

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Краснодар 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ ПО РАСЧЕТУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ	9
1.1. Конструктивные решения и способы изготовления буроинъекционных конических свай	9
1.2. Основные факторы, влияющие на несущую способность буроинъекционных конических свай и область их применения	13
1.3. Существующие подходы к расчету и конструированию буроинъекционных конических свай	23
1.4. Основные задачи исследований	30
2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАИ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИХ РАБОТЫ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ	32
2.1. Разработка конструктивного решения буроинъекционной конической сваи	32
2.2. Выбор грунтовых условий для моделирования работы буроинъекционной конической сваи	34
2.3. Обоснование основных параметров системы «буроинъекционная коническая свая – грунт»	37
2.4. Исследование взаимодействия грунта с боковой поверхностью буроинъекционной конической сваи на основе натуральных экспериментов.....	48
2.5. Обоснование граничных условий системы «буроинъекционная коническая свая – грунт»	59
2.5.1. Обоснование размеров расчетной области	60
2.5.2. Обоснование применяемого критерия сходимости итерационного решателя	67
2.5.3. Обоснование применяемых видов конечных элементов	70
2.5.4. Обоснование количества узлов сетки конечных элементов	72
2.6. Выводы по разделу 2	75
3. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СЖИМАЮЩИХ НАГРУЗОК	77
3.1. Исследование влияния угла наклона боковой поверхности буроинъекционной конической сваи ее несущую способность	77
3.2. Исследование влияния длины буроинъекционной конической сваи на ее несущую способность	88
3.3. Исследование влияния физико-механических характеристик грунтов на несущую способность буроинъекционной конической сваи	89
3.4. Выводы по разделу 3	94

4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ И НАПРАВЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	96
4.1. Инженерный метода определения несущей способности буроинъекционной конической сваи	96
4.1.1. Сопоставление результатов расчетов несущей способности буроинъекционных конических свай по разным методам	96
4.1.2. Разработка метода оценки несущей способности буроинъекционной конической сваи и основные результаты расчета.....	98
4.1.3. Рекомендации по расчету несущей способности буроинъекционной конической сваи	108
4.1.4. Пример оценки несущей способности буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах	110
4.2. Внедрение результатов исследований в практику проектирования зданий и сооружений	113
4.3. Направления дальнейших исследований по оценке работы и совершенствованию методов проектирования буроинъекционных конических свай	119
4.4. Выводы по разделу 4	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	123
ПРИЛОЖЕНИЯ	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. В последние годы в строительстве получили широкое распространение свайные фундаменты из буроинъекционных 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 буроинъекционных 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 буроинъекционных 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 буроинъекционных 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 буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах выполнено недостаточное количество. Поэтому тема диссертации является **актуальной**.

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.

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 буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах, позволяющая повысить точность численных расчетов за счет рационального подбора значений коэффициента взаимодействия (R_i) модели сваи с грунтом, выбора количеств узлов сетки конечных элементов и рациональной их компоновки.

3. Выполнена оценка влияния геометрических параметров буроинъекционных конических свай на их несущую способность в глинистых грунтах; установлено, что изменение угла наклона боковой поверхности буроинъекционных 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 буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах, который базируется на использовании данных запатентованного конструктивного решения и учитывает изменения прочностных характеристик уплотненных глинистых грунтов вокруг ствола сваи.

Практическая значимость работы и ее использование. *Практическая значимость* работы заключается в том, что предложенная конструкция, инженерный метод расчета и рекомендации по проектированию буроинъекционных кони-

ческих свай в глинистых грунтах, могут быть использованы в практике проектирования фундаментов зданий и сооружений. Конструктивные решения буроинъекционной 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 компьютерного моделирования их работы.

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).

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.

Апробация работы. 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 науч-

ных семинарах кафедры «Основания и Фундаменты» ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ (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 и Web of science; пяти работах в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России.

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

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ ПО РАСЧЕТУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

1.1. Конструктивные решения и способы изготовления буроинъекционных конических свай

Под буроинъекционным понимаются сваи диаметрами от 0,15 до 0,35 м устраиваемые в пробуренных скважинах путём нагнетания (инъекции) в них под давлением мелкозернистой подвижной бетонной смеси, скважины при этом устраиваются полым шнеком. Такие сваи чаще выполняются *цилиндрическими*; их длина при этом назначается по конструктивным соображениям с учетом условий гибкости конструкций свай. Отношение длины сваи к ее диаметру не должно превышать 1/25 [80]. Если боковую поверхность свай выполнить под углом к ее продольной оси, то такие сваи называют *коническими*. В зарубежной практике [101, 102] буроинъекционные сваи принято называть «*Micropiles*» (сваи не больших размеров). При этом ограничения по длине и диаметру свай отсутствуют.

В отечественной практике фундаментостроения исследованием работы буроинъекционных свай в различных грунтовых условиях занимались М. Ю. Абе-лев, А. А. Бартоломей, Б. В. Бахолдин, А. Л. Готман, Б. И. Далматов, Х. А. Джантимиров, Н. М. Дорошкевич, И. М. Клейнер, Э. В. Костерин, Ф. К. Лапшин, А. А. Луга, Р. А. Мангушев, Г. Ф. Новожилов, А. И. Осокин, А. В. Пилягин, А. И. Полищук, А. Б. Пономарев, Д. Е. Разводовский, С. Н. Сотников, А. Б. Фадеев, В. Г. Федоровский и др.

В России и Европейских государствах (Германия, Франция, Нидерланды, Швейцария и др.) широкое распространение получили буроинъекционные сваи, разработанные немецкой фирмой *Ischebek* (1956 г.), называемые «*Titan*» (Титан). Согласно разработанной технологии устройство таких свай выполняется в следующей последовательности. На первом этапе выполняется ударно-вращательное бурение скважины до проектной отметки. Промывочная жидкость, используемая на первом этапе, поступает под давлением в забой скважины через полые металлические штанги, очищая ее от бурового шлама. В процессе нагнетания промы-

вочного раствора происходит увеличение диаметра ствола сваи и закрепление стенок скважины. Далее в скважину нагнетается мелкозернистый подвижный бетон (цементно-песчаный подвижный раствор), вытесняющий промывочную жидкость, а буровая штанга, остается в стволе скважины в качестве армирующего элемента.

Буроинъекционные сваи «Titan» чаще используют для решения следующих задач:

- в качестве свай, работающих на вдавливающие и выдергивающие нагрузки, для фундаментов зданий и сооружений;
- при устройстве отдельных свайных фундаментов (в виде кустов свай) для строительства опор линий электропередач;
- при устройстве анкерного крепления инженерных сооружений (удерживающих, разделительных) в транспортном строительстве;
- в качестве анкерных свай для крепления откосов, насыпей, и склонов;
- в качестве анкеров при строительстве подпорных стен, тоннелей и др.

В настоящее время все большее распространение получают буроинъекционные сваи, выполняемые по технологии устройства непрерывным полым шнеком (НПШ). Согласно этого способа устройство буроинъекционных свай выполняется в несколько этапов. На первом этапе выполняется бурение скважины до проектной отметки при помощи полого шнека. На втором этапе выполняется извлечение полого шнека с одновременной подачей в скважину подвижной бетонной смеси. Далее в готовую скважину, заполненную бетоном, погружается арматурный каркас.

Известны и другие способы (технологии) изготовления буроинъекционных цилиндрических свай [12, 17, 34-36, 88, и др.]. В целом, к особенностям устройства буроинъекционных цилиндрических свай вне зависимости от способов их изготовления можно отнести следующее:

1. Диаметр ствола буроинъекционной сваи обычно составляет менее 400 мм;

2. Инъецируемая смесь, используемая для формирования буроинъекционной цилиндрической сваи, не содержит крупного заполнителя (размер фракций обычно менее 5 мм);

3. Относительная длина свай L/D составляет обычно $L/D > 1/25$;

4. Отсутствие ударных нагрузок на грунт при устройстве свай;

Из рассмотрения вышеизложенного видно, что существующие конструктивные решения буроинъекционных цилиндрических свай [77, 79, 112, 126 и др.] предполагают в основном совмещение процесса бурения скважины и ее армирования. При этом применение такого подхода не исключает разрушения стенок скважины и образование перешейков (утощений) ствола буроинъекционной сваи. Решение применения обсадных труб [34] при устройстве таких свай позволяет обеспечить неизменяемую геометрию их ствола, но при этом значительно усложняется технологический процесс изготовления. Решение применения лидерных скважин [48] при устройстве буроинъекционных цилиндрических свай позволяет выполнить армирование ствола объёмными арматурными каркасами, а также многократно использовать буровое оборудование. При наличии в грунтовой толще прослоек твёрдых пород существует вероятность, что диаметр сваи будет равен диаметру лидерной скважины.

В настоящее время в России не выявлены конструктивные решения буроинъекционных конических свай и способы (технологии) их изготовления. Но при этом известно, что начиная с 80-90-х годов прошлого века получили развитие сборные железобетонные конические сваи (сборные конические сваи) заводского изготовления и набивные сваи в выштампованном основании пирамидальной формы (набивные пирамидальные сваи) [10-12, 60, 61, 89, 90, 109 и др.]. Указанные выше конструктивные решения свай наиболее близко отвечают работе буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах.

Из обзора литературных источников выявлено, что в фундаментостроении и геотехническом строительстве используются сборные полые конические железобетонные сваи заводского изготовления. Под сборными коническими понимаются сваи, выполняемые по форме в виде усеченного конуса методом центрифугирова-

ния [59-61]. Если внутренняя часть усеченного конуса выполняется с воздушной полостью, то такие сваи называют сборными полыми коническими. Область применения сборных полых конических свай обусловлена в основном фундаментами, работающими на действие вертикальных, горизонтальных и моментных усилий. Сборные полые конические сваи применяются в дорожном и энергетическом строительстве при устройстве фундаментов опор мостов, путепроводов, опор линий электропередач и других сооружений. Благодаря развитой боковой поверхности и действию расклинивающего эффекта в грунтах применение полых конических свай позволяет экономить до 40 % железобетона и до 15 % арматуры по сравнению с известными конструкциями свай сплошного сечения. Сборные полые конические сваи рекомендуется устраивать в однородных по глубине грунтах, а также в слоистых грунтах, когда с поверхности залегают более прочные грунты, чем подстилающие ниже.

Под набивными пирамидальными понимаются сваи, устраиваемые по форме, в виде усеченной пирамиды, сужающейся от оголовка к острию. Пирамидальные сваи выполняются в основном набивными в вытрамбованном основании. Вытрамбовка производится сборными железобетонными элементами, которые сбрасываются с определенной высоты в грунт. В сформированный при этом пирамидальный объем в грунте устанавливается арматура и укладывается подвижная бетонная смесь.

Различают два вида набивных пирамидальных свай. Пирамидальные сваи с малыми углами наклона боковых граней (1–4 град), которые рекомендуется применять в однородных по глубине грунтах, а также в слоистых грунтах, когда в нижней части основания залегают более слабые грунты. Пирамидальные сваи с большими углами наклона боковых граней (4–14 град), которые рекомендуется применять как висячие в песчаных и глинистых грунтах при значительных вертикальных и горизонтальных нагрузках на фундаменты.

Развитием проектирования и способов строительства сборных железобетонных конических и набивных пирамидальных свай в нашей стране занимались: Б. В. Бохолдин, Я. Л. Зиязов, А. А. Барталомей, А. Л. Готман, Р. Г. Галеев,

Б. И. Далматов, В. К. Дмоховский, Ф. К. Лапшин, Г. М. Миткина, А. Б. Пономарев, А. И. Рыбников, Ю. М. Шеменков и др. Результаты выполненных исследований авторов свидетельствуют о развитии экспериментальной базы данных, совершенствовании методов расчёта, технологий устройства и разработке новых конструктивных решений рассматриваемых сборных конических и набивных пирамидальных свай. Выполненные исследования авторов также показали качественные и количественные зависимости между формой свай, способами их устройства и несущей способностью.

Таким образом, выполненные исследования свидетельствуют о значительном объеме данных по конструктивным решениям и способам устройства буроинъекционных цилиндрическим сваям в глинистых, пылевато-глинистых и песчано-глинистых грунтах. Известны конструктивные решения сборных конических и набивных пирамидальных свай, которые по характеру работы наиболее близко отвечают буроинъекционным коническим сваям. Конструктивные решения буроинъекционных конических свай для условий их работы в глинистых грунтах в настоящее время пока не выявлены.

1.2. Основные факторы, влияющие на несущую способность буроинъекционных конических свай и область их применения

Как известно, в современной практике проектирования, под несущей способностью сваи, вне зависимости от типа и способов ее изготовления, понимается наименьшее значение несущей способности исходя из условий сопротивления грунта основания и по условию сопротивления усилиям непосредственно материала сваи [34, 35, 84]. Изучению несущей способности буроинъекционных свай по материалу их изготовления посвящен ряд работ [6, 18, 67, 129, 130, 136, 137], однако исходя из области применения буроинъекционных свай разрушение по материалу сваи маловероятно, поэтому при обзоре этот вопрос подробно не рассматривался. Основное внимание уделено вопросам, связанным с оценкой несущей способности свай по грунту основания. При этом учитывалось, что при нагружении, свая перемещается совместно с некоторой областью прилипшего (частично

или полностью) к ней окружающего грунта (грунтовая рубашка) [72]. Разрушение происходит в области взаимодействия прилипшего к свае грунта и грунта в околосвайном пространстве [23]. Таким образом, потеря несущей способности или «срыв» сваи определяется из условия предельного сопротивлением грунта сдвигу и на прямую зависит от горизонтальной составляющей давления (обжатия грунта).

Буроинъекционные цилиндрические сваи по способу работы в грунте традиционно принято считать висячими сваями или сваями трения [1, 28, 68]. Выявленные на сегодняшний день основные зависимости по распределению и развитию сил трения по боковой поверхности таких свай [1, 9, 19, 32, 40] позволяют с достаточной точностью описать поведение и определить несущую способность свай заводского изготовления погружаемые в грунте при помощи забивки или вдавливания. Однако, отдельными авторами [3, 70], экспериментально установлено, что сопротивление по боковой поверхности для буровых, буронабивных и инъекционных свай больше чем значения в нормативных документах [80, 81].

В своих исследованиях В. В. Конюшков [27] проанализировал результаты испытаний натуральных буроинъекционных свай, выполненных по разным технологиям изготовления, и предложил поправочный коэффициент (k) в развитие существующей методике представленной СП 24.13330.2011 (Свайные фундаменты) для определения несущей способности одиночной буроинъекционной сваи. Предложено рассматривать значение коэффициента k в интервале значений от 1,4 до 1,5 (для свай, выполняемых с помощью проходного шнека), от 1,5 до 1,6 (для свай выполняемых под защитой обсадных труб и/или под защитой глинистого раствора, от 2,0 до 2,1 для свай выполняемых по технологии фирмы «*Ischebek*» (сваи «*Titan*»). Конюшков В. В. отмечает, что увеличение фактической несущей способности по отношению к расчетным величинам происходит за счет недоучета возросших сил трения по боковой поверхности, возникающих вследствие воздействия избыточного давления раствора на стенки скважины, а так же развитой боковой поверхности.

