

На правах рукописи



Чернявский Денис Алексеевич

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДА
РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ КОНИЧЕСКИХ
СВАЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

Специальность **05.23.02** –
Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2020 г.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина».

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Полищук Анатолий Иванович
- Официальные оппоненты: **Готман Альфред Леонидович**
доктор технических наук, профессор,
АО «НИЦ Строительство» – НИИОСП
им. Н. М. Герсевича, г. Москва экспертно-аналитический отдел, главный специалист;
Пономарев Андрей Будимирович
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Строительное производство и геотехника», заведующий;
- Ведущая организация ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин).

Защита диссертации состоится «29» декабря 2020 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.07** 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: (812) 316-58-72; "g/o ckn"rector@spbgasu.ru

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

Автореферат разослан «23» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Конюшков Владимир Викторович

1. Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В последние годы в строительстве получили широкое распространение свайные фундаменты из буронабивных свай, которые устраиваются в пробуренных скважинах путем инъекции в них под давлением мелкозернистой бетонной смеси. Такие сваи выполняются обычно длиной от 6 до 15 м преимущественно в глинистых грунтах для отдельно стоящих и ленточных фундаментов зданий, сооружений. Они обладают достаточной несущей способностью при малых диаметрах за счет технологических особенностей формирования ствола. Несущая способность буронабивных свай в глинистых грунтах при длине 7–8 м составляет от 350 до 600 кН (А. Л. Готман, 2015; Р. А. Мангушев и др., 2015).

Для повышения несущей способности буронабивных свай в глинистых грунтах их боковая поверхность может быть выполнена не цилиндрической, а конической с углом наклона боковой поверхности 2–3 градуса к вертикали. Рассматриваемые конструктивные решения получили название «конические сваи». Они могут устраиваться длиной от 3 до 8 м и армироваться пространственными каркасами или одним металлическим стержнем вдоль центральной оси сваи. Эффективность буронабивных конических свай обеспечивается в основном за счет их формы и развитой боковой поверхности по сравнению с цилиндрическими сваями равного объема и одинаковой длины. Предлагаемое конструктивное решение конической сваи позволяет достичь требуемой несущей способности, уменьшив при этом ее материалоемкость. Наибольшую эффективность такие сваи могут показать при строительстве в сейсмоопасных регионах, а также при реконструкции и восстановления зданий. Однако до настоящего времени исследований работы буронабивных конических свай в глинистых грунтах выполнено недостаточное количество. Поэтому тема диссертации является **актуальной**.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие методов расчета и конструирования конических свай (набивных и забивных) внесли отечественные ученые А. А. Бартоломей, Б. В. Бахолдин, А. Л. Готман, В. К. Дмоховский, Я. Ш. Зиязов, Ф. К. Лапшин, А. А. Луга, Р. А. Мангушев, А. Б. Пономарев, А. И. Рыбников, В. Г. Федоровский и др. Анализ публикаций указанных авторов показывает, что в настоящее время имеется значительный объем данных по конструированию и способам устройства конических свай в глинистых грунтах. Известны

конструктивные решения набивных пирамидальных свай, которые по характеру работы наиболее близко отвечают набивным коническим сваям. Конструктивные решения и методы расчета буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах развития пока не получили.

Объект исследований. Объектом исследования является буроинъекционная коническая свая в глинистом грунте.

Предмет исследований. Предметом исследования является взаимодействие буроинъекционной конической сваи с глинистым грунтом основания на стадии ее эксплуатации.

Цель диссертационной работы заключалась в разработке эффективного конструктивного решения буроинъекционной конической сваи и метода расчета несущей способности в глинистых грунтах, обеспечивающих надежность ее эксплуатации в составе фундаментов зданий и сооружений.

Задачи исследования:

1. Проанализировать существующие конструктивные решения буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах и методы их расчета на действие вертикальных статических нагрузок;

2. Разработать эффективное конструктивное решение буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах и методику компьютерного моделирования ее работы;

3. На базе ПК *Midas GTS NX* выполнить моделирование работы буроинъекционной конической сваи в глинистом грунте различной разновидности и выявить зависимость ее осадки от прикладываемой внешней нагрузки;

4. Разработать инженерный метод расчета несущей способности буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах на действие вертикальной статической вдавливающей нагрузки;

5. Выполнить апробацию результатов исследований работы буроинъекционных конических свай и сформулировать направления их дальнейшего развития для проектирования фундаментов в условиях нового строительства и реконструкции зданий.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

1. Предложено конструктивное решение устройства буроинъекционной сваи, которое позволяет выполнять ее по форме продольного разреза близкой к конической, и которое обеспечивает в 1,15–1,25 раза большую несущую способность по сравнению с буроинъекционной цилиндрической сваей такой же длины.

2. Разработана методика компьютерного моделирования работы буринъекционных конических свай в глинистых грунтах, позволяющая повысить точность численных расчетов за счет рационального подбора значений коэффициента взаимодействия (R_c) модели сваи с грунтом, выбора количества узлов сетки конечных элементов и рациональной их компоновки.

3. Выполнена оценка влияния геометрических параметров буринъекционных конических свай на их несущую способность в глинистых грунтах; установлено, что изменение угла наклона боковой поверхности буринъекционных конических свай длиной 3–8 м от 0 до 2 град приводит к повышению их несущей способности на 15–25 %.

