

На правах рукописи



Максимов Федор Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ
И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВИНТОВЫХ ДВУХЛОПАСТНЫХ
СВАЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

Специальность 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные
сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград, 2018 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» на кафедре «Основания и фундаменты»

Научный
руководитель:

доктор технических наук, профессор
Полищук Анатолий Иванович

Официальные
оппоненты:

Готман Альфред Леонидович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет», кафедра строительного
производства и геотехники

Акопян Владимир Феликсович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Донской государствен-
ный технический университет»,
кафедра «Инженерная геология,
основания и фундаменты»

Ведущая
организация:

ФГБОУ ВО «Новосибирский государ-
ственный архитектурно-строительный
университет»

Защита состоится «10» апреля 2018 г. в 10-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.194.02 при ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, к. Б-203.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета и на официальном сайте по ссылке <http://www.vstu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/obyavleniya-o-zashchitakh/>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Акчурин Талгат Кадимович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы приоритетным направлением в строительстве становится возведение быстровозводимых зданий, сооружений для объектов агропромышленного и промышленного назначения (тепличные комплексы, летние павильоны, логистические центры, складские помещения и др.). Такие быстровозводимые здания часто классифицируются как временные, так как имеют небольшой срок службы (10 – 20 лет). Рассматриваемые здания легко и быстро монтируются благодаря особенностям конструктивных решений. На сегодняшний день во многих зарубежных странах на долю быстровозводимых временных зданий приходится до 30% от всего объема строительства. Быстровозводимые временные здания характеризуются низким удельным весом строительных конструкций, позволяющим значительно снизить нагрузки на основание. Применение традиционных фундаментов, например, ленточных или столбчатых в практике проектирования данного вида зданий (сооружений) приводит к нерациональному вложению материальных средств и повышению трудоемкости строительства.

Для совершенствования конструктивных решений фундаментов быстровозводимых временных зданий в глинистых грунтах применяют, как правило, винтовые металлические сваи длиной до 3 м и диаметром лопастей до 0,4 м. Преимуществами фундаментов из винтовых свай являются: минимальное нарушение структуры грунта при их устройстве, возможность производства работ в условиях плотной городской застройки, высокая производительность по сравнению с «традиционными» решениями и др. Эффективность винтовых свай в глинистых грунтах возрастает, если в их конструктивном решении используются не одна, а две лопасти (винтовые двухлопастные сваи). Такое решение позволяет достичь требуемой несущей способности, уменьшив их материалоемкость. Однако до настоящего времени исследований работы двухлопастных винтовых свай в глинистых грунтах для фундаментов быстровозводимых временных зданий выполнено ограниченное количество. Поэтому тема диссертационной работы является **актуальной**.

Степень разработанности темы. Вопросами создания конструкций винтовых свай и оценки их работы занимались отечественные и зарубежные специалисты. В нашей стране наибольшее распространение получили металлические однолопастные винтовые сваи с диаметром лопасти 300–500 мм в промышленном, гражданском и сельскохозяйственном строительстве. Имеются примеры использования таких свай министерством чрезвычайных ситуаций РФ.

Отечественными учеными выполнено значительное количество экспериментальных и теоретических исследований по оценке несущей способности винтовых металлических свай при действии вдавливающих и выдергивающих нагрузок (НИИОСП, Фундаментпроект, Севзапэнергопроект и др., 1963-1980 гг.). Основываясь на результатах этих исследований в СНиП П-Б.5-67 была введена формула для расчета несущей способности винтовых однолопастных свай, которая с некоторыми уточнениями используется и в настоящее время.

В последние годы область применения винтовых свай существенно расширилась за счет их использования в составе фундаментов быстровозводимых временных зданий. Однако целый ряд вопросов, касающихся улучшения конструктивных решений винтовых свай, прогноза их несущей способности и осадок в глинистых грунтах нуждаются в совершенствовании.

Цель работы. Совершенствование конструкции и методов расчета винтовых двухлопастных свай для фундаментов быстровозводимых временных зданий, обеспечивающих эффективное их применение в глинистых грунтах.

Задачи исследований:

1. Обосновать конструкцию винтовых двухлопастных свай для фундаментов быстровозводимых временных зданий; выявить влияние конструктивных параметров на их работу в глинистых грунтах.

2. На основе экспериментальных и теоретических исследований установить несущую способность винтовых двухлопастных свай и напряженно-деформированное состояние глинистого грунта вокруг свай. Сопоставить результаты исследований с данными для винтовых однолопастных свай.

3. Обосновать расчетную схему работы винтовой двухлопастной сваи в глинистом грунте и усовершенствовать метод расчета ее осадки при действии внешней вертикальной нагрузки.

4. Выполнить опытно-промышленную апробацию результатов исследований работы винтовых двухлопастных свай при устройстве фундаментов быстровозводимых временных зданий в глинистых грунтах.

Объект исследования: винтовая металлическая двухлопастная свая в глинистых грунтах для фундаментов быстровозводимых временных зданий.

Предмет исследования: взаимодействие винтовой металлической двухлопастной сваи с глинистым грунтом основания на этапах ее устройства и работы под нагрузкой.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Экспериментально установлена эффективность работы винтовых металлических двухлопастных свай в глинистых грунтах для фундаментов быстровозводимых временных зданий. Выявлено, что при длине натуральных винтовых свай не более 3,0 м и диаметре лопасти 0,3 м рациональное расстояние между лопастями в глинистых грунтах составляет 2,0...2,5 диаметра лопасти.