В своих исследованиях И. М. Клейнер [25] установил, что после опрессовки скважины, сила трения по боковой поверхности цилиндрической свай увеличивается в песчаных грунтах до 1,3 раза, а в глинистых от 1,4 до 1,6 раз. Согласно исследованиям И. М. Клейнера на несущую способность буроинъекционных свай оказывает значительное влияние продолжительность и величина давления опрессовки рабочего раствора.

Профессор В. Н. Парамонов [47] установил, что фактическая несущая способность буронабивных свай в 1,7 раза выше, чем рассчитанная по формулам СНиП и СП.

В своих исследованиях К. Ш. Шадунц [95] изучая взаимодействие боковой поверхности свай с окружающим грунтом установил, что несущая способность буроинъекционных свай в 1,5-1,7 раз выше по сравнению с расчетной по СП.

Ученными Б. В. Бахолдиным, Н. Т. Игонькиным, А. И. Работниковым и В. С. Корякиным [71] установлено, что сопротивление по боковой поверхности буровых свай значительно отличается от данных приводимых в таблицах нормативных документов.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что силы трения по боковой поверхности буроинъекционных цилиндрических и конических свай больше чем указано в нормативных документах.

Если для цилиндрических свай силы обжатия грунта действуют по нормали к боковой поверхности свай, то для конических и пирамидальных они действуют под углом. Тем самым при разложении силы на составляющие видно, что существует усилие, действующее в направлении противоположном по отношению к силе вдавливающей сваю в грунт. Таким образом, очевидно, что несущая способность таких свай будет выше, чем для цилиндрических той же длины и схожего диаметра. Другим не мало важным параметром является материалоемкость таких свай, она будет ниже, чем для цилиндрических свай, тем самым стоимость и собственный вес конических и клиновидных свай будет меньше, чем у цилиндрических.

Подтверждение сказанного выше утверждения нашло свое отражение в исследованиях целого ряда как отечественных, так и зарубежных ученых.

Исследования выполненные А. Б. Пономаревым [59-61] показали, что полые конические железобетонные сваи, благодаря особенностям их изготовления отличаются высокой прочностью сечения по сравнению со сваями из вибрированного бетона. Удельная несущая способность полых конических свай в среднем на 48-54% выше удельной несущей способности призматических свай и на 31-36% выше, чем у пирамидальных аналогичной длины. Им установлено, что сопротивление грунта по боковой поверхности конических свай складывается из двух компонентов: сил трения грунта по боковым граням и нормальных сил отпора грунта.

О. В. Хряниной [91-93] в ходе своих исследований установлено, что несущая способность пирамидальных свай возрастает с увеличением угла наклона граней свай. Так, при увеличении уклона граней от 1 до 3 град, удельная несущая способность (отношение несущей способности сваи к объему материала затраченного на ее изготовление) сваи возросла более чем в 1,5 раза.

Согласно исследованиям Meyerhof, G. G. [122], несущая способность конических свай по боковой поверхности на 50 % больше, чем у свай постоянного сечения при условии, что уклон граней сваи составляет более 1 %.

Adejumo, T. W. [98] исследовал влияние формы свай и технологии их устройства на несущую способность. В ходе лабораторных и полевых испытаний было установлено, что несущая способность конических свай в 1,5–2 раза больше чем у призматических и в 2–3 раза больше чем у цилиндрической. Ученый установил, что забивные сваи имеют большую несущую способность в песчаных грунтах, в то время как буронабивные сваи лучше подходят для связных глин и илистых грунтов. При этом результаты полевых испытаний имели сходимость 88 % с аналитическими методами, что можно считать достаточно хорошим показателем.

Robinsky, E. L, и Morrison, C. F. [132] занимались изучением влияние угла наклона боковой поверхности конических свай на их осадку в несвязных грунтах. Ими было установлено, что в однородных несвязных грунтах большая часть

нагрузки воспринимается боковой поверхностью конической сваи. Так же что конические сваи, согласно исследованию, могут воспринимать большие нагрузки, чем сваи с вертикальными стенками, однако в их работе не приводится количественная оценка увеличения несущей способности конических свай по отношению к цилиндрическим.

В работе Poulos и Sim [128] проводится анализ различных типов и видов свай с точки зрения оценки их несущей способности при циклическом нагружении. Установлено, что конические сваи больше подходят для восприятия циклических нагрузок, так как концентрации напряжений в теле сваи меньше, чем в цилиндрических.

Jin Qi Wei [111] в ходе испытаний конических свай обнаружил изменение прочностных свойств прилегающих к свае грунтов, связанную с его уплотнением при нагружении сваи. Он также установил, что шаг нагружения не должен превышать 25 % от несущей способности сваи. Так же увеличение угла наклона боковой поверхности приводит к увеличению несущей способности сваи. В ходе лабораторных испытаний, ученый установил, что сопротивление по боковой поверхности конической сваи на 40 % больше чем у свай с ровными стенками. Также было установлено, что несущая способность конической сваи по острию значительно уступает таковой у сваи с ровными гранями.

Robinsky E. I., Sagar W. L и Morrison [133] занимались исследованием влияния формы и объема конических свай на их несущую способность в глинистых грунтах различной консистенции. Ими установлено, что несущая способность конических свай больше чем цилиндрических при одинаковом объеме затраченного на изготовление материала.

В своей работе M. Hesahm и El. Naggar [123] установили, что полное трение сваи зависит от угла внутреннего трения, а также угла наклона стенок конической сваи. Они выяснили, что угол наклона граней сваи оказывает наибольшее положительное влияние на несущую способность сваи в верхней ее части равной 20 диаметрам сваи. Ученые установили, что сопротивление конической сваи по

острию составляет 58 % от полного сопротивления, что меньше чем у цилиндрической, составляющее 66 %.

В своих исследованиях Mahmoud Ghazavi [108] занимался изучением несущей способности цилиндрических и конических изготовленных различным способом в глинистых грунтах. Он установил, что при одинаковых перемещениях, наибольшие напряжения возникают в теле цилиндрических свай по сравнению с коническими. Так же было установлено, что несущая способность конических свай на 22-27% выше чем у цилиндрических.

Suman Manandhar и Daisuke Suetsugu [120, 121] в своей работе использовали теорию расширяющихся пор для оценки трения по боковой поверхности забивных конических свай расположенных в глинистых грунтах. Было установлено, что вертикальные касательные напряжения увеличиваются при увеличении угла наклона граней сваи в глинистых грунтах различной консистенции. Установлено, что радиус влияния сваи на окружающий грунт увеличивается вместе с увеличением угла наклона граней свай.

Alka M. Shah и Dr S.P.Dave [99] в своей работе установили, что осадки конических свай уменьшаются при увеличении угла наклона их граней при одинаковой вертикальной нагрузке. Было установлено, что перемещения конических свай с наклоном боковой грани 1, 1,5 и 2 град меньше на 19, 28 и 35 % соответственно по сравнению с перемещениями цилиндрической сваи. Однако, применение конической сваи с углом наклона боковой грани 0,5 град не дало преимущества по сравнению с цилиндрической, т. к. ее перемещения отличается от цилиндрической сваи на 0,6 %, что незначительно. Результаты испытаний позволили ученым сделать выводы о том, что конические свай с углом наклона боковой грани от 1град более эффективны по сравнению с цилиндрическими. Также Alka M. Shah и Dr S.P. Dave пришли к выводу о том, что несущая способность конических свай больше чем цилиндрических в грунтовых условиях сложенных преимущественно глинистыми грунтами. При увеличении угла наклона боковой грани конических свай, происходит уменьшение напряжений в массиве грунта.

Ghazavi and Ahmadi [107] проводили полевые испытания конических и цилиндрических свай одинакового объема и длины. Установлено, что несущая способность конических свай до 80 % больше чем у цилиндрических.

Lindqvist L. и Petaja J. [116] пришли к выводу, что несущая способность забивных конических свай по боковой поверхности увеличивается при увеличении угла наклона их боковой грани. Они предположили, что применение конических свай в грунтовых условиях сложенных водонасыщенными текучими глинами и илами не эффективно. Они установили, что применение конических свай более эффективно в плотных связных грунтах.

В своих исследованиях Vesik, A. S. [138] установил, что максимальное сопротивление по боковой поверхности цилиндрической сваи достигается при осадке сваи в пределах 7–10 мм независимо от ее диаметра. К схожим выводам пришли ученые Kulhawy [113] и Nauroy [125].

Ученый D'Arrolonia, E. [106] изучая работу забивных конических свай расположенных в супесях и глинах установил, что несущая способность по острию таких свай составляет не более 10% от общей несущей способности при нагрузке на сваю до 1000 кН.

Реск [127] Проводил исследования свай в песчаных и глинистых грунтах и установил, что несущая способность конических свай увеличивается в плотных грунтах, а также при увеличении угла наклона боковой поверхности сваи. Он установил, что несущая способность конических свай с углов наклона боковой грани 1 град в 1,5–1,7 раз больше чем у свай постоянного сечения.

Испытания, проведенные учеными Robinsky, E.I. и Morrison, C.F. [131] показали, что несущая способность конических свай, при одинаковых значениях осадки, на 40 % больше чем у цилиндрических.

А. М. Рыбников [76] в своей работе занимался исследованием цилиндрических и конических буронабивных свай с углом наклона граней 1,2 – 2,4 град и длинами по 4,5 метра. Установлено, что при одинаковой осадке, несущая способность конических свай оказалась больше на 20 – 30% чем у цилиндрических. Также ученый пришел к выводу, что с увеличением угла наклона граней, проис-

ходит увеличение несущей способности конических свай, в то время как объем материала, необходимого для изготовления свай, уменьшается.

Zil'Berberg, S. D. [139] в ходе исследований установил, что несущая способность конических свай длиной 3 метра и углом наклона граней 5,7 град в 2,5–3 раза превосходит несущую способность призматических свай с длиной 12 метров и сечением 300x300 мм. Осадки конусных свай оказались меньше чем у призматических свай. Применение конических свай позволило уменьшить стоимость фундамента до 45 %.

Jain, M. P. [110] занимался исследованием деревянных конических свай. Было установлено, что конические сваи обладают большей несущей способностью по сравнению с цилиндрическими, но было отмечено, что несущая способность уменьшается при увеличении угла наклона граней свай.

Kurian и Srinivas [114] занимались изучением деревянных свай с поперечными сечениями в виде квадрата, круга и треугольника, так же их аналогов в виде конических свай с углами наклона граней 1,6; 1,8; 2,4 град соответственно, при этом объем и длина свай оставались постоянными. Испытания показали, что несущая способность конусных свай на 10 % больше, а осадки на 25 % меньше, чем у свай той же формы, постоянного сечения. Было установлено, что напряжения на поверхности конусных свай в 5 раз больше чем на поверхности свай постоянного сечения. В ходе анализа результатов, ученые пришли к выводу о том, что наиболее эффективной формой сечения конической сваи является треугольник, затем квадрат, затем круг.

Ученым Nordland R. L. [124] в ходе своих исследований было установлено, что при уменьшении угла внутреннего трения грунта, повышается положительный эффект от угла наклона граней конических свай. Nordland установил, что угол наклона граней сваи равный 2 град является максимально эффективным для грунтов с углом внутреннего трения (φ) равным 30 град.

Kodiaka J. K. и Moore I. D. [115] в ходе своих испытаний установили, что на несущую способность конических свай наибольшее влияние оказывает модуль сдвига грунта и предложили использовать корректирующий коэффициент

$m = \delta/\varphi$. Результаты испытаний показали, что при увеличении угла наклона грани свай, происходит значительное увеличение касательных напряжений в грунте.

Согласно исследованиям Tristan J. S. [135], конические сваи развивают большее трение по боковой поверхности и имеют большую несущую способность по острию сваи по сравнению с цилиндрическим. Установлено, что в условиях большого давления грунта, конические сваи имеют значительно большие напряжения под острием сваи по сравнению с цилиндрическими, а при низком давлении грунта, наблюдались одинаковые напряжения под остриями свай. Ученый установил, что конические сваи большую часть нагрузки воспринимают боковой поверхностью, в то время как цилиндрические сваи большую часть нагрузки воспринимают острием. В своей работе, Tristan J. S. [135] приходит к выводам о том, что на несущую способность конических свай наибольшим образом влияет угол наклона грани свай, объемные осадки и начальные напряжения в грунте.

Н. В. Купчикова [26] в ходе изучения различных типов свай пришла к выводу о том, что их несущая способность в большой степени зависит от характеристик зоны уплотнения окологрунтового пространства в верхней части и в 2–5 раз выше, чем у обычных призматических свай. Установлено, что несущая способность конических свай возрастает за счет не только увеличения площади оголовка, но и изменения условий работы грунта по боковой поверхности конической сваи вверху и силы трения, которая реализуется в большей мере.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что повышенная несущая способность буроинъекционных свай достигается в основном за счет изменения физико-механических свойств грунтов (уплотнение вследствие обжатия избыточным давлением рабочего раствора) в области его взаимодействия со свайей. Так же происходит взаимное проникновение рабочего раствора в грунт, что приводит к формированию развитой боковой поверхности, тем самым увеличивая несущую способность таких свай. Несущая способность буроинъекционных свай может быть до 2,1 раза больше чем для буровых свай с такими же геометрическими параметрами.

Для конических свай увеличение несущей способности по отношению к цилиндрическим сваям такой же материалоемкости достигается за счет возникновения силы действующей в противоположном направлении по отношению к вдавливающим усилиям. Так же при работе конических свай происходит уплотнение стенок скважины, что приводит к увеличению их несущей способности.

Буроинъекционные цилиндрические и конические сваи [21, 41, 55, 69, 103, 104, 117, 118] применяются для решения следующих геотехнических задач:

1. Фундаменты зданий и сооружений;
2. Усиление существующих фундаментов;
3. Анкерные конструкции;
4. Усиление оснований;
5. Подпорные сооружения;
6. Фундаменты в труднодоступных местах (горная или болотистая местность, стесненные условия строительства).

При этом буроинъекционные цилиндрические и конические сваи не рекомендуется применять на площадках, где в основании залегают глинистые грунты текучей и текучепластичной консистенции [73, 74, 78, 85, 134]. С другой стороны, применение буроинъекционных свай в тугопластичных и твердых глинах малоэффективно, так как при их устройстве не удастся получить развитую боковую поверхность, а также уплотнить грунт в околосвайном пространстве избыточным давлением при инъецировании. В общем случае, на площадках, где основание сложено твердыми глинистыми грунтами экономически выгоднее устроить фундаменты без применения свайных технологий.