4. Разработан инженерный метод расчета несущей способности буринъекционных конических свай в глинистых грунтах, который базируется на использовании данных запатентованного конструктивного решения и учитывает изменения прочностных характеристик уплотненных глинистых грунтов вокруг ствола сваи.

Теоретическая, практическая значимость работы и ее использование

Теоретическая значимость работы заключается в развитии расчетной схемы и разработке метода расчета несущей способности буринъекционной конической сваи в глинистых грунтах на действие вертикальной статической нагрузки.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная конструкция, инженерный метод расчета и рекомендации по проектированию буринъекционных конических свай в глинистых грунтах, могут быть использованы в практике проектирования фундаментов зданий и сооружений. Конструктивные решения буринъекционной конической сваи обладают патентной новизной и защищены патентами РФ на изобретения (патенты РФ: 2425924, 2514261, 2524077, 26726980).

Результаты исследований использованы:

– при проектировании фундаментов мачт освещения на объекте: «Спортивно-туристический комплекс «Горная карусель» (г. Сочи) некоммерческого предприятия АО «Красная поляна», а также жилого здания на объекте) «Многоэтажный жилой комплекс со встроенно-пристроенными помещениями общественного назначения по ул. Обрывная, 132/1, г. Краснодар», предприятия ООО «СевКавСейсмозащита»;

– в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина» при чтении лекций и выполнении выпускных квалификационных работ студентами, обучающихся по направлениям подготовки 08.03.01, 08.04.01 – Строительство в 2015–2020 гг.

Методология и методы исследований. При подготовке диссертации применялись аналитические и численные методы исследований. Выполнялось численное моделирование работы буроинъекционных конических и цилиндрических, а также забивных конических свай в глинистых грунтах. Разрабатывался инженерный метод расчета несущей способности буроинъекционной конической сваи для фундаментов зданий и сооружений. Анализировались результаты испытаний натуральных конических и цилиндрических свай в глинистых грунтах, которые сопоставлялись с данными инженерного расчета и компьютерного моделирования их работы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Конструктивное решение буроинъекционной конической сваи в глинистом грунте для фундаментов зданий и сооружений;

2. Методика и результаты компьютерного моделирования работы буроинъекционных конических и цилиндрических свай в глинистых грунтах при их нагружении статической вдавливающей нагрузкой; сопоставление полученных данных с результатами экспериментов.

3. Закономерности работы буроинъекционных конических свай в глинистом грунте различной разновидности при их нагружении статической вдавливающей нагрузкой;

4. Инженерный метод расчета несущей способности буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах для фундаментов зданий и сооружений;

5. Основные направления дальнейших исследований работы буроинъекционных конических свай для развития методов проектирования фундаментов в условиях нового строительства и реконструкции зданий и сооружений.

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. Результаты оценки несущей способности буроинъекционных конических свай, полученных численными исследованиями, подтверждаются необходимым объемом экспериментальных данных, выполненных специалистами ООО «Гидротехническое строительство» (г. Краснодар) и ПНИПУ (г. Пермь).

Апробация результатов исследований. Основные положения диссертации были доложены и обсуждались на научно-практических конференциях международного, национального и всероссийского уровней: международной и национальной конференциях «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» (Новочеркасск, ЮРГПУ, 2015, 2018 г.), VIII всероссийской молодежной конференции аспирантов, молодых ученых и студентов (г. Пермь, ПНИПУ, 2016 г.), VI–IX Всероссийских конференциях молодых ученых (Краснодар, КубГАУ 2012–2019 г.), на научных семинарах кафедры «Основания и Фундаменты» ФГБОУ ВО КубГАУ (2014, 2015, 2018–2020 гг.).

Личный вклад автора состоит:

- в разработке конструктивного решения буроинъекционной конической сваи для ее устройства в глинистых грунтах;
- в разработке методики и получении результатов компьютерного моделирования работы буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах;
- в разработке инженерного метода расчета несущей способности буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах;
- в подготовке рекомендаций по проектированию фундаментов из буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 12 научных печатных работах, в том числе четырех патентах РФ на изобретения; одной статье в журнале, цитируемом в международной базе Scopus, Web of science; пяти работах в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка литературы и четырех приложений. Она содержит 149 страницы текста, 43 рисунка, 11 таблиц и список литературы из 139 наименований.

Автор выражает благодарность своему научному консультанту, заслуженному строителю Кубани, кандидату технических наук, профессору О. Ю. Ещенко за постоянную поддержку, консультации и внимание к работе. Соискатель признателен всем сотрудникам кафедры «Основания и фундаменты» ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ» за внимание к работе и поддержку выбранного направления исследований.

2. Основное содержание работы

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

В первом разделе представлен анализ современного состояния вопросов по расчету и конструированию буроинъекционных конических свай; приведены основные параметры, влияющие на их несущую способность в глинистых грунтах. Рассмотрены вопросы расчета и конструирования буроинъекционных цилиндрических свай и показаны основные отличительные особенности их работы по сравнению с буроинъекционными коническими сваями.

Обзор исследований работы различных видов буроинъекционных свай в глинистых грунтах показывает, что в настоящее время буроинъекционные конические сваи используются крайне редко. Это можно объяснить отсутствием надежных способов их устройства, а также методов расчета и конструирования. Особенность работы буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах заключается в том, что их несущая способность обеспечивается за счет повышения параметров сопротивления грунта по боковой поверхности.