2. Установлено, что в глинистых грунтах несущая способность винтовых двухлопастных свай длиной не более 3,0 м и диаметре лопасти 0,3 м на 25 - 30 % больше по сравнению с винтовыми однолопастными сваями с аналогичными геометрическими размерами.

3. Разработан метод расчета осадок одиночных винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах, позволяющий использовать данные о характеристиках грунтов, установленные на этапе инженерно-геологических изысканий. Метод базируется на применении запатентованного конструктивного решения винтовой двухлопастной сваи и предусматривает нелинейную зависимость ее осадки от прикладываемой внешней нагрузки.

Практическая значимость работы и ее использование.

Практическое значение работы состоит в том, что предложенная конструкция и метод расчета осадки винтовой двухлопастной сваи повышают надежность ее применения в глинистых грунтах для фундаментов быстровозводимых временных зданий.

Конструктивные решения винтовой двухлопастной сваи обладают патентной новизной и защищены двумя патентами РФ на полезные модели.

Результаты исследований *использованы:*

- при разработке проектной документации при строительстве тепличного комплекса в Курской области (2015 г.), комплекса сборно-разборных ангаров логистического центра в г. Челябинске (2016 г.);

- в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» при выполнении выпускных квалификационных работ студентами-бакалаврами, обучающимися по направлению подготовки «Строительство» (профиль - Промышленное и гражданское строительство), а также чтении лекций для специалистов Архитектурно-строительного института в 2014-2017 гг.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании расчетной схемы и разработке метода расчета конечной осадки одиночной винтовой двухлопастной сваи в глинистом грунте на действие вертикальной статической нагрузки.

Методология и методы исследований. При подготовке диссертации применялись в совокупности теоретические и экспериментальные методы исследований. В разделах теоретических исследований выполнялось численное моделирование работы винтовых двухлопастных свай в глинистом грунте и разрабатывался метод расчета их осадки для условий эксплуатации фундаментов быстровозводимых временных зданий. В разделе экспериментальных исследований проводились лабораторные и полевые испытания винтовых однолопастных и двухлопастных свай статическими вдавливающими нагрузками.

Положения, выносимые на защиту:

1. Конструктивное решение винтовой металлической двухлопастной сваи в глинистом грунте для фундаментов быстровозводимых временных зданий.

2. Экспериментальные и теоретические исследования работы винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах и оценка полученных результатов; сопоставление опытных и расчетных дан-

ных о несущей способности винтовых свай, их анализ и обобщение.

3. Расчетная схема винтовой двухлопастной сваи в глинистом грунте и метод расчета ее осадки на действие внешней вертикальной статической нагрузки.

4. Практическое использование полученных результатов работы винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах и направления дальнейших исследований в составе фундаментов быстровозводимых временных зданий.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения; пункту 3 – «Разработка новых методов расчета, высокоэффективных конструкций и способов устройства подземных сооружений промышленного и гражданского назначения» и пункту 7 – «Разработка новых методов расчета, конструирования и устройства оснований, фундаментов и подземных сооружений при реконструкции, усилении и ликвидации аварийных ситуаций».

Достоверность результатов научных исследований и выводов диссертационной работы базируется на использовании основных теоретических положений механики грунтов, механики твердого и деформируемого тела, математической статистики и подтверждена необходимым объемом экспериментальных исследований, выполненных на поверенном оборудовании, а также использованием сертифицированных и лицензионных программных комплексов при выполнении численного моделирования.

Апробация результатов исследований. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на трех научно-технических конференциях с международным участием по геотехнике, механике грунтов, основаниям и фундаментам в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете (СПбГАСУ, С-Петербург, 2013-2015 гг.), восьмой Всеукраинской научно-технической конференции «Механика грунтов, геотехника и фундаментостроение» (ПолтНТУ, Полтава, 2013 г.), VIII-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Научное обеспечение АПК», секция - Строительство и водное хозяйство

(КубГАУ, Краснодар, 2014 г.), Международной научно-технической конференции «Строительство, архитектура и технологическая безопасность» (НИУ ЮУрГУ, Челябинск, 2017 г.), научных семинарах кафедры «Основания и фундаменты» Кубанского государственного аграрного университета им. И.Т. Трубилина (КубГАУ, Краснодар, 2014, 2016, 2017 гг.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано одиннадцать научных работ. Четыре статьи опубликованы в научных журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций. Также опубликована 1 статья, входящая в журналы, индексируемые в международных базах цитирования *Scopus* и др. По результатам исследований получено два патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 126 наименований и 4 приложений. Общий объем работы составляет 161 страницы, который включает 69 рисунков, 11 таблиц.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю заслуженному строителю РФ, доктору техн. наук, профессору А.И. Полищуку за постоянную поддержку, консультации и внимание к работе. Соискатель признателен всем сотрудникам кафедр «Основания и фундаменты» КубГАУ (г. Краснодар) и «Строительные конструкции и сооружения» НИУ ЮУрГУ (г. Челябинск) за внимание к работе и поддержку выбранного направления исследований.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, приводятся научная новизна и практическое значение работы; изложены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и общей структуре работы.

