Резервуар для нефти и нефтепродуктов / Г.В. Серга, **О.А. Шмидт** // Заявл. 16.09.2016; опубл. 07.05.2018, Бюл. №13.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 28.01.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,28. Тираж 120 экз. Заказ 7.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.