Из числа отечественных и зарубежных ученых, исследованиями работы и методов расчета конических свай (набивных, забивных) занимались: А. А. Бартоломей, Б. В. Бахолдин, В. Н. Голубков, А. Л. Готман, А. Ж. Жусупбеков, Б. И. Далматов, В. К. Дмоховский, Х. А. Джантимиров, В. В. Знаменский, Н. Л. Зоценко, М. Я. Крицкий, В. И. Крутов, В. А. Лаврентьев, Ф. К. Лапшин, Р. А. Мангушев, Г. М. Миткина, Б. С. Одинг, В. Г. Офрихтер, А. Б. Пономарев, А. И. Прудентов, А. И. Рыбников, А. Н. Саурин, Г. М. Смиренский, Ю. М. Шеменков, Б. С. Юшков, Т. W. Adejumo, M. Alka Shah Jain, M. P. Nordland, R. L. Kodiaka, J. K. Tristan, C. F. Morrison и др. Однако,

для буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах методы расчета их несущей способности развития пока не получили. На основе анализа опубликованных работ были сформулированы цель и задачи исследований.

Во втором разделе предложена конструкция буроинъекционной конической сваи, приведены данные о грунтовых условиях, где их применение является целесообразным. Излагается методика численных исследований и дается обоснование применяемых параметров системы «буроинъекционная коническая свая – грунт» для выполнения расчетов.

На основе конструктивных решений и способов изготовления буроинъекционных цилиндрических свай фирмы *Ischebek Titan* (Германия, 1956 г.) запатентовано устройство (патенты РФ № 2425924 за 2010 г. и № 2672698 за 2017 г.), позволяющее устраивать буроинъекционные конические сваи с геометрией ствола в виде усеченного конуса (рис. 1).

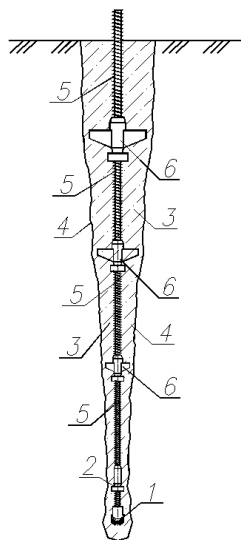


Рис. 1. Устройство буроинъекционной конической сваи (патент РФ №2425924):
 1 – буровая коронка; 2 – соединительная муфта;
 3 – подвижный мелкозернистый бетон;
 4 – скважина; 5 – полая металлическая штанга, состоящая из отдельных элементов;
 6 – соединительная муфта – коронка с буровыми лопастями

Для оценки работы буроинъекционных конических свай были использованы однородные глинистые грунты различной разновидности со следующими характеристиками: угол внутреннего трения (φ) от 14 до 20 град; удельное сцепление (c) от 10 до 38 кПа; модуль деформации грунта (E) 8–14 МПа; коэффициент Пуассона (μ) 0,32...0,35;

удельный вес грунта (γ) 18 кН/м³. Рассматриваемые глинистые грунты не обладали неблагоприятными специфическими свойствами.

Исследования работы буройнъекционных конических свай выполнялись на базе программного комплекса *Midas GTS NX*, который хорошо зарекомендовал себя при решении геотехнических задач в различных инженерно-геологических условиях, как в линейной, так и в нелинейной постановке. Общий вид расчетной схемы рассматриваемой системы «буройнъекционная коническая свая – грунт» представлен на рис. 2.

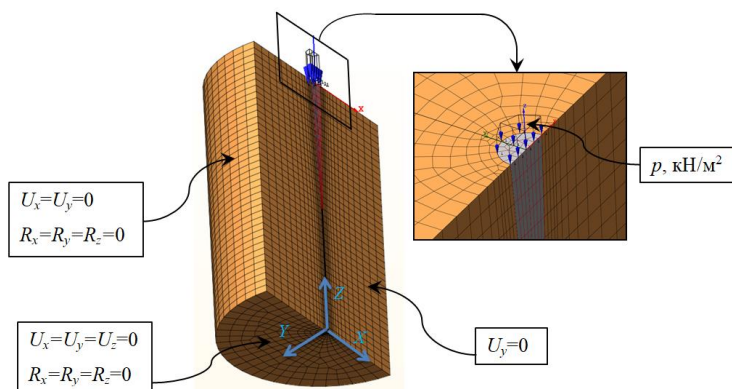


Рис. 2. Общий вид расчетной схемы рассматриваемой системы «буройнъекционная коническая свая-грунт»: U_x, U_y, U_z – перемещения системы вдоль осей X, Y, Z соответственно; R_x, R_y, R_z – поворот системы в плоскости XZ, YX, ZY соответственно

Описание перемещений глинистого грунта выполнялось с использованием нелинейной упруго-пластической модели грунта Друккера-Прагера. Для исключения погрешностей численных расчетов была выполнена проверка влияния на работу конических свай следующих параметров: размеров расчетной области основания для устройства свай; критерия сходимости итерационного решателя; типа конечных элементов; количества узлов сетки конечных элементов; типа контактных элементов (область взаимодействия свай с грунтом). Проверка выполнялась для области основания, ограниченного размером 40 м от поверхности в вертикальном и 20 м от оси свай в горизонтальном направлениях.

Установлено, что в вертикальном направлении минимальный размер расчетной области ($H_{\text{мин}}$, м) от поверхности основания должен составлять:

$$H_{\text{мин}} \geq L_{\text{св}} + 10D_{\text{ог}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{св}}$ – длина буроинъекционной конической сваи, м; $D_{\text{ог}}$ – диаметр оголовка буроинъекционной конической сваи, м0

В горизонтальном направлении минимальный размер расчетной области ($R_{\text{мин}}$, м) от центральной оси сваи должен быть равен или превышать величину:

$$R_{\text{мин}} \geq 50D_{\text{ог}} - 4, \quad (2)$$

где $D_{\text{ог}}$ – тоже, что в формуле (1).