В первой главе излагается состояние вопроса о применении винтовых свай для устройства фундаментов зданий, сооружений. Созданием конструкций винтовых свай, машин и механизмов для их погружения, исследованиями взаимодействия свай с основани-

ем занимались Акопян В.Ф., Бахолдин Б.В., Богорад Л.Я., Готман А.Л., Железков В.Н., Ильичев В.А., Иродов М.Д., Лебедев С.В., Луга А.А., Мангушев Р.А., Мариупольский Л.Г., Нуждин Л.В., Пенчук В.А., Полищук А.И., Пономарев А.Б., Пономаренко Ю.Е., Трофименков Ю.Г., Толмачев Э. Л., Murashev A.K., Perko H.A., Rao S.N., Prasad Y.V.S.N., Mitsch M.P., Clemence S.P., Hoyt R.M., Zhang D.J.Y, Weech C. N., Pack J. S. и др. В нашей стране винтовые сваи стали широко применяться с середины прошлого столетия. Анализ работ отечественных специалистов показывает, что в основном исследования направлены на разработку конструкций винтовых свай, обеспечивающих снижение энергоемкости процесса их ввинчивания. Методы расчета в России посвящены оценке несущей способности винтовых свай как на сжимающие, так и выдергивающие нагрузки. Зарубежные исследования чаще направлены на получение расчетных соотношений между крутящим моментом при ввинчивании свай и их несущей способностью по грунту. В настоящее время отечественными и зарубежными специалистами созданы эмпирические формулы для определения несущей способности винтовых свай, которые учитывают влияние физико-механических свойств грунтов и геометрических параметров на сопротивления их ввинчиванию.

Для винтовых свай с диаметром лопастей 300-400 мм и малым диаметром ствола (до 140 мм) актуален вопрос их долговечности в грунте. В рассматриваемой главе приводится краткий обзор исследований о влиянии условий эксплуатации винтовых металлических свай на их коррозию. Рассмотрен механизм ее протекания в грунтовой среде и используемые при этом защитные покрытия.

Проектирование винтовых свай выполняется, как правило, на базе известных конструктивных решений с учетом рекомендаций нормативных документов и другой технической литературы. Для повышения несущей способности винтовых свай в практике проектирования принимают обычно решения об увеличении их длины, диаметра ствола или лопасти. Такие изменения конструкций винтовых свай увеличивают их материалоемкость и снижает эффективность применения. Более перспективным подходом повышения несущей способности винтовых свай является увеличение количества лопастей на их стволе. Однако до настоящего времени

отсутствуют пока рекомендации по выбору рационального конструктивного решения винтовых двухлопастных свай, обеспечивающих их надежную работу в глинистом грунте. На основании анализа рассмотренных материалов были сформулированы цель и задачи исследований.

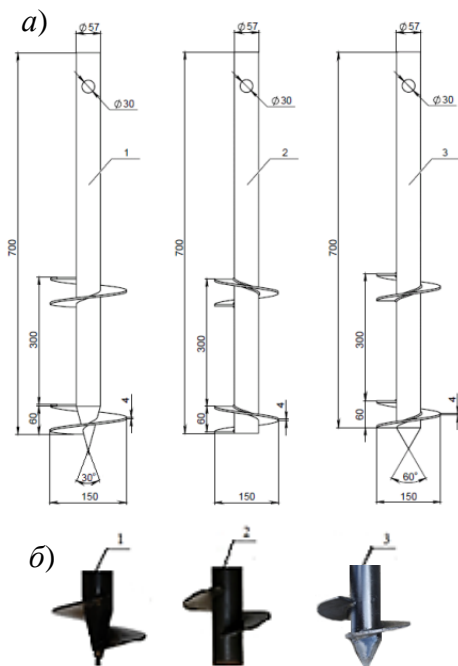


Рисунок 1 – Модели винтовых двухлопастных свай для лабораторных экспериментальных исследований: а - схемы конструктивных решений винтовых двухлопастных свай; б - общий вид фрагментов моделей винтовых свай; 1 - винтовая двухлопастная свая с нижней лопастью, расположенной на конической части (вариант 1); 2 - винтовая двухлопастная свая с нижней лопастью на стволе сваи без конуса (вариант 2); 3 - винтовая двухлопастная

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований работы винтовых металлических свай в глинистых грунтах. Автором были предложены различные конструкции винтовых двухлопастных свай для проведения экспериментальных исследований (лабораторных и полевых).

В лабораторных условиях оценивалось влияние расположения нижней лопасти на стволе сваи, а также угла вершины конуса нижней части ствола на ее несущую способность в глинистом грунте. Эксперименты проводились для трех вариантов конструктивных решений винтовых двухлопастных свай, которые могут применяться при строительстве зданий, сооружений (рисунок 1).

Расстояние между лопастями было выполнено кратно шагу винтовой лопасти с тем, чтобы последующая лопасть ввинчивалась по пути, пройденному нижней лопастью, тем самым не нарушая структуру грунта. Для всех свай шаг винтовой лопасти принят одинаковым. Углы при вершине конуса для варианта 1 и варианта 3 составляли 30° и 60° соответственно (рисунок 1). Остальные геометрические параметры (диаметр ствола и лопастей, длина моделей свай, расстояние между лопастями) были приняты также одинаковыми.