Конические забивные и пирамидальные набивные сваи, как и буроинъекционные сваи, нашли достаточно широкое применение в практике строительства [22, 65, 66, 83 и др.]. Область применения таких свай обусловлена в основном тем, что помимо вертикальных (вдавливающих) нагрузок они способны воспринимать значительные горизонтальные усилия. В связи с этим, конические сваи достаточно широко применяются в дорожном строительстве при устройстве опор мостов и путепроводов, так же при строительстве высотных мачт и опор ЛЭП.

С точки зрения геологического строения площадки строительства пирамидальные сваи рекомендуется устраивать в грунтах, однородных по глубине, и в случаях, когда с поверхности залегают более прочные грунты, чем подстилающие слои [13, 91, 61]. Также конические и пирамидальные сваи эффективно применяются в недоуплотненных и просадочных грунтах [10, 22, 33, 65, 66 и др.] Это связано с тем, что при их устройстве происходит уплотнение околосвайного массива грунта за счет уменьшения его пористости.

В ходе обзора существующей технической и научно-технической литературы не удалось выявить область применения буроинъекционных конических свай. Однако, можно сделать предположение, что буроинъекционные конические сваи могут применяться для решения тех же задач, что и конические забивные, пирамидальные набивные и буроинъекционные цилиндрические сваи.

1.3. Существующие подходы к расчету и конструированию буроинъекционных конических свай

На сегодняшний день известен целый ряд методов и подходов по расчету несущей способности конических и клиновидных свай. Так же анализ существующих литературных источников позволил выявить ряд методов и способов по расчету буроинъекционных свай. Для удобства, все существующие подходы по расчету буроинъекционных и конических (клиновидных) свай представлены в виде таблицы (табл. 1.1).

Из рассмотрения таблицы 1.1 видно, что несущая способность буроинъекционных свай согласно методике СП рассчитывается как сумма несущих способностей по острию и по боковой поверхности, как для остальных типов свай. Различие от расчета несущей способности с другими типами свай заключается лишь в значениях коэффициентов условий работы.

Несколько иной подход по расчету буроинъекционных свай предложен профессором К. Ш. Шадунцом [95]. В предложенной им формуле, в отличии от традиционной методики, изложенной в СП 24.13330.2011 (Свайные фундаменты), расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности принимается из условия

Таблица 1.1 – Существующие подходы по расчету свай

№	Автор (источ- точ- ник)	Исходные данные	Расчетная зависимость
Буроинъекционные сваи			
1	СП 24.13330.2011	<p>γ_c – коэффициент условий работы сваи; в случае опирания ее на глинистые грунты со степенью влажности $S_r < 0,85$ и на лессовые грунты – $\gamma_c = 0,8$, в остальных случаях $\gamma_c = 1$;</p> <p>γ_{cR} – коэффициент условий работы грунта под нижним концом сваи; $\gamma_{cR} = 1$;</p> <p>R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа;</p> <p>A – площадь опирания сваи, м²;</p> <p>u – периметр поперечного сечения ствола сваи, м;</p> <p>γ_{cf} – коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности сваи, зависящий от способа образования скважины и условий бетонирования; значения коэффициента условий работы γ_{cf} в зависимости от грунтовых условий для буроинъекционных свай принимается в суглинках и глинах равным 0,8;</p> <p>f_i – расчетное сопротивление i-го слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи, кПа;</p> <p>h_i – толщина i-го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м.</p>	$F_d = \gamma_c (\gamma_{cR} R A + \gamma_{cf} u \sum f_i h_i),$

№	Автор (источ- точ- ник)	Исходные данные	Расчетная зависимость
2	American Association [100]	f_{si} – предельное значение трения грунта по боковой поверхности сваи для i -го слоя, кПа; D – фактический диаметр сваи фактический, м; d_{li} – мощность i -го слоя грунта, м.	$Q_s = \pi D \sum f_{si} d_{li}$
3	Шадунц К.Ш. [95]		$F_d = \gamma_c (\gamma_{cR} R A + \gamma_{cf} u \sum (2\pi r_i c_i \operatorname{tg} \varphi) h_i),$
Конические, пирамидальные и клиновидные сваи			
3	СП 24.13330.2011	$f_i; u_{0,i}; i; i_p; k_i; \zeta_r; E_i$ u_i – наружный периметр сваи в i -м сечении, м f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи; $u_{0,i}$ – сумма размеров сторон i -го поперечного сечения сваи, которые имеют наклон к оси сваи; i_p – наклон боковых граней к ее оси в долях единицы; E_i – компрессионный модуль деформации i -го слоя грунта; k_i – коэффициент, зависящий от вида грунта; ζ_r – реологический коэффициент	$F_d = \gamma_c [RA + \sum h_i (u_i f_i + u_{0i} i_p E_i k_i \zeta_r)]$

№	Автор (источ- точ- ник)	Исходные данные	Расчетная зависимость
4	Б.В. Бахолдин И.Т. Игонькин	$A_i, f_i, \sigma_{\text{toi}}, j, a$ A_i – площадь боковой поверхности сваи i -го слоя; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи; σ_{toi} – отпор грунта, действующий нормально к боковым граням сваи; φ – угол внутреннего трения грунта; a – угол наклона граней сваи к вертикали.	$F_d = \sum A_i [(f_i + \sigma_{\text{toi}} (\text{tg } \varphi + \text{tg } a))] \cos a$
5	Ф.К. Лапшин	P_i, A_i, j, c, a P_i – давление обжатия; A_i – площадь боковой поверхности сваи i -го слоя; φ – угол внутреннего трения; c – коэффициент сцепления; a – угол наклона граней сваи к вертикали.	$F_d = \sum A_i [P_i (\text{tg } \varphi + \text{tg } a) + c] \cos a$
6	О. С. Вертынский [7]	$\lambda', P_i, A_i, j, c, a$ $\lambda' = k * 1/\lambda$ – поправочный коэффициент; k – коэффициент, определенный аналитически и приближенно равный 19; λ – относительное заглубление; F_d – несущая способность боковой поверхности сваи; P_i – давление обжатия, кПа; A_i – площадь боковой поверхности сваи i -го слоя, м ² ; φ – угол внутреннего трения, град; c – коэффициент сцепления, кПа; a – угол наклона граней сваи к вертикали.	$F_d = \lambda' \sum A_i [P_i (\text{tg } \varphi + \text{tg } a) + c] \cos a$

№	Автор (источ- точ- ник)	Исходные данные	Расчетная зависимость
7	Jin Qi Wei [111]	Q_s – Несущая способность конических свай по боковой поверхности K_s – коэфф. бокового давления грунта, $K_s = 1 - \sin\varphi$ K_t – коэффициент, отражающий влияние угла наклона боковой поверхности сваи на ее несущую способность по боковой поверхности σ_v – вертикальные напряжения δ – угол трения между грунтом и материалом сваи	$Q_s = \int g K_s K_t \sigma_v \tan\delta p dz$
8	Nordland R.L. [124]	$N_q A \sigma_v K_s \sigma_d \omega \delta C_d$ N_q – фактор несущей способности; A – площадь острия сваи; σ_v – давление грунта на острие сваи; K_s – коэфф. бокового давления грунта; σ_d – давление грунта на глубине d; ω – угол наклона граней сваи; δ – угол трения в месте соприкосновения сваи с грунтом; C_d – периметр сваи на глубине d.	$F_d = N_q A \sigma_v + \sum_{d=0}^{d=D} K_s \sigma_d \sin(\omega + \delta) + \sec \omega C_d$
9	Kodiaka и Moore [115]	$N_q A \sigma_v K_s \sigma_d \omega \delta C_d t$ N_q – фактор несущей способности; A – площадь острия сваи; σ_v – давление грунта на острие сваи K_s – коэфф. бокового давления грунта σ_d – давление грунта на глубине d ω – угол наклона граней сваи δ – угол трения в месте соприкосновения сваи с грунтом C_d – периметр сваи на глубине d, м $t = \delta/\varphi$ – Поправочный коэффициент для K_s	$F_d = N_q * A * \sigma_v + \sum_{d=0}^{d=D} m K_s * \sigma_d * \sin(\omega + \delta) + \sec \omega * C_d * \Delta$

определения реакции упругого отпора и коэффициента шероховатости в пределах рассматриваемого слоя грунта. При этом боковое давление грунта принято равным удельному сцеплению грунтов в соответствии с исследованиями Г. К. Бондарик [5].

В зарубежной практике [104, 127, 122, 134 и др.] при расчете несущей способности буроинъекционных свай, вне зависимости от грунтовых условий, ее рассматривают, как висячую, при этом, несущую способность по острию, в расчетах не учитывают. В дополнение следует сказать, что при выполнении расчетов, в отличие от отечественной методики, за значение диаметра сваи принимается величина, реально получаемая в грунте после уплотнения стенок скважины избыточным давлением. При этом основные характеристики для расчетов принимаются исходя из грунтовых условий, технологии устройства фирмы производителя оборудования для устройства свай [24].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что существующие подходы по расчету буроинъекционных свай как отечественные, так и зарубежные схожи и базируются на одних и тех же принципах. Существующие отличия в основном заключаются в значениях принимаемых поправочных коэффициентов. Так же следует отметить, что в целом существует относительно мало работ посвященных работе буроинъекционных свай в целом.

В отличие от буроинъекционных свай, существующие методики по расчету несущей способности для конических клиновидных и пирамидальных свай содержат в себе принципиально различные подходы. Так, формула, представленная в СП по расчету несущей способности пирамидальных свай, схожа с формулой для цилиндрических свай. Однако, при этом, несущая способность по боковой поверхности определяется через компрессионный модуль деформации (E_k) и реологический коэффициент грунтов (ζ_r). В методике предложенной учеными Б. В. Бахолдиным и И. Т. Игонькиным при определении несущей способности пирамидальных свай несущая способность по острию сваи в расчете не рассматривается. Несущая способность по боковой поверхности определяется через геометрические характеристики сваи, угол внутреннего трения грунтов основания

(φ), а также величину отпора грунта действующего нормально к наклонной поверхности свай. Таким образом, для определения несущей способности необходимо дополнительно вычислять величину отпора грунта, что в свою очередь может усложнить выполнение расчетов.

Формула, предложенная Ф. К. Лапшиным [29, 31], помимо стандартных физико-механических характеристик грунтов и геометрических параметров свай дополнительно содержит давление обжатия грунта (P_i) действующее на сваю. Таким образом, данная формула позволяет через давление обжатия грунта (P_i) дополнительно учитывать технологию устройства свай, что может повысить точность расчетов по определению несущей способности одиночных конических и пирамидальных свай.

О. С. Вертынский [7] исследуя работу конических буроинъекционных свай в дополнение к методике расчета предложенной ученым Ф. К. Лапшиным [29, 31] предложил использовать поправочный коэффициент (k), что, по его мнению, увеличивает точность расчетов по определению несущей способности конических свай. В дополнение следует сказать, что коэффициент (k) можно назвать эмпирическим так как О. С. Вертынский занимался изучением конических свай на примере натуральных испытаний.

В зарубежной практике ученым Jin Qi Wei [111] предложен метод расчета, который основывается на определении сил трения по боковой поверхности конических свай, при этом коничность сваи учитывается через поправочный коэффициент, а также напряжения в грунтовом массиве. Однако данных по сравнению результатов расчетов по предложенной методике и натуральных испытаний не выявлено.

Формула, предложенная Nordland [124], содержит в себе целый ряд параметров и характеристик, которые могут значительно усложнить выполнение расчетов. Та же, следует отметить, что данный метод напрямую не учитывает физико-механические характеристики грунта основания, а грунтовые условия учитываются только через давление от собственного веса. При данной методике невоз-

можно учесть уплотнение грунта вокруг ствола сваи вследствие обжатия избыточным давлением рабочего раствора.

Учеными Kodiaka и Moore [115] ,была доработана формула, предложенная Nordland [124] путем применения поправочного коэффициента (m) для коэффициента бокового давления.

Таким образом, рассмотренные методы расчета несущей способности, сложны в применении, поскольку содержат ряд параметров, которые трудно учесть в практике расчетов и проектирования.

В целом можно сделать вывод о том, что существующие на сегодняшний день методы и методики расчета буроинъекционных и конических свай с достаточной точностью способны учитывать все основные особенности характерные для каждого вида свай. Однако в ходе обзора не удалось выявить метод расчета несущей способности буроинъекционных конических свай.

1.4. Основные задачи исследований

В результате обобщения и анализа результатов обзора научной и научно-технической литературы сформулированы основные задачи исследований:

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.

2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАИ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИХ РАБОТЫ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

2.1. Разработка конструктивного решения буроинъекционной конической сваи

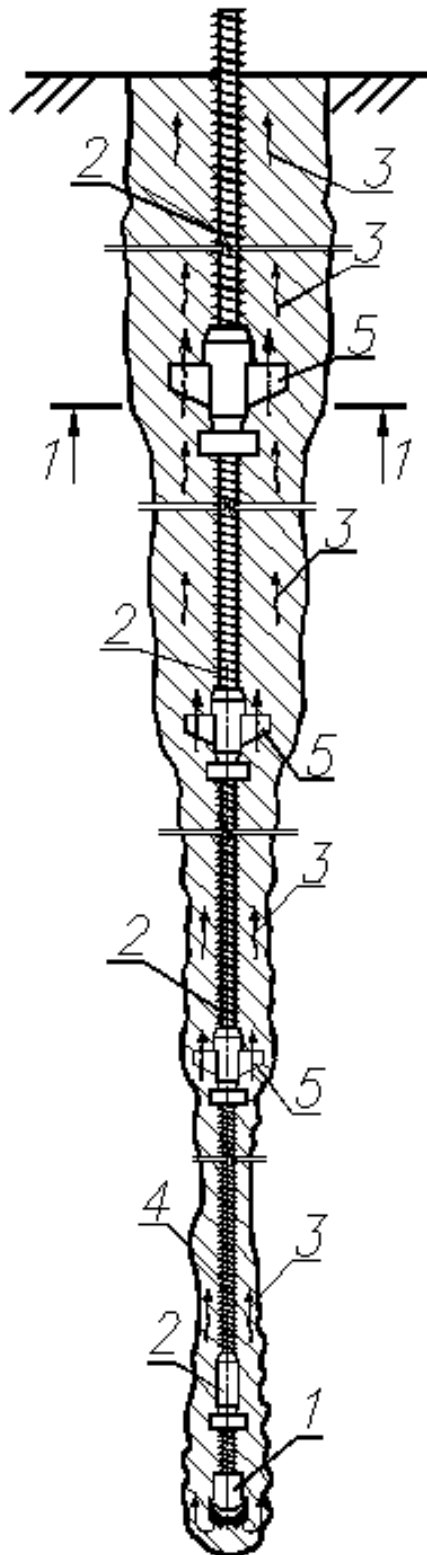
При разработке конструкции буринъекционной конической сваи за основу был принят способ устройства буроинъекционных цилиндрических свай «Titan» фирмы «Ishebek». Согласно данного способа [24] конструкция буроинъекционной цилиндрической сваи состоит из толстостенных трубчатых винтовых штанг диаметром от 30 до 250 мм длиной от 2 до 6 м, соединенных муфтами. На первую штангу накручивается буровой инструмент и посредством буровой техники, конструкция забуривается в грунт. В процессе устройства сваи мелкозернистый раствор попадает в скважину через полости в штангах, и через отверстия в буровой коронке. После выхода острия сваи на проектную глубину подача бурового раствора прекращается и в забой скважины под давлением не более 1 МПа подается рабочий раствор.