В качестве конечных элементов использовались гексаэдры высшего порядка (16 узлов в одном элементе). При этом установлено, что выполнение расчетов без введения дополнительного «контактного» элемента в область взаимодействия сваи с грунтом, приводит к погрешности расчетов в 1,5–2,0 раза. Контактный элемент характеризуется двумя основными параметрами. Параметром R_v – виртуальная толщина контактного элемента и параметром R_t – коэффициент взаимодействия (коэффициент пропорциональности). Коэффициент взаимодействия (R_t), согласно данных разработчиков программного комплекса *Midas GTS NX* (2013), характеризует трение сваи об окружающий ее грунт. Виртуальная толщина (R_v) контактного элемента дает погрешность при расчетах до 3 % и ее значение допустимо оставлять в пределах стандартных настроек программы. Величину коэффициента взаимодействия (R_t) для буроинъекционных конических свай автором исследований рекомендуется принимать в пределах $R_t = 1,07$ – $1,12$. Это установлено по результатам численных расчетов осадки S рассматриваемых свай от прикладываемой внешней нагрузки N . Применение других значений коэффициента взаимодействия (R_t) контактного элемента дает погрешность вычислений до 23–29 %.

Численные исследования проводились для буроинъекционных конических свай длиной от 3 до 8 м в ПК *Midas GTS NX*. Вначале моделировалась работа буроинъекционной цилиндрической сваи длиной 8 м в глинистых грунтах при различных коэффициентах взаимодействия (R_t) модели сваи с грунтом ($R_t = 0,9$ – $1,2$). Затем, полученные данные моделирования их работы сопоставлялись с результатами испытаний буроинъекционных цилиндрических натуральных свай такой же длины.

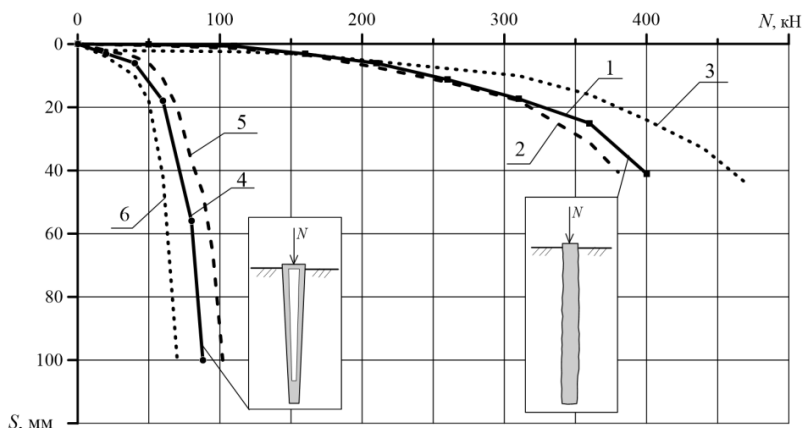


Рис. 3. Графические зависимости осадок конических и цилиндрических свай от внешней нагрузки $S=f(N)$: 1 – график осадки буроинъекционной цилиндрической натурной сваи длиной 8 м по результатам полевых испытаний; 2 – то же цилиндрической по результатам численного расчета; 3 – то же конической по результатам численных расчетов; 4 – график осадки забивной конической натурной сваи длиной 3 м по результатам полевых испытаний; 5 – то же буроинъекционной конической по результатам численного расчета; 6 – то же буроинъекционной цилиндрической по результатам численного расчета

Моделирование работы этих свай проводилось до тех пор пока не было получено совпадение графиков их осадок $S = f(N)$, которое достигалось с точностью 8–10 % обычно при $R_t = 1,09–1,12$ (рис. 3, поз. 1, 2). Полученные коэффициенты взаимодействия (R_t) для цилиндрических свай использовались в дальнейшем для моделирования работы буроинъекционных конических свай длиной 8 м (рис. 3, поз. 3). Далее моделировалась работа буроинъекционных конических и цилиндрических свай длиной 3 м в глинистом грунте при $R_t = 1,1$ (рис. 3, поз. 5 и 6). Полученные данные сопоставлялись с результатами испытаний натуральных забивных полых конических свай длиной 3 м, имеющих конусность 1,5 %, что соответствует углу наклона боковой поверхности сваи к вертикали примерно 2 град (автор испытаний натуральных конических свай А. Б. Пономарев, 1999). Сопоставление показало, что расчетные осадки буроинъекционных конических свай длиной 3 м и углом наклона боковой грани к вертикали 2 град меньше натуральных на 15–20 %

(рис. 3, поз. 4). Таким образом, на основе выполненных исследований были получены графики осадок $S = f(N)$ для буроинъекционных конических свай длиной 3 и 8 м в глинистых грунтах, которые использовались в дальнейшем для разработки метода расчета их несущей способности.

В третьем разделе представлены результаты численных исследований работы буроинъекционных конических свай различной длины в глинистых грунтах. При этом выявлены параметры, влияющие на их несущую способность F_d . К таким параметрам относятся: физико-механические характеристики глинистого грунта основания; угол наклона боковой поверхности буроинъекционной конической сваи к ее вертикальной оси; площадь боковой поверхности буроинъекционной конической сваи; длина буроинъекционной конической сваи.