Лабораторные экспериментальные исследования проводились в лотке на искусственно приготовленном глинистом грунте – глине текучепластичной и полутвердой консистенции. Глинистый грунт, отобранный из котлована, высушивали до воздушно-сухого состояния, затем его измельчали в шаровой мельнице до порошкообразного состояния. Исходя из задаваемой консистенции грунта, рассчитывали соответствующие значения его влажности. Данные о физико-механических характеристиках глинистого грунта для лабораторных экспериментов приведены в диссертации. Модели винтовых двухлопастных свай ввинчивались на глубину 0,6 м вручную с использованием динамометрического устройства специальной конструкции, позволяющего регистрировать крутящий момент. За частное значение предельного сопротивления винтовой двухлопастной сваи по грунту принимали нагрузку, предшествующую ее срыву, который характеризовался интенсивным ростом осадки, не затухающей во времени на последней ступени. По результатам испытаний были построены графики «осадка-нагрузка» для рассматриваемых грунтов. Было установлено, что наибольшей несущей способностью обладают модели винтовых двухлопастных свай с нижней лопастью, расположенной на цилиндрической части ствола (вариант 3). Такая закономерность наблюдается как для полутвердых глинистых грунтов, так и для текучепластичных. При этом выявлено, что несущая способность модели винтовой двухлопастной сваи, изготовленной по 3 варианту, примерно на 10 – 12 % больше по сравнению с моделью сваи, изготовленной по варианту 1. Отмеченное увеличение несущей способности модели винтовой сваи по варианту 3 связано с эффективностью уплотнения грунта в уровне ее нижней лопасти

при вершине конуса ствола, равном 60° . Результаты лабораторных исследований легли в основу постановки натурных экспериментов в полевых условиях.

Основная задача при натурных (полевых) испытаниях заключалась в выявлении рационального расстояния (шага) между лопастями и оценка его влияния на несущую способность винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах. Натурные испытания винтовых свай проводились на опытной площадке, сложенной глинистым грунтом – глиной преимущественно полутвердой консистенции, залегающей до глубины 4,1 м от уровня природного рельефа. Глина опытной площадки, используемая в качестве основания для винтовых свай, имела следующие физико-механические характеристики: плотность – $1,94 \text{ г/см}^3$; естественная влажность – 23 %; число пластичности – 0,26; показатель текучести – 0,12; коэффициент водонасыщения – 0,87; угол внутреннего трения – 18° ; удельное сцепление – $0,047 \text{ МПа}$; модуль общей деформации – 14 МПа .

Методика проведения испытаний натурных винтовых свай предусматривала две серии экспериментов. В первой серии экспериментальных исследований выяснялся вопрос о рациональном расстоянии L между лопастями. Вторая серия экспериментов была посвящена оценке несущей способности натурных винтовых двухлопастных свай F_d по сравнению с винтовыми сваями, имеющими одну лопасть.

В первой серии экспериментальных исследований использовались сваи, имеющие различные значения параметра L/D , равные 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 (L , D -соответственно шаг и диаметр лопастей). Результаты испытаний (первая серия экспериментов) показали, что при расстоянии L между лопастями $2,0 \dots 2,5 D$ обеспечивается наибольшая несущая способность винтовых двухлопастных свай F_d по грунту. После откапывания винтовых двухлопастных свай и их извлечения было выявлено, что грунт, заключенный между лопастями, приобретает форму «грунтового цилиндра» и начинает работать как единый цельный элемент совместно со стволом свай, взаимодействуя с окружающим грунтом. По результатам экспериментальных исследований (первая серия экспериментов) был построен график, характеризующий зависимость

геометрического параметра L/D и несущей способности винтовых двухлопастных свай F_d . (рисунок 2).

По результатам параллельных испытаний (вторая серия экспериментов) натуральных винтовых свай и их обобщения были построены графики «осадка-нагрузка». Значение несущей способности для однолопастных свай составило $F_d = 48$ кН, а для двухлопастных – $F_d = 64$ кН (рисунок 3). Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что в глинистых грунтах при устройстве второй лопасти ($L/D = 2,0 \dots 2,5$) происходит повышение несущей способности винтовой двухлопастной сваи на 25 - 30% по сравнению с несущей способностью сваи с одной лопастью.

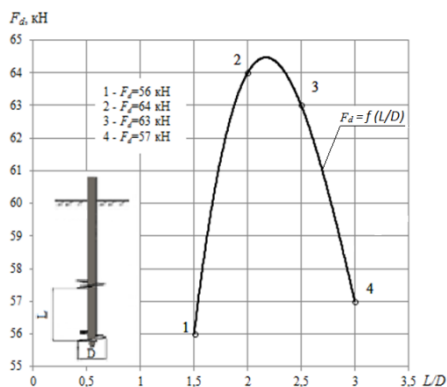


Рисунок 2 – Зависимость несущей способности винтовой двухлопастной сваи от параметра L/D (L , D – соответственно шаг между лопастями и их

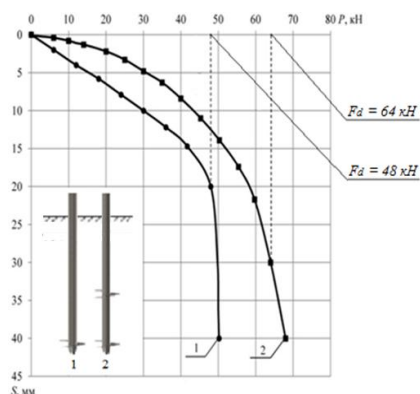


Рисунок 3 – Графики осадок натуральных винтовых свай, установленные по результатам полевых экспериментальных исследований: 1, 2 – соответственно, для свай с одной и двумя лопастями

Для оценки взаимодействия боковой поверхности ствола винтовых свай с глинистым грунтом были проведены экспериментальные исследования. Предварительно была разработана конструкция натурной тензометрической винтовой однолопастной сваи (тензосваи) длиной 2,5 м, диаметрами ствола и лопасти 0,108 м и 0,3 м соответственно. Для преобразования механических деформаций ствола сваи в электрический сигнал применялись

тензорезисторы марки ПКБ-10-100ХА, которые наклеивались на ее боковую поверхность по специальной методике.