Для устройства конической буроинъекционной сваи (рис. 2.1, а) предложено снабдить соединительные муфты буровым инструментом (рис. 2.1, б). При этом предлагаемая муфта-коронка (рис. 2.1, в) позволяет соединять буровые штанги различного диаметра.

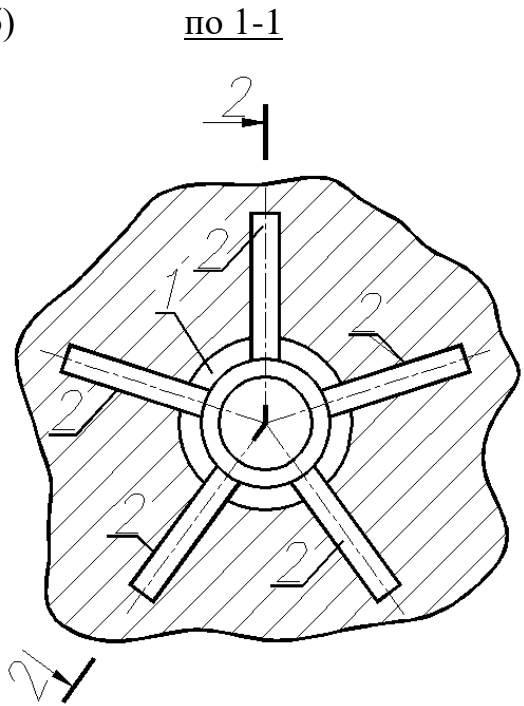
Применение предложенных муфт-коронки позволяет выполнить ствол буроинъекционной сваи по форме в виде усеченного конуса. Максимальный диаметр сваи устраивается в уровне оголовка и уменьшается к ее острию.

Таким образом, предлагаемая конструкция сваи выполняется по способу устройства буроинъекционных цилиндрических свай, а по своей форме выполняется в виде усеченного конуса. В работе под буроинъекционными коническими сваями понимается конструктивное решение, предложенное и запатентованное автором в соавторстве с профессором О. Ю. Ещенко и др. [49-53].

а)



б)



в)

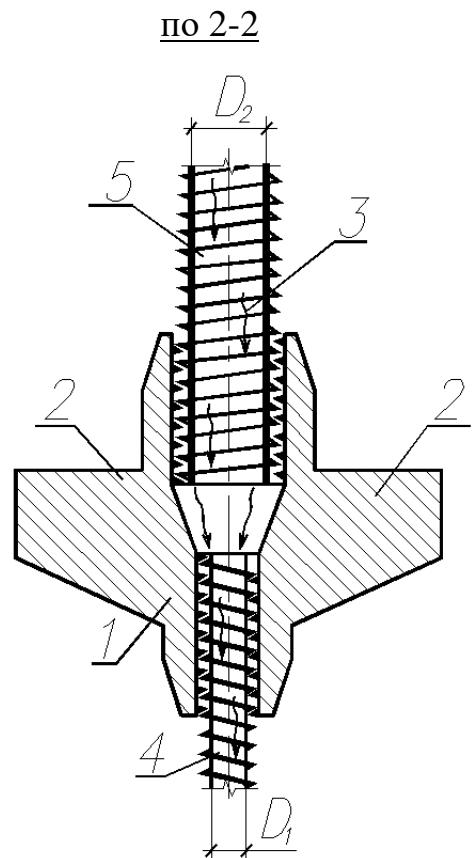


Рисунок 2.1 – Конструкция буринъекционной конической сваи:
 а – продольное сечение буринъекционной конической сваи;
 б – поперечное сечение буринъекционной конической сваи; в –
 разрез 1-1; 1 – коронка (долото); 2 – соединительная муфта; 3 –
 мелкозернистый бетон; 4 – штанга; 5 – соединительная муфта
 снабженная буровым инструментом (муфта-коронка)

Исследование работы буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах в работе выполняются на примере предложенной конструкции буроинъекционной конической сваи.

2.2. Выбор грунтовых условий для моделирования работы буроинъекционной конической сваи

Для оценки работы буроинъекционных конических свай, в качестве грунтовых условий были рассмотрены глинистые грунты различной разновидности и состояния. К таким грунтам обычно относят супеси, суглинки и глины. По возрасту и типу происхождения рассматривались четвертичные отложения глинистых грунтов (аллювиальные, делювиальные и озерно-аллювиальные). Предполагалось, что рассматриваемые грунтовые условия не обладают специфическими (неблагоприятными) свойствами и не относятся к особым видам грунтов (просадочным и набухающим). Выбор физико-механических характеристик глинистых грунтов выполнялся на основе обобщения данных полученных из отчетов по инженерно-геологическим изысканиям и материалам нормативной документации [46, 82, 86, 87]. При выборе характеристик грунтов для проведения исследований был учтен отечественный и зарубежный опыт устройства буроинъекционных цилиндрических свай, область их применения и особенности технологии устройства. При этом рассматривались преимущественно тугопластичные и мягкопластичные суглинки и глины, а также пластичные супеси. Физико-механические характеристики глинистых грунтов, используемых для устройства и оценки работы буроинъекционных конических свай, представлены в виде таблицы (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Характеристики глинистых грунтов, используемые для оценки работы буринъекционных конических свай

Разновидность глинистых грунтов		Супесь: пластичная	Суглинок: - тугопластичный - мягкопластичный	Глина: - мягкопластичная
Физические характеристики	Плотность грунта, ρ , г/см ³	1,7–1,95	1,75–2,0	1,8–2,1
	Коэффициент пористости e , д. ед.	0,45–0,85	0,5–1,00	0,55–1,05
	Плотность частиц грунта, ρ_s , г/см ³	2,65–2,7	2,7–2,75	2,75–2,78
	Естественная влажность W , %	8–12	10–20	12–22
Классификационные показатели	Число пластичности I_p , %	1–7	7–17	> 17
	Показатель текучести I_L , д.ед.	0,1–0,70	0,25–0,75	0,25–0,75
Прочностные и деформационные характеристики	Угол внутреннего трения φ , град.	18–25	14–24	10–20
	Удельное сцепление грунта c , кПа	5–20	12–30	20–42
	Модуль деформации грунтов E , МПа	8–15	7–14	8–14
	Коэффициент Пуассона ν	0,32–0,36	0,33–0,36	0,33–0,36

Из рассмотрения таблицы 2.1 видно, что плотность глинистых грунтов находится в интервале от 1,7 до 2,1 г/см³. Коэффициент пористости принимает значения в пределах от 0,45 до 1,05, а плотность частиц глинистого грунта изменяется от 2,65 до 2,78. Естественная влажность находится в интервале значений от

8 до 22 %. В работе были приняты следующие значения физико-механических характеристик: плотность грунта (ρ) 1,75–1,85 г/см³ (для всех разновидностей глинистых грунтов); коэффициент пористости (e) для супеси 0,70–0,78, для суглинков 0,75–0,85, для глин 0,85–0,95; плотность частиц грунта (ρ_s) 2,68–2,72 г/см³; естественная влажность (W) 0,11–0,15. Удельное сцепление грунта (c) изменялось от 10 кПа для супесей до 38 кПа для глин. Угол внутреннего трения (φ) от 14 до 30 град. Модуль деформации грунта (E) в исследованиях принимался в пределах от 9 до 15 МПа. В целом, для оценки влияния глинистого грунта на работу буринъекционных конических свай, были выделены 9 инженерно-геологических элементов (ИГЭ), которые представлены в виде таблицы (табл. 2.2.).

Таблица 2.2 – Прочностные и деформационные характеристики глинистых грунтов, используемые для оценки работы буринъекционных конических свай

Удельное сцепление c , кПа	Угол внутреннего трения φ , град			Модуль деформации E , МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Показатель текучести, I_L		
	14	22	30					
10	1	2	3	8-14	0,32...0,35	0,45		
	Супесь	Супесь	Супесь					
22	4	5	6					
	Суглинок	Суглинок	Супесь					
38	7	8	9					
	Глина	Глина	Суглинок					
								0,2

Таким образом, при выполнении исследований работы буринъекционных конических свай принимались значения физических, прочностных и деформационных характеристик глинистых грунтов, полученных на основе анализа грунтовых условий строительства промышленных и гражданских зданий, сооружений (табл. 2.2.).

2.3. Обоснование основных параметров системы «буроинъекционная коническая свая – грунт»

Общие сведения о системе «буроинъекционная коническая свая – грунт».

В диссертационной работе понятие «буроинъекционная коническая свая – грунт» предусматривает систему, состоящую из массива грунта конечных размеров, внутри которого расположена буроинъекционная коническая свая с заданными параметрами, взаимодействующая с окружающим основанием. При создании системы, описывающей работу буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах, учитывались следующие основные вопросы:

1. Геометрические параметры расчетной системы;
2. Математическая модель грунта основания;
3. Математическая модель материала сваи;
4. Граничные условия расчетной системы.

Оценка работы системы «буроинъекционная коническая свая-грунт» осуществлялась при помощи персонального компьютера с использованием программного комплекса. В основу используемых программ заложен метод конечных элементов, который на сегодняшний день широко применяется в геотехнических расчетах различной сложности. В отличие от других методов расчета свай и свайных фундаментов метод конечных элементов позволяет учесть:

- нелинейное поведение рассматриваемой системы при ее нагружении;
- совместную работу грунта и свайного фундамента;
- неоднородное напластование грунтов и др.

Для выполнения расчетов и моделирования работы конических свай был принят программный комплекс *Midas GTS NX*. Рассматриваемый программный комплекс разработан компанией *MIDAS Information Technology Co., Ltd. (MIDAS IT)*, специализирующейся на разработке программного обеспечения для проектных работ в сфере геотехнических расчетов для целей промышленного, гражданского и транспортного строительства [54]. Из особенностей рассматриваемого программного комплекса *Midas GTS NX* можно отметить:

1. Наличие более 50 моделей грунта;

2. Учет стадий устройства свай;
3. Возможность выполнения расчетов в плоской и объемной постановке;
4. Автоматическая генерация и точная настройка сетки конечных элементов;
5. Использование в расчетах физических и виртуальных элементов процессора и др.

Моделирование работы системы «буринъекционная коническая свая – грунт» выполнялось объемными элементами (телами). К преимуществам данного подхода можно отнести следующее:

1. Учитывается объемная работа грунта и свай;
2. Отсутствуют ограничения характерные для плоских задач;
3. Учитывается геометрическое соответствие рассматриваемых параметров реальной задаче.

Ограничениями для использования объемных тел при моделировании работы конической сваи являются, как правило, либо недостаточные возможности расчетного программного комплекса, либо недостаточная мощность используемого компьютера.

Известно, что при выполнении расчетов свай в ПК *Midas GTS NX* изополя напряжений и деформаций распространяются равномерно от места приложения внешней нагрузки. Для исключения областей, которые заведомо не будут участвовать в расчете, область грунтового массива моделируется, как тело вращения (цилиндр). За ось вращения принята вертикальная ось *Z*. С целью сокращения времени проведения расчетов и учитывая, что рассматриваемая задача симметрична, в исследованиях использована только половина полноразмерной модели. Ось симметрии совмещена с осью координат.

При моделировании работы (или нагружения) сваи за основу была принята, конструкция буринъекционной конической сваи (см. п. 2.1). Вполне очевидно, что описать сложную форму боковой поверхности буринъекционной конической сваи численными методами практически невозможно. Поэтому для выполнения расчетов, в качестве допущения, тело сваи по своей форме рассматривалось в ви-

де усеченного конуса с гладкой боковой поверхностью (рис. 2.2). Такую сваю можно охарактеризовать следующими геометрическими параметрами: диаметр оголовка сваи ($D_{ог}$), диаметр острия сваи ($D_{ос}$), длина сваи ($L_{св}$).

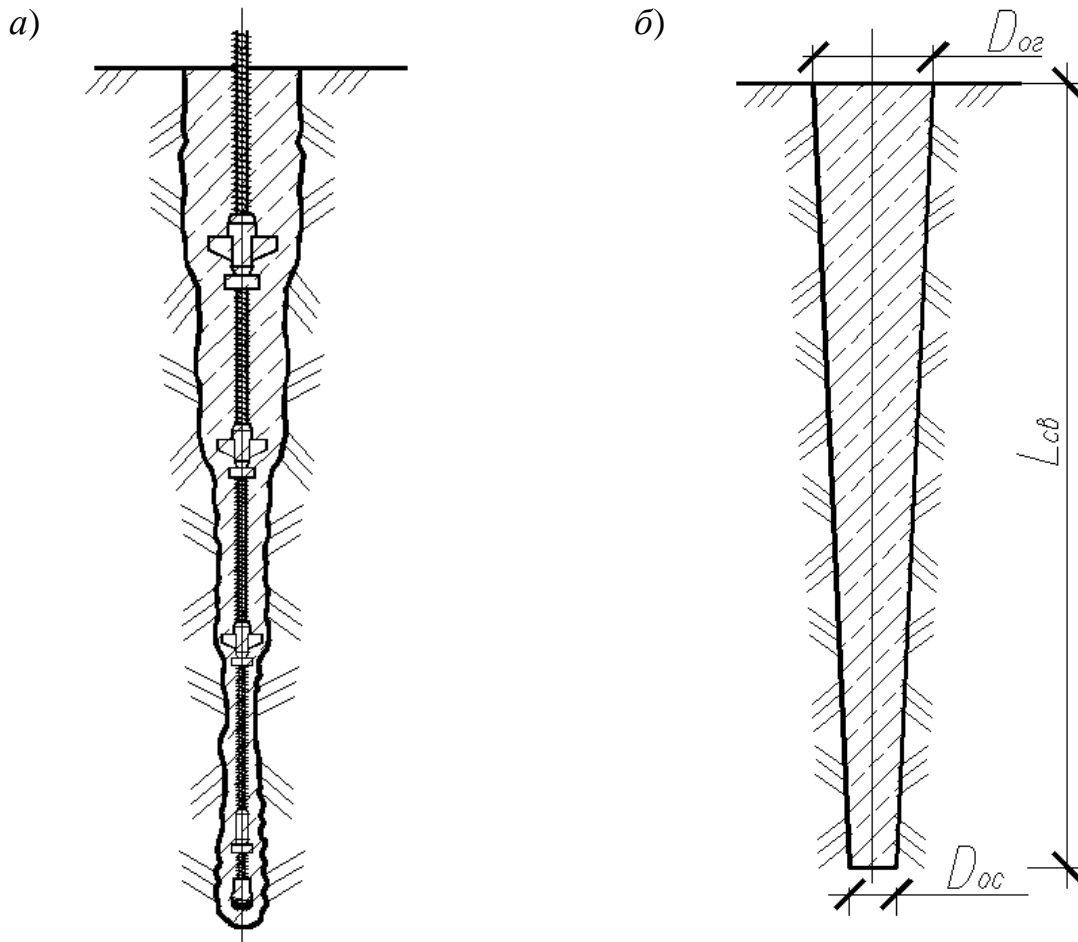


Рисунок 2.2 – Буриинъекционная коническая свая:

a – физическая модель; *б* – расчетная схема

Способ устройства буриинъекционных конических свай схожа со способом изготовления буриинъекционных цилиндрических свай фирмы «*Ischebek*» (Германия), то и выбор основных геометрических параметров буриинъекционной конической сваи выполнен по тому же принципу, что и для свай «*Titan*». При этом приняты следующие допущения: диаметр буровых лопастей муфт-коронок принят равным диаметру согласно номенклатуре фирмы «*Ischebek*» для глинистых грунтов; при опрессовке скважины ее диаметр увеличивается в 1,4 раза согласно данным производителя свай «*Titan*». Таким образом, в работе геометрические па-

раметры поперечного сечения буроинъекционной конической сваи рассматриваются в интервале от 100 до 390 мм (табл. 2.3).