Было установлено, что с увеличением угла наклона (α) боковой поверхности буроинъекционной конической сваи ее несущая способность F_{dk} увеличивается. Аналогичные данные были получены для забивных конических и набивных пирамидальных свай (А. А. Бартоломей, А. Л. Готман, В. К. Дмоховский, Ф. К. Лапшин, А. Б. Пономарев, А. М. Рыбников и др.). При $\alpha = 2-3$ град и длине буроинъекционной конической сваи 3–5 м приращение несущей способности F_{dk} в глинистом грунте составляет порядка 24–32 %, а для свай длиной 8 м около 17–26 %. Анализ полученных данных показал, что удельная несущая способность буроинъекционных конических свай $F_{dk,y}$ ($F_{dk,y} = F_{dk}/V_k$) больше чем цилиндрических $F_{dq,y}$ ($F_{dq,y} = F_{dq}/V_q$) в глинистых грунтах различной разновидности на 6–15 %. Эти данные также согласуются с результатами удельной несущей способности для забивных конических и пирамидальных свай (авторы А. Л. Готман, А. Б. Пономарев и др.). Максимальные значения удельной несущей способности получены для буроинъекционных конических свай $F_{dk,y}$ длиной 3 м ($F_{dk,y} = 2267$ кН/м³) в суглинке мягкопластичном.

Для буроинъекционной конической сваи длиной 7 м (диаметр оголовка $D_{ог}$ – 0,390 м, диаметр нижнего конца $D_{нк}$ – 0,1 м) показано влияние удельного сцепления (c), угла внутреннего трения (ϕ) на ее несущую способность F_{dk} . Было выполнено сопоставление результатов расчета несущей способности конических F_{dk} и цилиндрических F_{dq} свай. Буроинъекционная цилиндрическая свая имела длину также 7 м, диаметр ствола $D_{ст}$ 0,28 м. При этом, объем бетона, используемый на изготовление конических и цилиндрических свай был примерно

одинаковый. Установлено, что с увеличением удельного сцепления (c) глинистых грунтов повышается и несущая способность буроинъекционных конических свай F_{dk} (от 35 до 80 %). Удельное сцепление (c) глинистых грунтов оказывает большее влияние на несущую способность конических свай F_{dk} , чем цилиндрических F_{du} . Выявлено, что при изменении длины буроинъекционной конической сваи от 3 до 8 м и изменении удельного сцепления (c) от 10 до 28 кПа, ее несущая способность F_{dk} увеличивается в 1,4–1,7 раза.

Установлено, что при изменении длины сваи от 3 до 8 м и изменении величины угла внутреннего трения (φ) от 14 до 20 град несущая способность F_{dk} увеличивается в 1,05–1,15 раза. Например, для буроинъекционной конической сваи длиной 7 м с углом наклона ее боковой поверхности к вертикали $\alpha = 2$ град приращение несущей способности F_{dk} в суглинке мягкопластичном составило порядка 12 % (в 1,12 раза).

На основе обобщения полученных данных численных исследований установлено, что наибольшее влияние на несущую способность F_{dk} буроинъекционных конических свай оказывает характеристика удельного сцепления (c) глинистого грунта. Эти данные согласуются с результатами исследований забивных конических и пирамидальных свай в глинистых грунтах (А. А. Бартоломей, А. Л. Готман, А. Б. Пономарев и др.).

Четвертый раздел посвящен разработке инженерного метода расчета несущей способности F_{dk} буроинъекционных конических свай. Предварительно, на основе выполненных многочисленных расчетов в ПК *Midas GTS NX*, была установлена характерная зависимость осадки сваи S от внешней нагрузки N ($S = f(N)$). Рассматривалась работа буроинъекционной конической сваи длиной 7 м в глинистом грунте (суглинке) различной консистенции. Было получено, что зависимость (развитие) осадки сваи S на графике $S = f(N)$ может рассматриваться в три этапа (рис. 4).

На *первом этапе* нагружения (участок $o-a$) зависимость $S = f(N)$ является линейной. Внешняя нагрузка N передается на основании за счет боковой поверхности конической сваи, а ее нижний конец практически не участвует в работе. Перемещение сваи на первом этапе нагружения имеет квазиупругую (линейно-деформируемую) зависимость. По мере увеличения N наступает *второй этап* нагружения сваи, где зависимость $S = f(N)$ является криволинейной (участок $a-b$). На этом участке начинается сдвиг сваи (перемещения грунта по боковой поверхности) и ее работа обусловлена в основном за счет сил трения (сопротивления)

и нормальных сил отпора грунта. Вокруг сваи формируются зоны уплотнения грунта в которых увеличивается его плотность, прочностные и деформационные характеристики (А. Б. Пономарев, 1999; и др.). На *третьем этапе* нагружения сваи (участок δ – ϵ) ее осадка S начинает увеличиваться при незначительном повышении внешней нагрузки N . Это свидетельствует об исчерпании несущей способности F_{dk} буроинъекционной конической сваи по грунту (рис. 4). Схема действующих усилий на коническую сваю (рис. 4, а) принята по Ф. К. Лапшину и др. (1979), а предложения по ее использованию вносились В. К. Дмоховским (1927), А. Б. Пономаревым (1999, 2005).