Свая нагружалась ступенями по 3–6 кН до потери несущей способности. Было выявлено, что в процессе нагружения сваи внешняя нагрузка N перераспределяется между стволом и лопастью. При нагрузке близкой к предельной общая несущая способность винтовой сваи F_d обеспечивается в основном за счет работы основания под лопасть (F_{dR}). В целом, по результатам экспериментов было установлено, что сопротивление (трение) грунта f по боковой поверхности металлического ствола винтовой сваи может не учитываться в расчетах ее несущей способности. Доля внешней нагрузки N при этом для свай длиной 2,5 м в глинистом грунте не превышает 5-10 % от ее общей несущей способности F_d .

В третьей главе представлены результаты численного исследования взаимодействия винтовых двухлопастных и однолопастных свай с глинистым грунтом основания. Численное исследование выполнялось на базе программного комплекса «*Midas GTS NX*» (далее *Midas*) для моделирования работы рассматриваемых винтовых свай. При создании расчетной схемы в ПК *Midas* были использованы исходные данные и параметры, соответствующие реальным условиям статических испытаний винтовых свай, описанных во второй главе. Процесс установления параметров грунта для моделирования работы винтовых свай является важнейшей составляющей обеспечения качества оценки напряженно деформированного состояния грунтового массива.

Для выяснения механизма взаимодействия винтовых свай с глинистым грунтом была выполнена оценка напряженно-деформированного состояния основания вокруг свай на базе упругопластической модели с отдельным описанием объемных и сдвиговых деформаций (Modified Mohr-Coulomb Model). На основе полученных результатов численных исследований были построены графики «осадка – нагрузка» и установлена несущая способность винтовых свай (двухлопастных и однолопастных). Результаты моделирования работы винтовых свай были сопоставлены с данными полевых экспериментальных исследований (рисунк 4).

Установлено, что предельное состояние грунта для однолопастной сваи (рисунок 4 *а*) наступает за счет пластических деформаций, возникающих за счет развития касательных напряжений τ_{yz} от лопасти сваи в стороны и вверх. По мере увеличения внешней нагрузки напряжения τ_{yz} смыкаются на некотором расстоянии над лопастью. Такой механизм развития касательных напряжений τ_{yz} и распространения зоны сдвигов грунта объясняет эффект «срыва» однолопастной сваи, наблюдаемый в полевых экспериментах при осадках 15- 20 мм и более. Для двухлопастной сваи (рисунок 4 *б*) на основе численных исследований установлено, что перемещение частиц в окрестности нижней лопасти сваи направлено преимущественно в стороны и вниз, что исключает «смыкание» областей предельного состояния грунта над нижней лопастью сваи, что объясняет отсутствие выраженного эффекта «срыва» двухлопастной сваи.

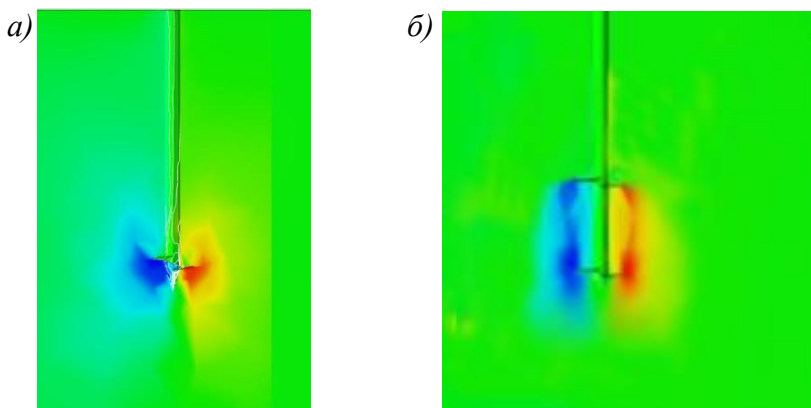


Рисунок 4 – Распределение касательных напряжений τ_{yz} вокруг ствола винтовых свай: *а* - для однолопастной сваи; *б* - для двухлопастной сваи

Анализ данных численного исследований и результатов натурных экспериментов подтверждают схему взаимодействия винтовой двухлопастной сваи с глинистым грунтом основания. Выявлено, что глинистый грунт (1), заключенный между лопастями (2,3) винтовой двухлопастной сваи при ее нагружении приобретает форму «грунтового цилиндра» (4) и начинает работать

как единый цельный элемент совместно с ее стволом (5) (рисунок 5).

Наиболее качественно «грунтовой цилиндр» формируется у свай с расстоянием L между лопастями 2,0...2,5 их диаметра ($L = 2,0 - 2,5 D$). Наличие «грунтового цилиндра» (4) приводит к увеличению площади боковой поверхности винтовой двухлопастной сваи на участке между лопастями и повышению ее несущей способности F_d в целом. Внешняя нагрузка N , действующая на винтовую двухлопастную сваю, воспринимается окружающим грунтом через сопротивление грунта f на контакте с боковой поверхностью «грунтового цилиндра» и через сопротивление грунта R под нижней лопастью сваи. Сопротивление грунта f по боковой поверхности стального гладкого ствола (5) винтовой сваи (на участке ствола выше второй лопасти) может не учитываться, так как доля этой нагрузки не превышает 5–10% от ее общей несущей способности F_d . Вышеизложенное дает основание считать, что схема взаимодействия винтовых двухлопастных свай с глинистым грунтом основания не отличается существенно от схемы взаимодействия висячих свай.