Таблица 2.3 – Диаметр поперечного сечения буроинъекционных конических свай

Диаметр буровых коронок для устройства свай «Titan» [22] d , мм	Фактический диаметр сваи с учетом опрессовки стенок скважины [22] D , мм	Диаметры сваи принимаемые в исследованиях $D_{oc(ог)}$, мм
75	105	100
95	133	130
150	210	210
220	308	300
280	392	390

Так как особый научный интерес представляют вопросы, связанные с оценкой влияния формы буроинъекционной конической сваи на ее осадку и, учитывая, что наибольшее значение угла наклона боковой поверхности такой сваи можно достичь лишь, когда размер острия и оголовка сваи принимают соответственно минимальные и максимальные значения, то диаметр острия сваи во всех исследованиях принят постоянным и равным 100 мм, а диаметр оголовка принимал значения согласно таблице 2.3.

В исследованиях, для определения длины буроинъекционной конической сваи ($L_{св}$) рассмотрена номенклатура сборных железобетонных полых конических свай [75]. В работе длина буроинъекционной конической сваи рассмотрена в интервале от 3 до 9 м.

Учитывая, что на сегодняшний день практически отсутствуют указания по назначению определенного типа конечных элементов для решения подобных задач, то в первом приближении для дискретизации расчетной области системы «буроинъекционная коническая свая – грунт» были приняты восьми узловые ко-

нечные элементы. Для повышения качества расчета в околосвайном пространстве выполнено сгущение сетки конечных элементов.

Таким образом, в программном комплексе *Midas GTS NX* создана расчетная схема для системы «буроинъекционная коническая свая - грунт». К основным характеристикам рассматриваемой расчетной схемы можно отнести: диаметр оголовка сваи ($D_{ог}$), длина сваи ($L_{св}$), размер расчетной области в горизонтальном направлении (R), размер расчетной области в вертикальном направлении (H), параметры контактного элемента, тип и количество конечных элементов.

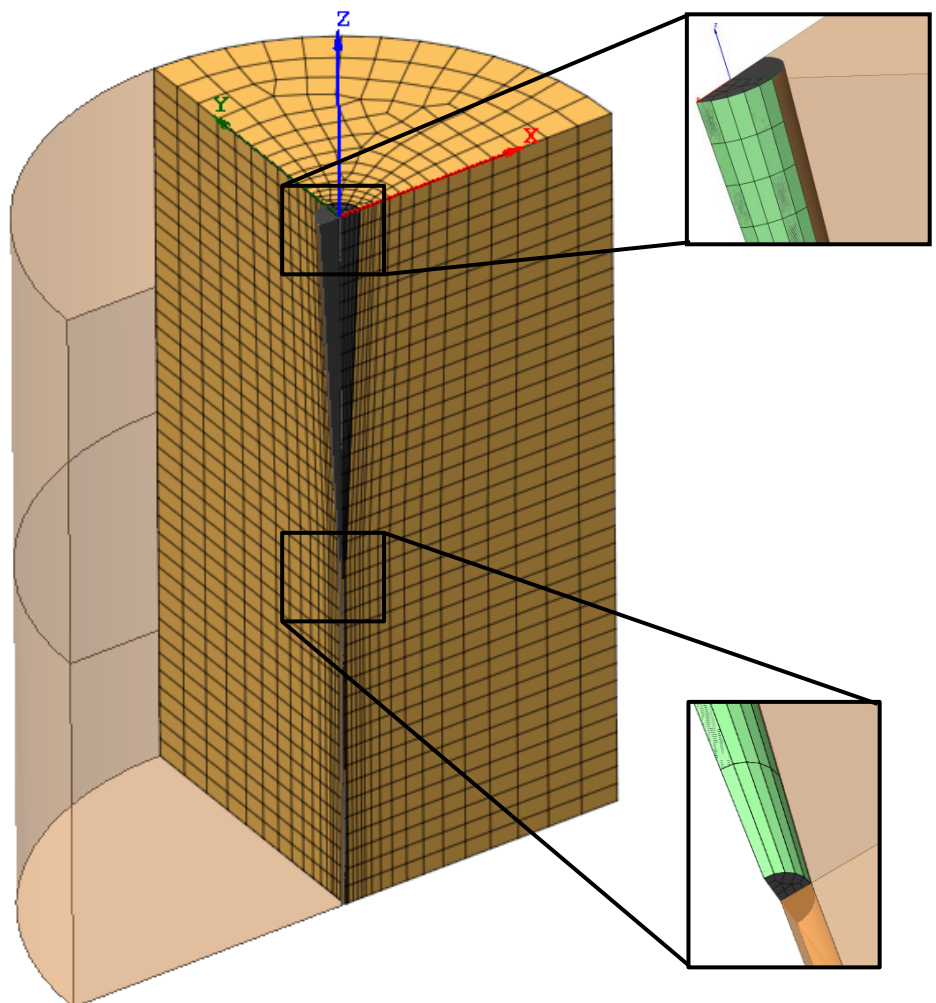


Рисунок 2.3 – Расчетная схема системы «буроинъекционная коническая свая – грунт»

В дальнейшем все исследования работы буроинъекционных конических свай выполняются на основе, разработанной для *Midas GTS NX* расчетной схемы системы «буроинъекционная коническая свая - грунт» (рис. 2.3).

Модель грунта. Как известно грунт представляет собой сложную многокомпонентную среду, состоящую из твердых частиц, воды и воздуха. Для описания поведения такой среды с помощью математического аппарата на сегодняшний день создано большое количество расчетных моделей грунта [42, 94]. Основные отличия всех моделей заключаются в количестве требуемых исходных данных и сложности определяющих модель уравнений.

Для использования относительно простых математических моделей требуется небольшое количество исходных параметров (как правило, не более 5), которые можно получить при «стандартных» (одометрических) испытаниях грунтов. Недостаток данных моделей заключается в большом количестве допущений используемых в расчетах и неточном описании поведения грунта. Более сложные модели, безусловно, более точно описывают поведение грунта, но при этом требуют данные получаемые при стабилметрических испытаниях, что значительно осложняет их использование.

Другой немало важный вопрос, который учитывался при выборе применяемой расчетной модели грунта, это свойство глинистых грунтов проявлять нелинейное поведение при нагружении. Таким образом, для выполнения исследований рассматривались расчетные модели грунта использующие стандартные физико-механические характеристики глинистого грунта и при этом с достаточной точностью описывающие поведение глинистых грунтов при нагружении с учетом их нелинейного поведения.

В современной практике выполнения геотехнических расчетов все большее применение получили расчетные модели грунтов использующие критерии прочности Кулона Мора и Друккера-Прагера [105]. Для применения этих моделей грунта используются следующие характеристики: удельный вес (γ), коэффициент Пуассона (ν), угол дилатансии (ψ), модуль деформации (E), значение удельного сцепления (c) и угла внутреннего трения грунта (φ).

Все выше перечисленные характеристики присутствуют практически в любом отчете об инженерно-геологических изысканиях, что делает эти модели

удобными для применения. При этом, согласно [4] при помощи данных моделей можно с достаточной точностью определять несущую способность свай.

В расчетной модели грунта, использующей критерий прочности Друкера-Прагера [20], закон течения может быть как ассоциированным с пластическим течением, так и неассоциированным. Поверхность текучести не меняется с ростом деформаций, следовательно, отсутствует закон упрочнения, а материал является идеально упруго-пластичным. Эквивалентные напряжения для модели Друкера-Прагера определяются выражением:

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \sqrt{\frac{1}{2} \{s\}^T [M] \{s\}}, \quad (2.1)$$

где β – константа материала;

$\sigma_m = 1/3 (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ - среднее или гидростатическое напряжение;

$\{s\}$ - девиаторная часть напряжений;

$[M]$ – матрица жесткости.

Это выражение представляет собой модифицированный критерий Мизеса и учитывает влияние среднего, или гидростатического, напряжения. Чем выше гидростатическое напряжение (всестороннее давление), тем выше предел текучести.

Параметр β – константа материала, определяемая выражением:

$$\beta = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}}, \quad (2.2)$$

где φ – угол внутреннего трения;

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Предел текучести материала определяется выражением:

$$\sigma_y = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}}, \quad (2.4)$$

где c - величина удельного сцепления, кПа.

Таким образом, критерий текучести, принимает вид:

$$F = 3\beta\sigma_m + \frac{\left[\frac{1}{2} \{s\}^T [M] \{s\}\right]}{2} - \sigma_y = 0. \quad (2.5)$$

В пространстве главных напряжений эта поверхность текучести представляет собой круговой конус с параметрами материала, выбранными таким образом, что поверхность является описанной по отношению к шестиграннику Мора-Кулона (рис. 2.4). Это позволяет повысить точность нелинейных расчетов при решении задач выполняемых объемными элементами.

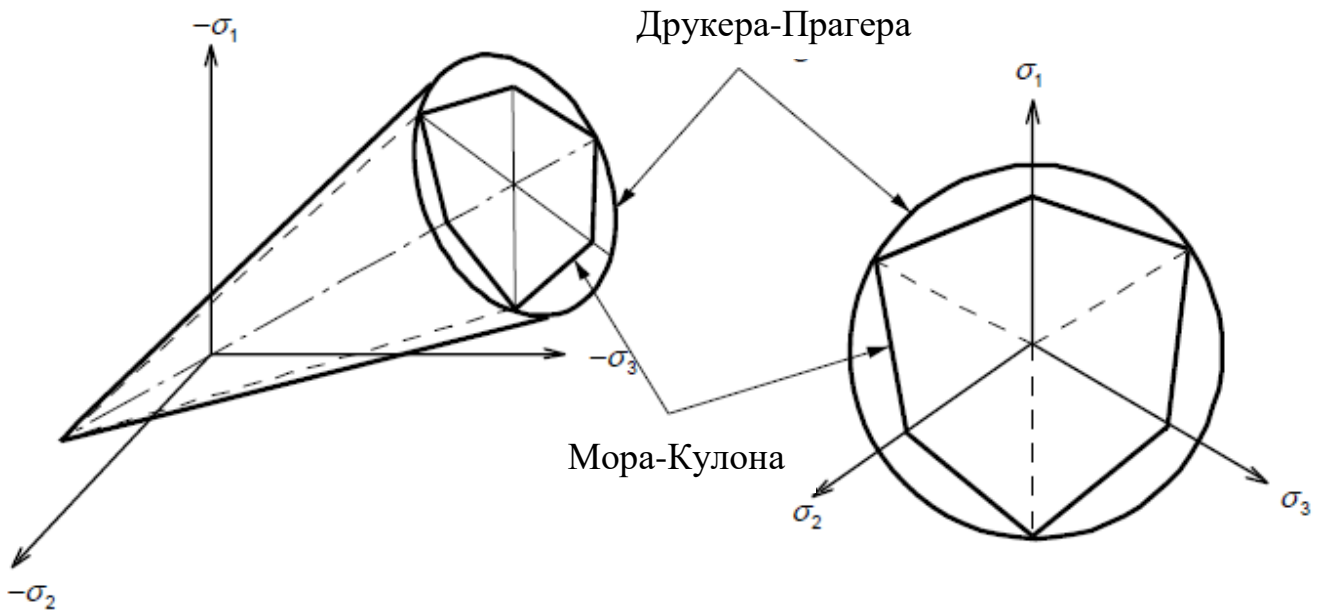


Рисунок 2.4 – Критерий прочности Друкера-Прагера и Мора-Кулона

Из преимуществ модели грунта использующей критерий прочности Друкера-Прагера для выполнения расчетов буринъекционных конических свай следует отметить:

1. Используются две характеристики глинистых грунтов, которые легко получить из одометрических испытаний грунтов;
2. Коническая поверхность текучести позволяет повысить качество расчетов для задач, моделируемых объемными элементами;
3. Модель учитывает обжатие грунта от собственного веса.

Таким образом, в работе, при расчете буринъекционной конической сваи, для грунтового массива применяется идеально упруго-пластическая модель использующая критерий прочности Друкера–Прагера.

Модель материала свай. При устройстве буринъекционных конических свай в качестве материала свай, как правило, используется мелкозернистый бетон на песчаном заполнителе марки не ниже М350 (класс В25). Сам по себе бетон является однородным сплошным материалом и при нагружении проявляет линейные свойства в достаточно большом диапазоне нагрузок, значительно превосходящем предельно допустимые значения для любых глинистых грунтов. Для описания поведения материала бетона численными методами при геотехнических расчетах чаще всего используется самая простая линейно–упругая модель. При моделировании используются только две характеристики материала: модуль деформации (E) и коэффициент Пуассона (ν). При проведении расчетов объемных моделей, связь между напряжениями и деформациями описывается следующим выражением:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \\ & & \frac{1-2\nu}{2} \\ & & \frac{1-2\nu}{2} \\ & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

Таким образом, для описания поведения материала одиночной буроинъекционной конической сваи (бетон класса В25) в расчетах принята изотропная линейно-упругая модель со следующими характеристиками: модуль деформации (E) равен $27,5 \times 10^9$ Па; коэффициент Пуассона (ν) равен 0,18.

Граничные условия. В работе под граничными условиями понимается дополнение к основному дифференциальному уравнению модели, задающее его поведение на границах рассматриваемой области [8]. Как правило, дифференциальные уравнения имеют не одно, а целое семейство решений. Граничные условия позволяют выбрать из него одно, соответствующее реальному физическому процессу или явлению.