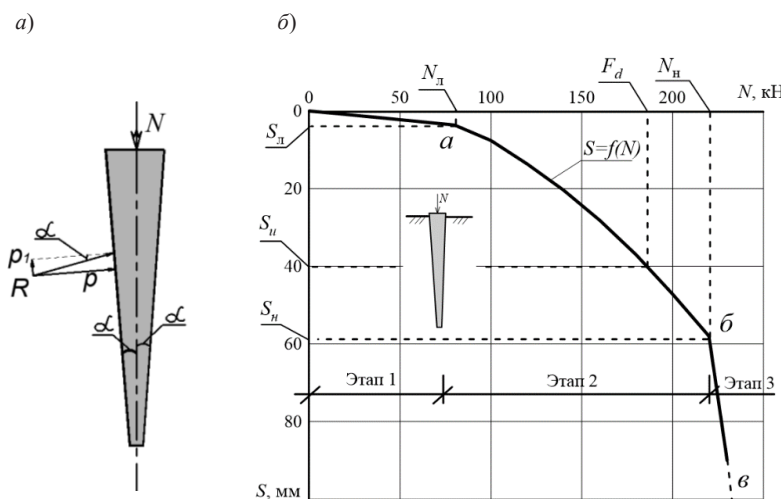


Рис. 4. Нагружение буроинъекционной конической сваи в глинистом грунте: a – схема действующих усилий на сваю (обозначения приняты по Ф.К. Лапшину и др., 1979), δ – зависимость осадки сваи S от внешней нагрузки N : $S = f(N)$

Наглядным подтверждением характера работы буроинъекционных конических свай служат результаты численного моделирования их нагружения (рис. 5). При этом также рассматривалось нагружение буроинъекционной конической сваи длиной 7 м в мягкопластичном суглинке. Было установлено (ПК *Midas GTS NX*), что в зависимости от внешней нагрузки N на сваю вокруг ее ствола формируются зоны сдвигов (зоны локального нарушения прочности грунта), которые

развиваются вдоль его длины. Подробно этот вопрос рассмотрен в разделе 4 диссертации. Полученные данные о работе буроинъекционной конической сваи на всех этапах нагружения легли в основу разработки инженерного метода расчета ее несущей способности F_{dk} в глинистых грунтах.

Очевидно, что характеристика F_{dk} для свай длиной 7–8 м будет находиться в интервале нагрузок $N_n < F_{dk} < N_n$ (рис. 4 и 5).

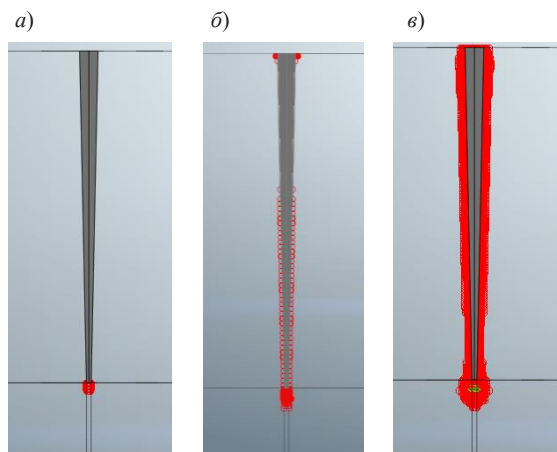


Рис. 5. Формирование зон сдвигов грунта вокруг ствола буроинъекционной конической сваи в зависимости от этапов ее нагружения: а, б, в – соответственно этапы нагружения сваи

При этом значение F_{dk} должно устанавливаться при осадке сваи S не превышающем $S \leq 40$ мм (ГОСТ 5686.2012). Для определения F_{dk} воспользуемся методом Ф. К. Лапшина и др. (1979 г.) для набивных конических свай:

$$F_{dk} = F \cos \alpha [p (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi) + c], \quad (3)$$

где, F – площадь боковой поверхности сваи, м²; α – половина угла конусности (угол наклона боковой грани сваи к вертикали), град; φ – угол внутреннего трения грунта, град; c – удельное сцепление грунта, кПа; p – давление обжатия, действующее на сваю, кПа. Все обозначения в формуле (3) приняты по Ф.К. Лапшину.

Заменим в формуле (3) давление p на параметр $\sigma_{\text{обж}}$ – нормальное напряжение обжатия буроинъекционной сваи (согласно исследованиям Р. В. Шалгинова и др., 2008-2010). Значение $\sigma_{\text{обж}}$ можно вычислить по формуле:

$$\sigma_{\text{обж}} = \sigma_{\text{ост}} + \sigma_0, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{ост}}$ – остаточное напряжение в грунте, кПа; σ_0 – горизонтальное напряжение от собственного веса грунта, кПа.

Под остаточным $\sigma_{\text{ост}}$ понимается напряжение, которое образуется вдоль стенки скважины после нагнетания мелкозернистого бетона и его твердения. Величина остаточного напряжения $\sigma_{\text{ост}}$ для глинистых грунтов установлена экспериментально и составляет порядка $\sigma_{\text{ост}} = 30 \dots 50$ кПа (Петухов А. А., 2006).