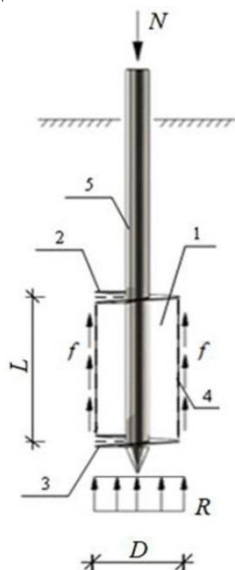


Рисунок 5 – Схема взаимодействия винтовой двухлопастной сваи с глинистым грунтом: 1-глинистый грунт; 2,3 – соответственно, верхняя и нижняя лопасти винтовой двухлопастной сваи; 4- боковая поверхность «грунтового цилиндра» (внешний контур); 5 – ствол винтовой сваи; L – расстояние между лопастями; N – внешняя вдавливающая нагрузка на сваю; f – сопротивление (трение) грунта по боковой поверхности «грунтового цилиндра»; R – сопротивление грунта под нижней лопастью; D – диаметр лопасти

В четвертой главе представлено практическое использование полученных результатов и сформулированы направления даль-

нейших исследований. На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований разработан метод расчета конечной осадки одиночных винтовых двухлопастных металлических свай длиной от 1,5 до 3,0 м в глинистых грунтах для фундаментов быстровозводимых временных зданий.

При определении теоретической зависимости осадки винтовой двухлопастной сваи от внешней нагрузки $S=f(N)$ учитывалась ее раздельная работа нижнего конца и боковой поверхности в глинистом грунте. Принимаем, что на первом этапе нагружения винтовой двухлопастной сваи (до нагрузки N_1) внешняя нагрузка N перераспределяется между боковой поверхностью «грунтового цилиндра» и нижней лопастью. Первый этап нагружения характеризуется равномерным (линейным) ростом осадки S и завершается некоторой величиной осадки S_1 , после достижения которой происходит «срез» грунта по боковой поверхности «грунтового цилиндра» (рисунок 6). По предложению Б.И. Далматова и др., осадка сваи, сформированная в момент полной реализации сопротивления (трения) грунта по его боковой поверхности f , называется «сдвиговой».

Внешняя нагрузка N_1 , соответствующая окончанию линейной зависимости на графике осадок $S=f(N)$, составляет:

$$N_1 = N_f + N_R, \quad (1)$$

где N_f – часть внешней нагрузки, передаваемой на околосвайный массив грунта боковой поверхностью «грунтового цилиндра», кН; N_R – то же, передаваемой на грунт основания нижней лопастью винтовой двухлопастной сваи на этапе окончания линейной зависимости осадки $S=f(N)$, кН.

При увеличении внешней нагрузки N ($N > N_1$) начинает происходить проскальзывание (срез) грунта вдоль боковой поверхности «грунтового цилиндра». С этого момента наступает второй этап нагружения винтовой двухлопастной сваи, на котором полностью проявляется работа нижней лопасти в грунте. При этом график $S=f(N)$ имеет нелинейную зависимость. Второй этап нагружения винтовой двухлопастной сваи завершается при достижении внешней нагрузки N_2 , которая соответствует полному исчерпанию несущей способности сваи по грунту и нестабилизированной (провальной) осадке S_2 .

Нагрузка N , находящаяся на графике (рисунок 6) в диапазоне нелинейной зависимости осадки $S=f(N)$, составляет ($N_1 < N < N_2$):

$$N = N_1 + \Delta N, \quad (2)$$

где N_1 – то же, что и в формуле (1), кН; ΔN – приращение нагрузки на винтовую двухлопастную сваю с момента окончания линейной зависимости на графике осадок $S=f(N)$ (на участке от N_1 до N_2), кН.

Конечная осадка винтовой двухлопастной сваи S при заданной нагрузке N равна сумме осадок S_1 и ΔS (рисунок 6):

$$S = S_1 + \Delta S \quad (3)$$

где S_1 – осадка, сформированная на первом этапе нагружения винтовой двухлопастной сваи (за счет деформаций грунта при сдвиге вокруг боковой поверхности «грунтового цилиндра» и его уплотнения под нижней лопастью), мм; ΔS – приращение осадки винтовой двухлопастной сваи на втором этапе ее нагружения (за счет развития деформаций грунта в основании нижней лопасти сваи), мм.

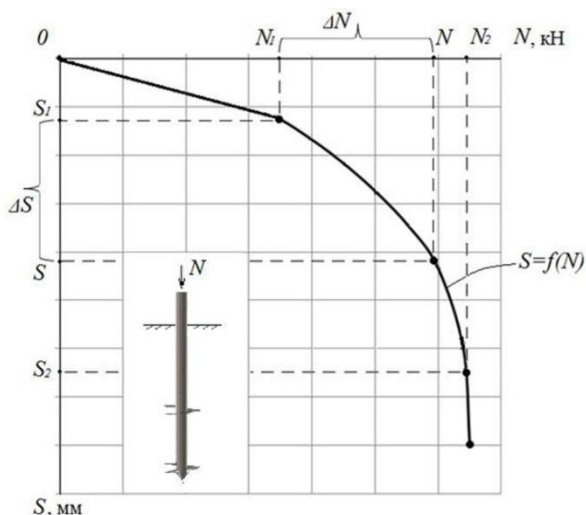


Рисунок 6 – Схема нагружения винтовой двухлопастной сваи в глинистом грунте

Вначале определим осадку S_1 , которую получает винтовая двухлопастная свая на первом этапе нагружения (при $N=N_1$). Воспользуемся методом *M.F. Randolph* и др. (1978 г.), авторы которого

го при выводе формулы считали, что нагружение сваи сопровождается развитием преимущественно сдвиговых деформаций в околосвайном массиве грунта. Деформации грунта вокруг сваи авторы условно принимали в виде концентрических цилиндров, на гранях которых действуют касательные напряжения (τ, τ_0, τ_m) .