Известно, что граничные (краевые) условия условно разделяются на существенные и естественные. При решении задач механики сплошных сред к существенным граничным условиям, как правило, принято относить ограничение перемещений. Согласно теории упругости твердого тела такие граничные условия называются кинематическими. Таким образом, в рассматриваемой расчетной схеме системы «буроинъекционная коническая свая – грунт» задаются кинематические граничные условия, а именно: на нижней грани запрещены перемещения и повороты во всех направлениях ($U_x=U_y=U_z=0, R_x=R_y=R_z=0$), на боковых гранях разрешены перемещения вдоль вертикальной оси Z ($U_x=U_y=0, R_x=R_y=R_z=0$), а в плоскости XZ запрещены перемещения в направлении оси Y ($U_y=0$) из условия симметрии (рис. 2.5).

К естественным граничным условиям при решении задач методом конечных элементов принято относить условия, наложенные на внешние силовые факторы, действующие на точки тела – сосредоточенные силы и моменты для задач в которых рассматриваются стержневые элементы; распределенные для двумерных и трехмерных задач. Такие условия, как правило, носят название силовых граничных условий [39]. Силовые граничные условия в поставленных задачах выражены в виде сил тяжести (собственного веса) грунта и конической буроинъекционной сваи, а так же площадной равномерно распределенной нагрузки (P , кПа), прикладываемой к оголовку сваи. Все нагрузки в расчетной системе действуют вдоль оси сваи вертикально вниз.

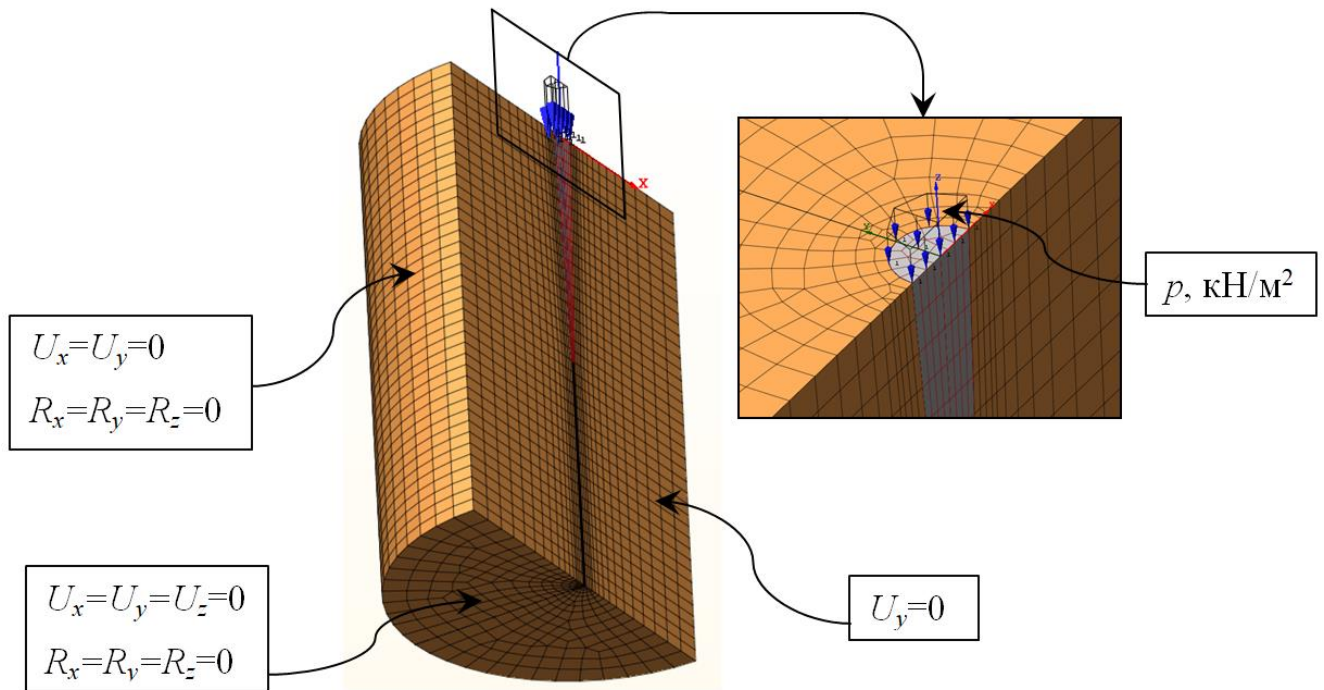


Рисунок 2.5 – Общий вид расчетной схемы системы «буринъекционная коническая свая – грунт»

Однако практика реальных расчетов показывает, что одновременное использование выше упомянутых нагрузок приводит к некорректным результатам. Расчетная модель под действием силы тяжести получает значительные вертикальные деформации, при этом вместо ожидаемой осадки сваи наблюдается эффект поднятия ее оголовка над дневной поверхностью грунта. Данный эффект возникает в основном за счет различной реакции на одинаковую нагрузку сильно отличающихся по физико-механическим свойствам материалов грунта и бетона.

Для исключения выше упомянутого явления, все расчеты выполняются в две стадии. В первой стадии расчетная модель рассматривается как цельный массив грунта. Буринъекционная коническая свая в первой стадии отсутствует. Из нагрузок на модель действует только сила тяжести. При проведении расчетов определяются напряжения в массиве грунта, а деформации и перемещения не вычисляются. Во второй стадии в массиве грунта выделяется область с геометрией сваи и ей присваиваются все свойства материала бетона. К оголовку сваи прикладывается равномерно распределенная нагрузка. Таким образом, на первой стадии расчета определяется напряженно-деформированное состояние грунта в есте-

ственном состоянии, а на второй от действия дополнительной нагрузки приложенной к оголовку буроинъекционной конической сваи.

2.4. Исследование взаимодействия грунта с боковой поверхностью буроинъекционной конической сваи на основе натуральных экспериментов

Результаты испытаний натуральных буроинъекционных свай. В работе рассматривались испытания двух натуральных буроинъекционных цилиндрических свай «Titan» выполненные ЗАО «ПКТИ» в 2005 году [44]. Испытания проводились статической вдавливающей нагрузкой с целью определения несущей способности свай по грунту. Испытываемые сваи (далее свая №44 и №47) выполнены по технологии фирмы «Icshebek» в скважинах диаметром 210мм и глубиной 12м с расположением забоя скважины на абсолютной отметке минус 3,30м.

Инженерно-геологические условия строительной площадки принимались согласно геологического разреза плана свайного поля, выполненного ОАО «ЛенГи-проТранс» в 2005 году. Инженерно-геологический разрез рассматриваемой площадки до отметки 6,2 м представлен насыпными грунтами (толщина слоя 2–2,5м), ниже которых подстилаются аллювиальные отложения. Насыпные грунты представлены суглинком лёгким песчанистым желто-коричневым тугопластичным с включениями до 15%. Аллювиальные отложения сложены суглинком тяжёлым, пылевато серым, мягкопластичным, с прослоями песка, мощностью до 3,2м. Ниже залегают суглинки лёгкие пылевато серые тугопластичные, так же с прослоями песка мощностью 3–3,3м. С глубины 9м залегает супесь пылеватая тугопластичная, серая мощность которой 1–1,2 метра. Начиная с отметки -1,5 м грунтовая толща сложена суглинком лёгким, пылеватым, серым, полутвёрдым с прослоями песка. Горизонт уровня грунтовых вод расположен на глубине 1,5м.

Испытание буроинъекционных свай вертикальной статической вдавливающей нагрузкой выполнялось в соответствии с ГОСТ 5686-94, СНиП 2.02.03-85 и ТСН 50-302-2004. Схема устройства для испытания свай представлена на рисунке (рис. 2.6). Вертикальная нагрузка при испытании свай создавалась при помощи гидравлического домкрата грузоподъемностью 100 тонн. Упором для домкрата

служила металлическая балка, скрепленная при помощи специальных тяжей на сварке с анкерными сваями. Давление на домкрате создавалось при помощи насосной станции НСР-400 и фиксировалось по манометру с ценой деления 5 атмосфер.

Измерение величины вертикального перемещения свай от нагрузки производилось двумя прогибомерами ПАО-6 с точностью отсчета 0,01 мм. Прогибомеры неподвижно прикреплялись к реперной системе, установленной на свае. На каждой ступени нагружения сваи отсчеты по прогибомерам снимались в следующей последовательности: нулевой отсчет – сразу после приложения нагрузки, затем последовательно в течение первого часа через каждые 15 минут и далее 30 минут до затухания перемещения сваи.

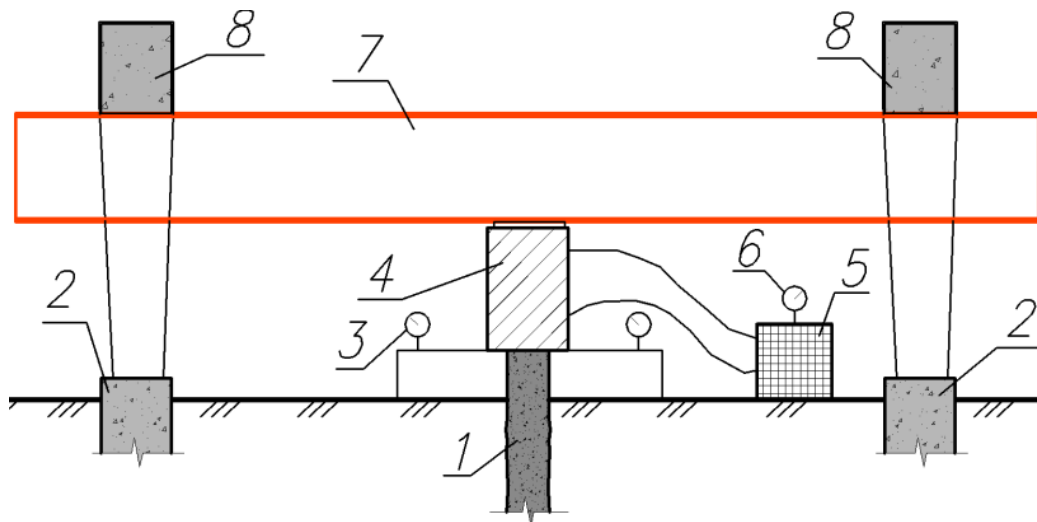


Рисунок 2.6 – Схема устройства для испытания свай: 1 – испытываемая свая; 2 – анкерные сваи; 3 – индикаторы часового типа; 4 – гидравлический домкрат; 5 – станция для создания давления в гидравлическом домкрате; 6 – манометр; 7 – упорная металлическая балка; 8 – элементы для упора металлической балки

За условную стабилизацию принималась скорость осадки сваи в грунте не более 0,1 мм за последний час измерений на ступени нагрузки. Разгрузка испытываемых свай производилась после достижения максимальной нагрузки, ступенями равными двойным ступеням нагружения. Результаты испытаний представлены в виде графиков (рис. 2.7).

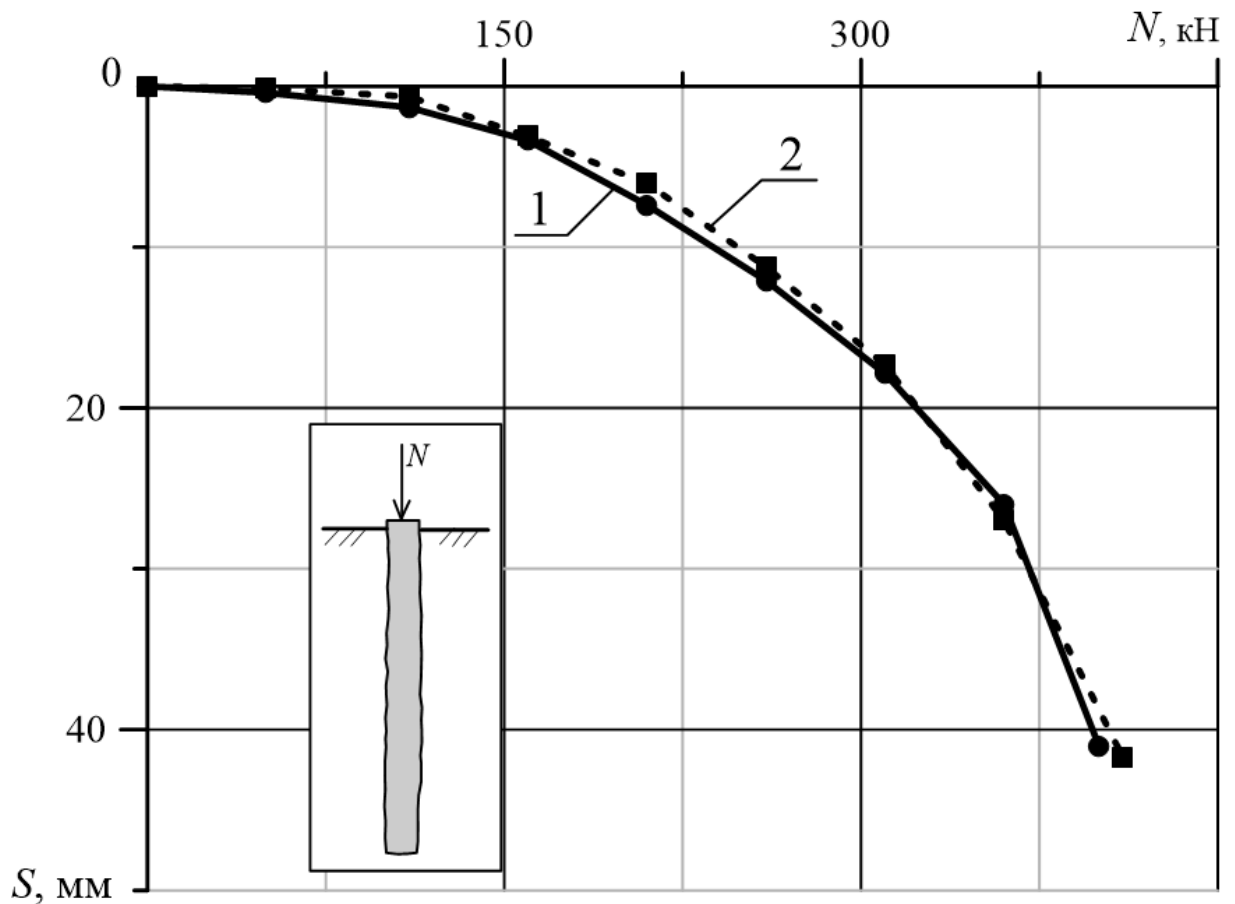


Рисунок 2.7 – Результаты испытаний натуральных буринъекционных свай:
1 – свая №44; 2 – свая №47

Из графика (рис. 2.7) видно, что при испытаниях, общая осадка сваи №44 составила 42,17 мм, а для сваи №47 – 43,07 мм. Далее в работе проверка расчетной системы «буринъекционная коническая свая - грунт» выполняется на основе сравнения результатов рассмотренных испытаний и результатов расчетов в ПК *Midas GTS NX* методом конечных элементов.