На основании результатов исследований А. И. Полищука, И. В. Семенова и др. (2015–2019), автором предлагается в формуле (3) значения удельного сцепления c и угла внутреннего трения φ глинистого грунта определять с учетом их изменения, вызванного уплотнением глинистого грунта вдоль стенок скважины в момент ее устройства:

$$\varphi_{\text{упл}} = K_{\varphi} \cdot \varphi; \quad (5a)$$

$$c_{\text{упл}} = K_c \cdot c, \quad (5б)$$

где $c_{\text{упл}}$, $\varphi_{\text{упл}}$ – соответственно, удельное сцепление (кПа) и угол внутреннего трения (град) уплотненного глинистого грунта вдоль стенок скважины на этапе устройства сваи; c , φ – соответственно, удельное сцепление (кПа) и угол внутреннего трения (град) глинистого грунта естественного сложения; K_c , K_{φ} – безразмерные коэффициенты, принимаемые в зависимости от разновидности и состояния глинистого грунта: $K_c = 1,2-1,35$, $K_{\varphi} = 1,02-1,06$ – для суглинков и глин мягкопластичных и тугопластичных; $K_c = 1,05-1,2$, $K_{\varphi} = 1,01-1,03$ – для суглинков и глин текучепластичных и текучих; $K_c = 1,05-1,15$, $K_{\varphi} = 1,04-1,07$ – для супесей пластичных (данные Полищука А. И., Семенова И. В., 2015–2019 гг.).

Для корректировки результатов численных и аналитических расчетов несущей способности F_{dk} буроинъекционных конических свай в формулу (3) предлагается ввести поправочный коэффициент k , значение которого зависит от соотношения верхнего $D_{\text{ог}}$ и нижнего $D_{\text{нк}}$ диаметров конической сваи (параметр $D_{\text{ог}} / D_{\text{нк}}$) и состояния глинистого грунта. Из сопоставления численных и аналитических результатов было выявлено, что значения поправочного коэффициент k изменяются

в пределах от 0,92–1,27; его значения в табличном виде приведены в диссертации (раздел 4). Тогда, с учетом вышеизложенного несущую способность F_{dk} буроинъекционных конических свай в глинистом грунте предлагается определять по формуле:

$$F_{dk} = k A_i [\sigma_{\text{обж}} (\text{tg } \alpha + \text{tg } \varphi_{\text{упл}}) + c_{\text{упл}}] \cos \alpha, \quad (6)$$

где A_i – площадь боковой поверхности конической сваи, м²; остальные обозначения те же, что и в (3)–(5).

Достоверность результатов расчета по (6) оценивалась сопоставлением данных, полученных численно для буроинъекционных конических и цилиндрических свай в грунтовых условиях, сложенных глинистыми грунтами (г. Краснодар). Расчеты выполнялись в ПК *Midas GTS NX* для свай длиной 8 м, имеющих одинаковую длину и практически одинаковый расход бетона на их изготовление.

Работа рассматриваемых буроинъекционных свай оценивалась в грунтовых условиях, где проводились их испытания статической вдавливающей нагрузкой. При этом испытывались натурные буроинъекционные цилиндрические сваи длиной 8 м. Результаты испытаний свай, а также данные поверочных расчетов обобщались и анализировались (табл. 1). Сопоставление показало, что в рассматриваемых грунтовых условиях наименьшее значение несущей способности F_d имеет буроинъекционная цилиндрическая свая ($F_{du} = 973$ кН) длиной 8 м, которое устанавливалось аналитически по формуле (6). Несущая способность F_{dk} для конической сваи длиной 8 м, установленная также аналитически по (6), на 15–20 % больше по сравнению с F_{du} для цилиндрической сваи. Наибольшая несущая способность F_{dk} зафиксирована для буроинъекционной цилиндрической сваи (1073 кН), значение которой было получено экспериментально.

В диссертации (раздел 4) дан пример расчета несущей способности F_{dk} буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах; приведены рекомендации по их расчету и конструированию. В работе приводятся данные по практическому использованию буроинъекционных конических свай на объектах: «Спортивно-туристический комплекс «Горная карусель» некоммерческого предприятия АО «Красная поляна» (г. Сочи) и «Многоэтажный жилой комплекс со встроенно-пристроенными помещениями общественного назначения по ул. Обрывная, 132/1, г. Краснодар» предприятия ООО «СевКавСейсмозащита». В диссертационной работе также

сформулированы направления дальнейших исследований по развитию методов расчета буроинъекционных конических свай и разработке их новых конструктивных решений.

Таблица 1

Результаты оценки несущей способности буроинъекционных конических F_{dk} и цилиндрических F_{dc} натуральных свай

Параметры буроинъекционных свай	Оценка несущей способности буроинъекционной свай				
	Конической		Цилиндрической		
	по формуле (6)	ПК <i>Midas GTS NX</i>	по формуле (6)	ПК <i>Midas GTS NX</i>	Эксперимент
Объем бетона тела свай V , м ³	0,79	0,79	0,77	0,77	0,77
Параметр $D_{ог} / D_{нк}$	3	3	1	1	1
Несущая способность свай F_d , кН	1166	1202	973	996	1073
Удельная несущая способность свай F_d / V , кН/м ³	1476	1522	1264	1294	1394

3. Заключение

1. По данным аналитических, численных и экспериментальных исследований разработано эффективное конструктивное решение буроинъекционной конической свай для глинистых грунтов, которое подтверждено патентами РФ на изобретения (2010, 2017). Эффективность работы таких свай подтверждается повышением несущей способности на 15–25 % по сравнению с аналогичными буроинъекционными цилиндрическими сваями. Область их применения распространяется на свай длиной 3–8 м в глинистых грунтах мягкопластичного, пластичного и тугопластичного состояния.

2. Разработана методика численного моделирования работы буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах. Методика позволяет на основе принятого подхода получать зависимости нагружения

буроинъекционных конических и цилиндрических свай; сопоставлять полученные данные с результатами экспериментов.