Исходная формула для определения вертикального перемещения сваи w , обусловленное действием касательных напряжений (τ, τ_0, τ_m) , вдоль ее боковой поверхности имеет вид:

$$w = \frac{\tau_0 r_0}{G} \int_{r_0}^{r_m} \frac{dr}{r} = \frac{\tau_0 r_0}{G} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right), \quad (4)$$

где r – горизонтальное расстояние от вертикальной оси сваи z до любой границы в пределах линейно-деформируемой области околосвайного массива грунта, м; r_m – горизонтальное расстояние от вертикальной оси сваи z до области, где касательными напряжениями в массиве окружающего грунта можно пренебречь, м; r_0 – радиус лопасти сваи, м; τ_0 – касательные напряжения, действующие на боковой поверхности «грунтового цилиндра», кПа; G – начальный модуль сдвига грунта, кПа.

Считаем, что осадка S_1 , происходит одновременно от нагрузки N_f (за счет сдвига грунта по боковой поверхности «грунтового цилиндра» - S_f) и от нагрузки N_R (за счет уплотнения грунта в основании нижней лопасти - S_R). Принимая, что значения осадок равны между собой (из условия неразрывности) имеем:

$$S_1 = S_f = S_R. \quad (5)$$

Подставляя в формулу (4) выражения r_0 , r_m , τ_0 и принимая $w = S_1$ после несложных преобразований получим формулу для определения осадки винтовой двухлопастной сваи на первом этапе ее нагружения

$$S_1 = S_f = S_R = 1,15 \cdot \frac{N_f}{\pi L C}, \quad (6)$$

где N_f – то же, что и в уравнении (1). L – высота «грунтового цилиндра (расстояние между лопастями), м. G – то же, что и в формуле (4).

Определим теперь приращение осадки ΔS от приращения нагрузки ΔN на втором этапе ее нагружения (при $N > N_I$). Воспользуемся методом М.В. Малышева и Н.С. Никитиной (1982 г.). Этот метод был разработан для расчета осадок фундаментов мелкого заложения в нелинейной стадии деформирования грунта и предполагает гиперболическую зависимость между осадкой и давле-

нием p по их подошве. Заменяя давления p , действующих по подошве фундамента, на значения нагрузок N , передаваемых через нижнюю лопасть в конце первого (N_1) и второго (N_2) этапов нагружения винтовой двухлопастной сваи и после несложных преобразований получим формулу для определения приращения осадки ΔS (рисунок 6):

$$\Delta S = S_1 \frac{\Delta N(N_n - N_R) - (\Delta N - N_R) \cdot N_R}{N_R(N_n - \Delta N)} \quad (7)$$

где N_n - нагрузка, соответствующая исчерпанию несущей способности основания нижней лопасти сваи при внешней нагрузке N_2 в соответствии с п. 5.7.11 СП 22.13330.2011. Остальные обозначения те же, что и в формулах (1) - (3).

Определим теперь полную осадку винтовой двухлопастной сваи S накопленную на первом и втором этапах нагружения в соответствии с условием (3). Формулу для определения конечной осадки S , вызванной действием нагрузки N ($N_1 < N < N_2$) (рисунок 6) запишем в виде:

$$S = S_1 + \Delta S = S_1 + S_1 \frac{\Delta N(N_n - N_R) - (\Delta N - N_R) \cdot N_R}{N_R(N_n - \Delta N)} \quad (8)$$

Для оценки достоверности предложенного метода расчета осадок винтовых двухлопастных свай было выполнено сопоставление полученных результатов с данными полевых экспериментальных исследований (глава 2). Было установлено, что в диапазоне внешних нагрузок $N = (0,4-0,8)N_2$ на винтовые двухлопастные сваи значения экспериментальных и расчетных осадок отличаются в пределах 20-30%. Таким образом, полученная формула (8) позволяет прогнозировать конечные осадки винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах.

Отдельным параграфом в диссертации (глава 4) приводятся рекомендации по расчету осадок винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах и практическое использование результатов исследований. Излагается практический пример расчета конечной осадки одиночной винтовой двухлопастной сваи в глинистом грунте.

Для совершенствования конструктивных решений винтовых двухлопастных свай и методов их проектирования автором в главе 4 сформулированы также направления дальнейших исследований.

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. По данным экспериментальных и теоретических исследований установлено рациональное конструктивное решение винтовых металлических двухлопастных свай в глинистых грунтах для фундаментов быстровозводимых временных зданий. Одним из основных параметров, характеризующих работу таких свай в глинистых грунтах, является расстояние L между лопастями. При длине натуральных винтовых свай до 3,0 м и диаметре лопасти 0,3 м рациональное расстояние L между лопастями в глинистых грунтах составляет 2,0...2,5 диаметра лопасти.

2. Результаты экспериментальных исследований показали, что в глинистых грунтах несущая способность винтовых двухлопастных свай F_d длиной 1,5-3,0 м и диаметром лопасти 0,3 м на 25-30% больше по сравнению с винтовыми однолопастными сваями аналогичных геометрических размеров.

3. Экспериментально установлено, что в глинистых грунтах несущая способность винтовой однолопастной сваи (диаметр ствола не более 0,108 м, длина сваи не более 3,0 м) по боковой поверхности ствола F_{df} не превышает 5-10% от величины ее общей несущей способности F_d . Из этого следует, что повышение несущей способности винтовой однолопастной сваи за счет увеличения диаметра ее ствола нельзя считать эффективным решением. Наиболее эффективным решением повышения F_d является устройство на стволе винтовой сваи второй дополнительной лопасти.