Обоснование применяемых параметров контактных элементов расчетной модели системы «буринъекционная коническая свая – грунт». Так как одной из особенностей буринъекционных конических свай является достаточно развитая боковая поверхность, то для учета этой особенности особое внимание уделялось моделированию области соприкосновения грунта и сваи. В практике инженерных расчетов методом конечных элементов, область соприкосновения двух тел (сред) с существенно различными физико-механическими характеристиками, как правило, называют областью контакта. Моделирование области контак-

та в ПК *Midas GTS NX* выполняется путем ввода в область соприкосновения дополнительного конечного элемента называемого «контактный элемент». Поведение такого элемента базируется на законе Кулона, когда сила трения пропорциональна коэффициенту трения и величине нормальной силы, действующей на контактный элемент. При этом, с точки зрения математического аппарата, функция разрушения (f) и функция потенциала (g) для контактного элемента описываются уравнениями:

$$f = \sqrt{t_t^2 + t_n \tan \varphi(k) - c(k)}; \quad (2.7)$$

$$g = \sqrt{t_t^2 + t_n \tan \psi}, \quad (2.8)$$

где c – коэффициент сцепления как функция скорости нагружения, k ;
 φ – угол внутреннего трения как функция скорости нагружения, k ;
 ψ – угол дилатансии.

Коэффициент жесткости нормальный (k_n) и касательный (k_t) к поверхности контактного элемента вычисляются по формуле:

$$k_n = k_t = \frac{1000 E_{\max}}{d},$$

где E_{\max} – самый большой модуль деформации, присутствующий в модели, МПа;
 d – размер самого маленького элемента модели, м;

Взаимосвязь между трением (t) и относительными перемещениями (Δu) описывается уравнением:

$$t = D \Delta u \quad (2.9)$$

Для расчетов систем, смоделированных объемными телами, каждая компонента описывается следующими выражениями:

$$t = \begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{Bmatrix}, D = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}, \Delta u = \begin{Bmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_y \\ \Delta u_z \end{Bmatrix}, \quad (2.10)$$

где t_x – силы трения, действующие по нормали к контактному элементу, N/m^2 ;

t_y, t_z – силы трения, действующие касательно к контактному элементу, N/m^2 ;

Δu_x – относительные перемещения по нормали к контактному элементу, м;

$\Delta u_y, \Delta u_z$ – относительные перемещения по касательной к контактному элементу, m^2 ,

k_x – постоянный показатель жесткости, по направлению совпадающий с нормалью к контактному элементу;

k_y, k_z – постоянные показатели жесткости, по направлению касательные к контактному элементу.

При упругом поведении контактного элемента, матрица жесткости принимает следующий вид:

$$D^e = t_v \times \begin{bmatrix} E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{Et_v}{12} \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

где E – модуль деформации, МПа;

ν – коэффициент Пуассона;

t_v – виртуальная толщина контактного элемента.

Каждый узел контактного элемента имеет три поступательных и одну вращательную степень свободы. Вращение допускается только вдоль длинной стороны контактного элемента.

Взаимосвязь между действующими на контактный элемент моментными нагрузками (m) и деформациями кручения ($\Delta\phi$) носит нелинейный характер и описывается выражением:

$$m_s = \frac{Eb^2}{12} \Delta\phi_s \quad \Delta\phi_s \leq \frac{2t_n}{Eb}$$

$$m_s = \frac{\Delta\phi_s |t_n| b}{2|\Delta\phi_s|} \left[1 - \sqrt{\frac{8|t_n|}{9|\Delta\phi_s|Eb}} \right] \quad \Delta\phi_s > \frac{2t_n}{Eb} \quad (2.12)$$

Взаимосвязь между относительными деформациями и силами трения при нелинейной работе контактного элемента описывается выражением:

$$m_s = D_m \Delta\phi_s, \quad (2.13)$$

где

$$D_m = \left[\sqrt[3]{\frac{|t_n|^3}{18E|\Delta\phi_s|^3}} \right] \quad (2.14)$$

Для удобства использования, в ПК *Midas GTS NX* большинство из вышеупомянутых параметров объединены в группы, которые задаются при помощи двух коэффициентов: виртуальная толщина контактного элемента (t_v) и коэффициент пропорциональности (R_t) для соответствующих характеристик грунта.

Для моделирования контактных элементов, учитывающих особенности взаимодействия буринъекционной сваи и грунта, необходимо отдельно рассмотреть влияние величины значения коэффициента пропорциональности (R_t) и виртуальной толщины (t_v) на осадку сваи. Для этого выполнено две серии расчетов отдельно для каждого параметра. При проведении расчетов менялся только исследуе-

мый параметр, а второй оставался постоянным и принимал значения, установленные в программе по умолчанию.

Для проведения исследований, в качестве тестовой задачи, была разработана численная модель буроинъекционной цилиндрической сваи длиной 7 м и диаметром 100 мм. Физико-механические характеристики грунта, в рассматриваемой задаче, приняты в соответствии со значениями ИГЭ-1.

В первой серии расчетов исследовалось влияние параметра виртуальной толщины (t_v) на осадку буроинъекционной цилиндрической сваи. Теоретический диапазон значений параметра (t_v) составляет: $0 > t_v > 1$. Разработчики программного комплекса рекомендуют для любых грунтовых условий принимать $t_v = 0,5$. В работе, данный параметр был рассмотрен в интервале значений от 0,3 до 0,7. По результатам расчетов построен график (рис. 2.9).

Из графика (рис. 2.8) видно, что при осадке сваи равной 40 мм относительная погрешность по нагрузке не превышает 3 %. Из чего можно сделать вывод, что параметра виртуальной толщины (t_v) не оказывает существенного влияния на результаты расчетов буроинъекционной цилиндрической сваи.

Однако, следует отметить, что в момент, когда значения виртуальной толщины (t_v) принимают величины равные 0,3 и 0,7, при проведении расчетов наблюдается плохая сходимость итерационного решателя и наблюдается значительное увеличение времени проведения расчета. Таким образом, в работе принято значение параметра виртуальной толщины (t_v) рекомендуемое разработчиками программного обеспечения и равное $t_v = 0,5$.

Во второй серии расчетов исследовалось влияние коэффициента пропорциональности (R_t) на осадку одиночной буроинъекционной сваи. Данный параметр был рассмотрен в интервале значений от 0,8 до 1,2. По результатам расчетов построен график (рис. 2.9).

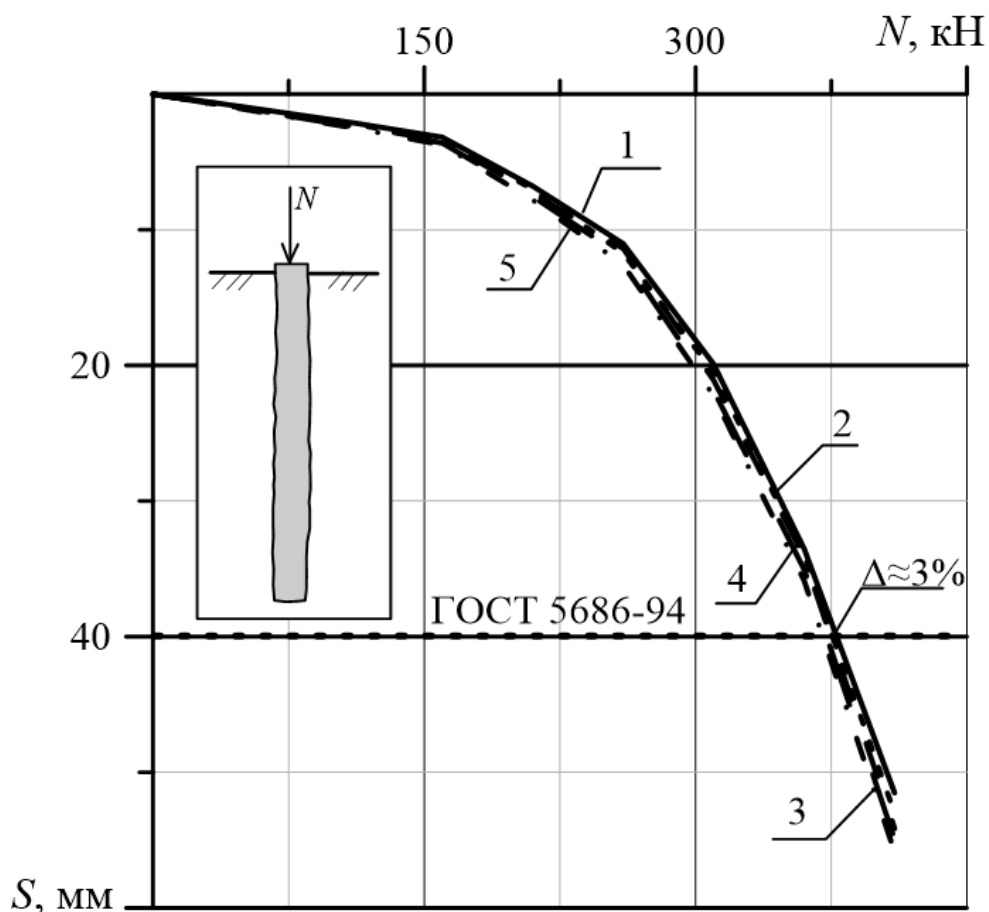


Рисунок 2.8 – Влияние параметра виртуальной толщины (t_v) контактного элемента на перемещения буроинъекционной цилиндрической сваи:

1 – виртуальная толщина равна 0,3; 2 – тоже 0,4; 3 – тоже 0,5;
4 – тоже 0,5; 5 – тоже 0,6

Из графика (рис. 2.9) видно, что при осадке сваи $S = 40$ мм, изменение коэффициента пропорциональности (R_t) в 1,5 раза (от 0,8 до 1,2) приводит к увеличению расчетной нагрузки на 27 %. При $P = 334$ кН, изменение коэффициента пропорциональности (R_t) от 0,8 до 1,2 приводит к снижению осадки более чем в 2 раза (227 %).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что величина коэффициента пропорциональности (R_t) существенно влияет на несущую способность и осадку буроинъекционной цилиндрической сваи. Выбор коэффициента пропорциональности (R_t) применительно к буроинъекционным коническим сваям возможен только на основе сопоставления результатов расчета компьютерного моделирования с результатами испытаний натуральных буроинъекционных свай.

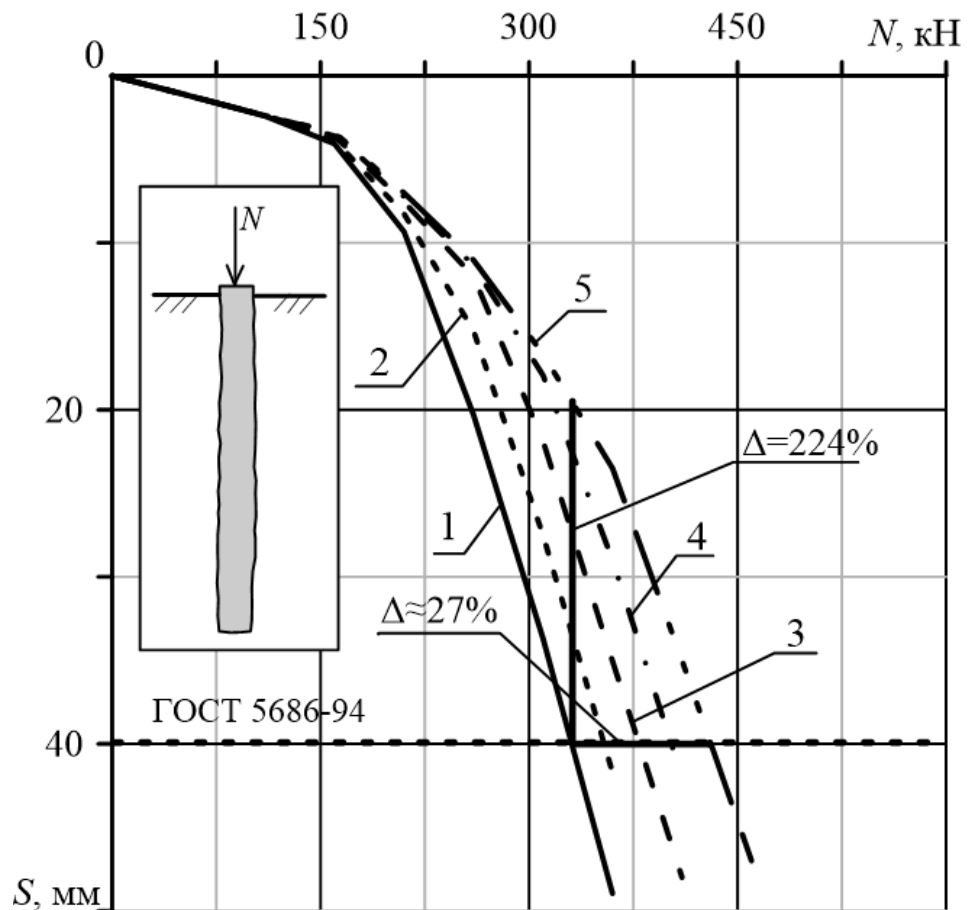


Рисунок 2.9 – Влияние коэффициента пропорциональности на осадку буринъекционной сваи:

- 1 – при коэффициенте пропорциональности (R_t) равном 0,8;
 2 – то же 0,9; 3 – то же 1,0; 4 – то же 1,1; 5 – то же 1,2

Далее в работе выполнено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами испытаний натуральных буринъекционных свай.

Сравнение данных численных расчетов с результатами испытаний натуральных буринъекционных свай. Для выполнения сравнения результатов расчетов выполненных в ПК *Midas GTS NX* с результатами натуральных испытаний, за основу были приняты данные натуральных испытаний буринъекционных свай рассмотренные ранее. На их основе была создана расчетная система «буринъекционная коническая свая-грунт», в которой геометрические характеристики свай, применяемые к оголовку нагрузки, а также грунтовые условия приняты в полном соответствии с данными натуральных испытаний. При назначении характеристик контактных элементов, для коэффициента пропорциональности (R_t) был принят

тот же диапазон значений, что и при испытаниях. Значение виртуальной толщины (t_v) принято равным 0,5.

Для надлежащей оценки влияния контактных элементов на результаты расчетов, отдельно была создана численная модель, в которой отсутствуют контактные элементы.

По результатам расчетов осадок буроинъекционных цилиндрических свай построен график, который объединяет в себе данные натуральных испытаний двух свай (свая №44 и №47 [44]), численных расчетов с использованием контактных элементов и без них (рис. 2.10).