3. Установлено, что геометрические параметры буроинъекционных конических свай оказывают существенное влияние на их несущую способность. Так, изменение угла наклона боковой поверхности буроинъекционных конических свай длиной 3–8 м от 0 до 2 град, при их устройстве в глинистых грунтах, приводит к повышению несущей способности на 15–20 % по сравнению с буроинъекционными цилиндрическими сваями.

4. Численными исследованиями выявлено влияние прочностных характеристик глинистого грунта на несущую способность буроинъекционных конических свай. С увеличением характеристики удельного сцепления (c) от 10 до 28 кПа несущая способность конических свай F_{dk} длиной 3–8 м возрастает в 1,4–1,7 раза. Характеристика угла внутреннего трения (φ) глинистого грунта также оказывает влияние на несущую способность конических свай F_{dk} , но влияние это является незначительным. С увеличением характеристики угла внутреннего трения φ от 14 до 20 град несущая способность буроинъекционных конических свай F_{dk} такой же длиной 3–8 м возрастает в 1,05–1,15 раза.

5. На основе результатов численного моделирования работы буроинъекционных конических свай выявлены перемещения глинистого грунта в околосвайном пространстве и формирования зон его предельного состояния. Было установлено, что в процессе роста внешней нагрузки N в уровне острия конической сваи начинает формироваться зона сдвигов (зона локального нарушения прочности грунта), которая развивается вверх по направлению оголовка сваи. Затем, при дальнейшем повышении внешней нагрузки N , аналогичная зона сдвигов начинает формироваться в уровне оголовка сваи на незначительную глубину по длине ствола. Дальнейшее увеличение внешней нагрузки N приводит к смыканию зон сдвигов (верхней и нижней) и наблюдается интенсивный рост осадки (S) буроинъекционной конической сваи.

6. Разработан инженерный метод расчета несущей способности F_{dk} буроинъекционных конических свай длиной от 3 до 8 м в глинистых грунтах. Метод основан на использовании данных о запатентованном конструктивном решении конических свай, с учетом изменения прочностных характеристик глинистых грунтов вокруг ее ствола. Достоверность предлагаемого метода подтверждена сопоставлением

с данными, полученными аналитическим и численным расчетами, а также экспериментально для буроинъекционных цилиндрических свай в глинистых грунтах.

4. Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. *Ещенко О. Ю.* Исследование влияния краевых условий модели на перемещения буроинъекционной сваи при действии статических нагрузок / О. Ю. Ещенко, **Д. А. Чернявский** // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – № 94 (12). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/10/pdf/06.pdf>.

2. *Ещенко О. Ю.* Исследование работы буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах при действии вертикальных статических нагрузок / **Д. А. Чернявский**, О. Ю. Ещенко // Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс]. – № 31 (2015). – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3232>.

3. *Ещенко О. Ю.* Особенности расчета буроинъекционных свай методом конечных элементов в глинистых грунтах / **Д. А. Чернявский**, О. Ю. Ещенко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 2(55), №2. – С. 184–193.

4. **Чернявский Д. А.** Влияние физико-механических характеристик глинистых грунтов на несущую способность одиночных конических буроинъекционных свай / **Д. А. Чернявский** // Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс]. – № 2 (2017). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4230>.

5. **Чернявский Д. А.** Оценка влияния прочностных характеристик глинистых грунтов на несущую способность одиночных конических буроинъекционных свай / **Д. А. Чернявский** // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 4. – с. 69–79. – DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.07.

Публикации в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of science

6. *Полищук А. И.* Метод расчета несущей способности буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах / А. И. Полищук, **Д. А. Чернявский** // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020. – №4. С. 2–7.

Статьи в других печатных изданиях

7. **Чернявский Д. А.** Исследование влияния различных критериев сходимости на точность расчета одиночной анкерной сваи / **Д. А. Чернявский**, О. Ю. Ещенко // V Всероссийская конференция молодых ученых «Научное обеспечение АПК». – Краснодар: КубГАУ, 2011. – С. 482–484.

8. *Ещенко О. Ю.* Оценка влияния геометрических параметров буроинъекционных конических свай на их осадку в глинистых грунтах / **Д. А. Чернявский**, О. Ю. Ещенко // матер. междунар. науч.-тех. конф., 13–15 мая 2015г. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2015, С. 361–366.

Патенты РФ на изобретения:

9. Пат. №2425924 Российская Федерация, МПК E02D 5/54. Анкерная свая / О. Ю. Ещенко, **Д. А. Чернявский**. – № 2010119103; заявл. 11.05.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22. – 5 с.

10. Пат. №2414261 Российская Федерация МПК E02D 5/54. Буроинъекционная свая с локальными уширениями / **Д. А. Чернявский**, И. В. Семенов, О. Ю. Ещенко – № 2012148645/0345/03; заявл. 15.11.2012; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12. – 5 с.

11. Пат. №2524077 Российская Федерация МПК E02D 5/46. Буроинъекционная свая с наклонными локальными уширениями / **Д. А. Чернявский**, И. В. Семенов, О. Ю. Ещенко – №2013101331/03; заявл. 10.01.2013; опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21. – 5 с.

12. Пат. № 2672698 Российская Федерация МПК E02D 27/08. Устройство для изготовления буроинъекционной конической сваи / А. И. Полищук, И. В. Семенов, **Д. А. Чернявский** – № 2017140017; заявл. 16.11.2017; опубл. 19.11.2018, Бюл. № 32. – 5 с.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 27.10.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 99.

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.