4. Анализ данных численных и экспериментальных исследований подтверждает схему взаимодействия винтовой двухлопастной сваи с глинистым грунтом основания. Выявлено, что глинистый грунт, заключенный между лопастями винтовой двухлопастной сваи, приобретает форму «грунтового цилиндра» и начинает работать как единый цельный элемент совместно с ее стволом при нагружении внешней нагрузкой. Наличие «грунтового цилиндра» приводит к увеличению площади боковой поверхности винтовой двухлопастной сваи на участке между лопастями и повышению ее несущей способности F_d в целом. Экспериментально установлена зависимость изменения несущей способности винтовой двухлопастной сваи F_d от геометрического параметра L/D

5. На основе численных исследований установлено, что предельное состояние грунта для винтовой однолопастной сваи

наступает за счет смыкания касательных напряжений на некотором расстоянии над лопастью. Такой механизм их развития объясняет эффект «срыва» винтовой однолопастной сваи, наблюдаемый в полевых экспериментах при осадках 15-20 мм. Для двухлопастной сваи предельное состояние грунта наступает по контуру области, которая формируется между лопастями и приобретает форму «грунтового цилиндра», взаимодействующего с основанием. Отсутствие выраженного эффекта «срыва» двухлопастной сваи можно объяснить развитием пластических деформаций в основании нижней лопасти преимущественно вниз и в стороны.

6. На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований разработан метод расчета осадки винтовых двухлопастных металлических свай длиной от 1,5 до 3,0 м в глинистых грунтах для фундаментов быстровозводимых временных зданий. Метод основан на использовании запатентованного конструктивного решения винтовой двухлопастной сваи и предусматривает нелинейную зависимость ее осадки от прикладываемой нагрузки. Установлено, что для глинистых грунтов полутвердой консистенции расхождение экспериментальных значений конечных осадок винтовых двухлопастных свай с данными расчета по предлагаемому методу не превышает 20-30 %. Разработаны рекомендации по расчету осадки винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах для фундаментов быстровозводимых временных зданий.

4. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах:

1. Максимов, Ф. А. Методика оценки крутящего момента при устройстве винтовых свай / Ф. А. Максимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – №1. – С.14–18.
2. Максимов, Ф. А. Оценка работы боковой поверхности ствола винтовой металлической сваи в глинистом грунте / Ф. А. Максимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – №2. – С.14–18.
3. Полищук, А. И. Инженерный метод расчета осадки винтовой двухлопастной сваи в глинистом грунте / А. И. Полищук, Ф. А. Максимов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 6. – С.9-14.
4. Полищук, А. И. Совершенствование конструкции винтовых свай для фундаментов временных зданий / А. И. Полищук, Ф. А.

Максимов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 4. – С. 37–40.

Публикации в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus:

5. Polishchuk, A. I. Numerical Analysis of Helical Pile–Soil Interaction under Compressive Loads [Электронный ресурс] / A. I. Polishchuk, F. A. Maksimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – 262012099. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757899X/262/1/012099/pdf>.

В других изданиях:

6. Максимов, Ф. А. Исследования совместной работы двухлопастной винтовой сваи с грунтом в лабораторных условиях. / Ф. А. Максимов, Е. Н. Серебренникова, М. М. Скоморохов // Сборник научных статей конференции «Геотехника: теория и практика». – СПб.: СПбГАСУ, 2013. С.52-55.

7. Полищук, А. И. Винтовые двухлопастные сваи и перспективы их использования для фундаментов временных зданий / А. И. Полищук, Ф. А. Максимов, И. В. Болгов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: материалы Всерос. науч.- практ. конф. молодых ученых (2-4 декабря 2014 г.). – Краснодар: КубГАУ, 2014. – С.232 - 234.

8. Полищук, А. И. Винтовые металлические сваи и обоснование их конструктивного решения для фундаментов быстровозводимых временных зданий / А. И. Полищук, Ф. А. Максимов // Сборник научных трудов, посвященный 60-летию Заслуженного изобретателя СССР, Лауреата Премии Совета Министров СССР, Академика РАЕН Габиева Фахраддина Гасан оглы. Баку, 2016. – С.156-164.

9. Полищук, А. И. Обоснование конструктивного решения винтовых свай для фундаментов быстровозводимых временных зданий / А. И. Полищук, Ф. А. Максимов // Вестник ПНИПУ. – 2015. – №4. – С.62-75.

Патенты РФ на полезную модель:

10. Пат. 139824 Российская Федерация, МПК7 E 02 D 5/56. Винтовая свая / Ф.А Максимов., С.Ю Павлов., М.М Скоморохов, А.И. Полищук. - №2013149441; заявл.06.11.2013;опубл. 27.04.2014, Бюл.№12. – 1 с.

11. Пат. 151668 Российская Федерация, МПК7 G01L 1/22. Динамометр для измерения крутящих моментов при ввинчивании металлических свай / Ф. А. Максимов, А. И. Полищук, С. Ю. Павлов, М. М. Скоморохов, Е. Е. Рихтер. - № 2014126113; заявл. 26.06.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10. – 2 с.

Подписано к печати 05.02.2018
Формат 60х84 1/16 Объем 1,0 уч. – изд.л
Тираж 120 экз.
Отпечатано на ризографе в типографии «Вера»
454091, г. Челябинск, ул. Свободы 22, офис 2