Из графика (рис. 2.10) видно, что кривые 1 ($R_t = 1,1$) и 2 ($R_t = 1,2$) наиболее точно повторяют кривые осадки натуральных свай № 44 и 47 (рис. 2.10 поз. 3, 4). Однако, следует отметить, что при постоянной нагрузке (P , кН) осадка сваи, согласно кривой 2, будет меньше данных натуральных испытаний (рис. 2.10 поз. 3, 4). Кривая осадки буроинъекционной сваи полученная по результатам численных расчетов без использования контактных элементов, имеет значительное отклонение от кривых натуральных испытаний. При этом в момент, когда осадка натуральных буроинъекционных свай равна порядка 25 мм (момент окончания натуральных испытаний) расчетная нагрузка для кривой 5 почти в 3 раза больше чем для кривых 3, 4 (рис 2.10).

Далее выполнено сравнение результатов испытаний забивных полых конических свай с данными численных расчетов 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.

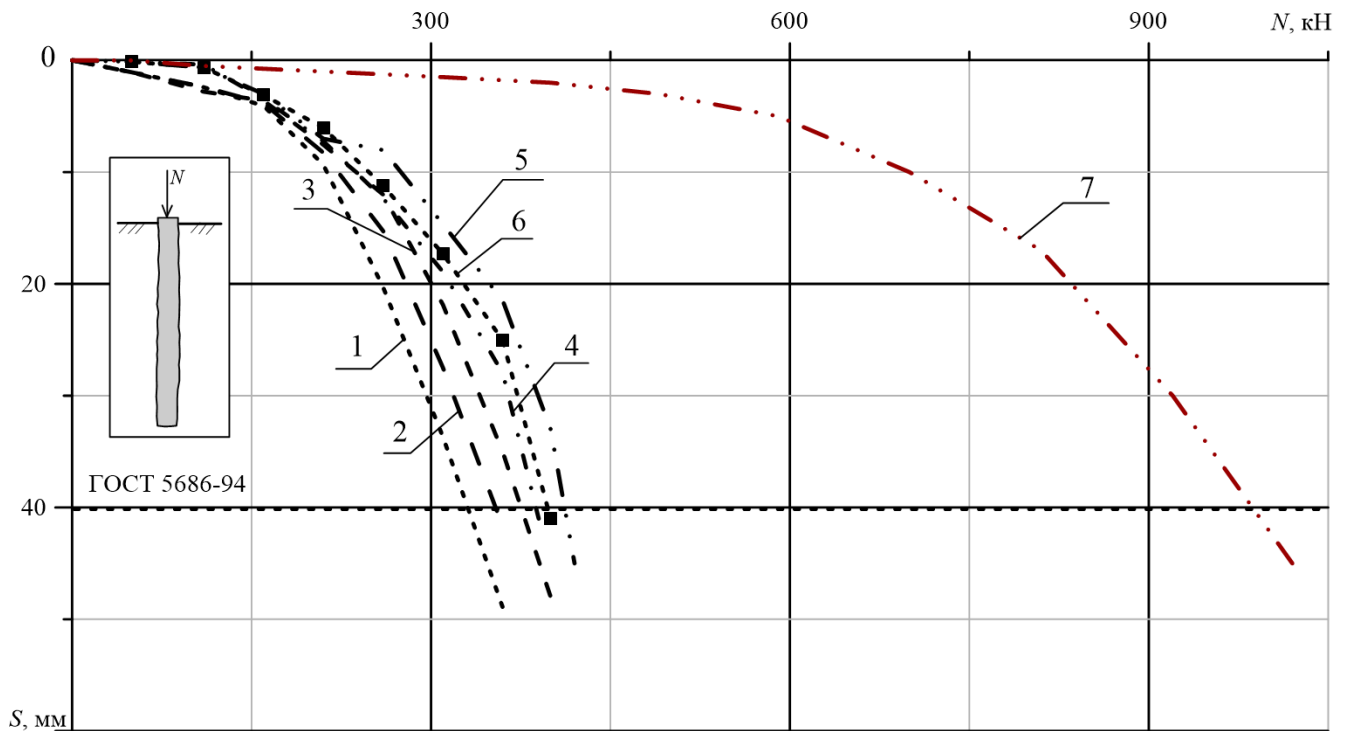


Рисунок 2.10 – Сравнение данных компьютерного моделирования с результатами испытаний натуральных буройнъекционных свай: 1 – график осадки буройнъекционной цилиндрической свай по результатам численного расчета при коэффициенте взаимодействия (R_t) модели свай с грунтом равном 0,8; 2 – то же 0,9; 3 – то же 1,0; 4 – то же 1,1; 5 – то же 1,1; 6 – график осадки буройнъекционной цилиндрической натурной свай по результатам полевых испытаний; 7 – график осадки буройнъекционной цилиндрической свай по результатам численного расчета без учета коэффициента взаимодействия (R_t) модели свай с грунтом

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. 2.11, поз. 5 и 6). Расчеты выполнялись для свай длиной 3 м в глинистом грунте при $R_t = 1,1$. Полученные данные сопоставлялись с результатами испытаний натуральных забивных полых конических свай длиной 3 м, имеющих конусность 1,5 %, что соответствует углу наклона боковой поверхности свай к вертикали примерно 2 град (автор испытаний натуральных конических свай А. Б. Пономарев, 1999). Сопоставление показало, что расчетные осадки буройнъекционных конических свай длиной 3 м и углом наклона боковой грани к вертикали 2 град меньше натуральных на 15 – 20% (рис. 2.11, поз. 4). Таким образом, на основе выполненных исследований были получены графики осадок $S = f(N)$ для буройнъекционных конических свай длиной 3 м в глинистых грунтах,

которые использовались в дальнейшем для разработки метода расчета их несущей способности.

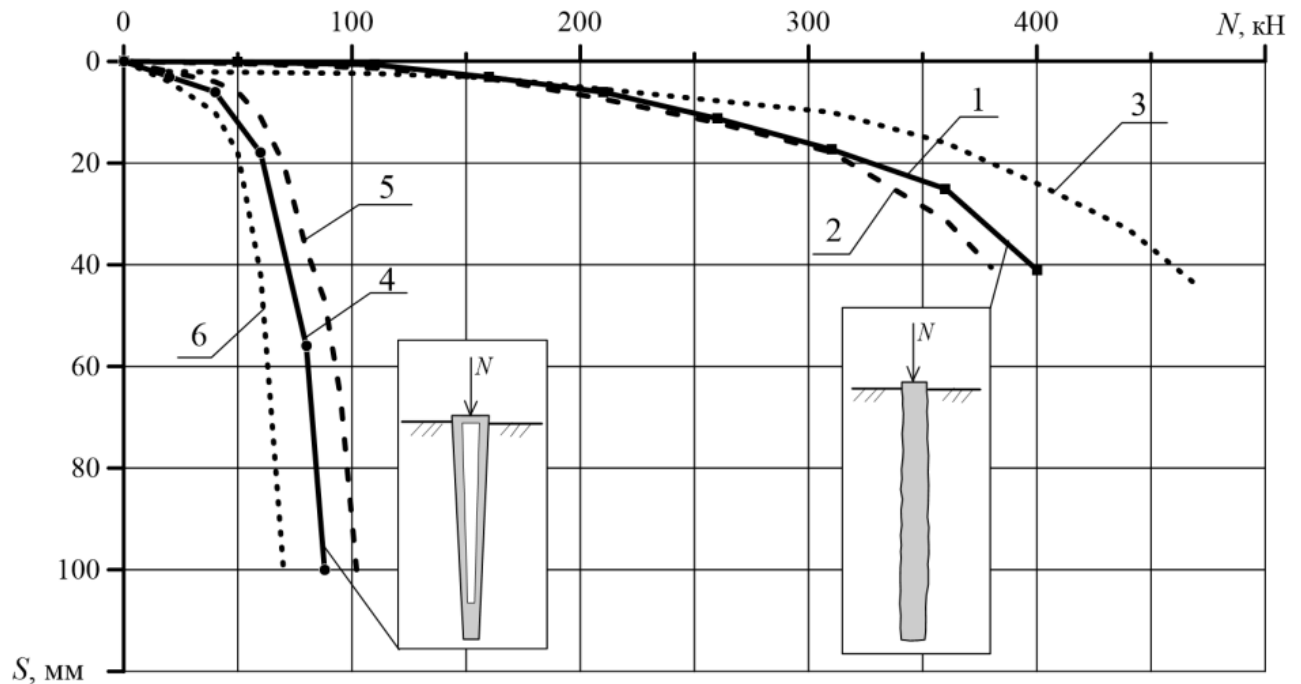


Рисунок 2.11 – Графические зависимости осадок конических и цилиндрических свай от внешней нагрузки $S=f(N)$: 1 – график осадки буроинъекционной цилиндрической натурной сваи длиной 8 м по результатам полевых испытаний; 2 – то же цилиндрической по результатам численного расчета; 3 – то же конической по 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

2.5. Обоснование граничных условий системы «буроинъекционная коническая свая – грунт»

При обоснование принятых граничных условий расчетной схемы системы «буроинъекционная коническая свая – грунт» рассмотрены следующие параметры:

1. Размер расчетной области в вертикальном направлении (вдоль продольной оси сваи);
2. Размеры расчетной области в горизонтальном направлении (по нормали к оси сваи);
3. Тип применяемого критерия сходимости итерационного решателя;
4. Вид конечных элементов;

5. Количество узлов сетки конечных элементов.

Далее выполнена оценка влияния и подбор для каждого из выше упомянутых параметров.

2.5.1. Обоснование размеров расчетной области

Общие сведения. Известно что существующие рекомендации по назначению размеров расчетной области, при численном моделировании, содержат лишь обобщающие указания для широкого спектра геотехнических задач [119]. Для подбора величин расчетных областей при моделировании системы «буринъекционная коническая свая – грунт» в качестве тестовых задач созданы 6 моделей. В исследованиях рассматривались буринъекционные цилиндрические сваи диаметрами ($D_{св}$) равными 100 и 400 мм, при этом длины свай ($L_{св}$) принимались равными 3, 7 и 11 м соответственно.

Размеры расчетных областей системы «буринъекционная коническая свая-грунт» заданы из условия исключения их влияния на результаты расчета. Таким образом величина расчетной области в вертикальном направлении принималась равной 3 длинам свай ($H = 3L_{св}$). В горизонтальном направлении величина расчетной области составила сто диаметров сваи ($R = 100D_{св}$).

Грунтовые условия в расчетных моделях приняты на основе данных Таблица. В исследованиях рассмотрены 2 типа грунтовых условий: ИГЭ-1 (как самый слабый по прочностным характеристикам грунт) и ИГЭ-9 (как самый прочный).

Для моделирования нагружения сваи использовалась равномерно распределенная нагрузка которая прикладывалась ступенями. Шаг ступеней по нагрузке был принят равным 10 кН.

Расчет выполнялся итерационно до тех пор пока осадка сваи не превышала 40 мм. По результатам расчетов построены графики по данным которых вычислена нагрузка соответствующая осадке сваи равной 40 мм. Порядок определения нагрузки наглядно показан на графике (рис. 2.12).

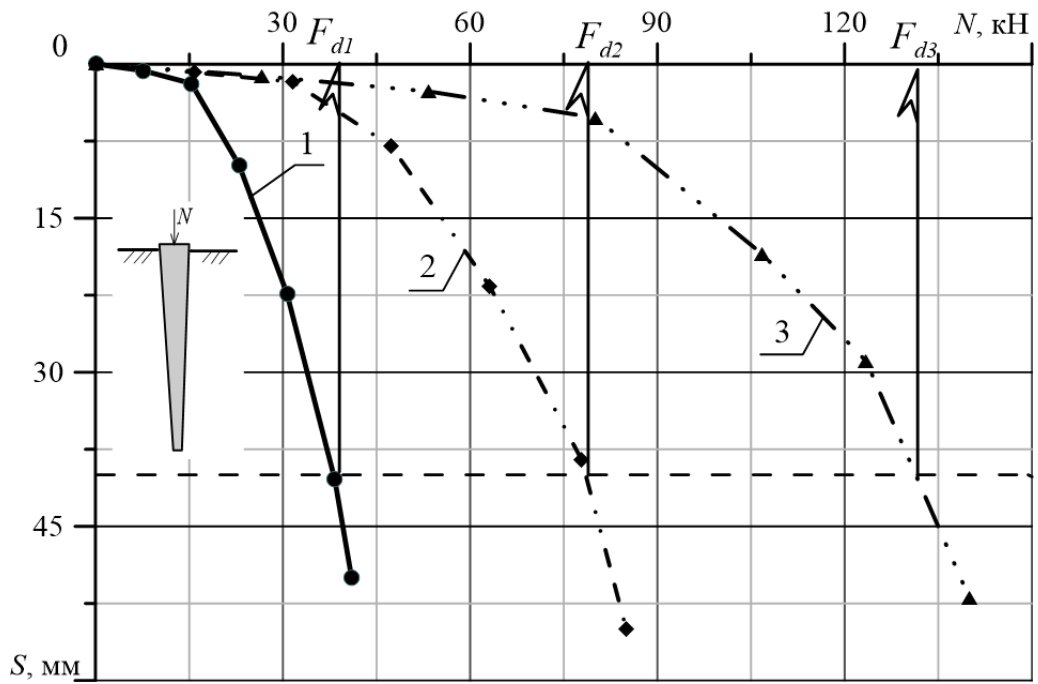


Рисунок 2.12 – Определение несущей способности буроналивных цилиндрических свай диаметром 100мм в мягкопластичных глинах:
1 – длина сваи 3 м; 2 – тоже 7 м; 3 – 11 м

Все полученные значения расчетных нагрузок сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Нагрузка на оголовок буроналивной цилиндрической сваи в зависимости от ее длины и грунтовых условий

Диаметр сваи ($D_{св}$), м	Длина сваи ($L_{св}$), м	Нагрузка на оголовок сваи N (при $S = 40$ мм), кН	
		ИГЭ-1	ИГЭ-9
100	3	48	110
	7	100	234
	11	172	373
400	3	68	160
	7	146	298
	11	247	481

При определении размеров расчетных областей, в качестве расчетных нагрузок используются данные таблицы 2.4.

После выбора нагрузок, для выполнения исследований, были созданы расчетные схемы системы «буринъекционная цилиндрическая свая – грунт» отдельно для исследований расчетных областей в вертикальном и горизонтальном направлениях (рис. 2.13).

Для обоснования размера расчетной области в горизонтальном направлении рассмотрены буринъекционные цилиндрические сваи диаметром ($D_{св}$) 100 и 400 мм соответственно. Общая величина расчетной модели (H) принята, как и в моделях для определения расчетных нагрузок, равной трем длинам свай ($H = 3L_{св}$). Шаг приращения величины радиуса модели (R) в горизонтальном направлении принят как $5D_{св}$, при этом радиус расчетной области грунта (R) рассматривался в интервале от $5D_{св}$ до $30D_{св}$.

Для исследования размера расчетной области в вертикальном направлении, радиус модели (R) был принят равным ста диаметрам сваи ($D_{св}$), для беспрепятственного развития областей перемещений грунта в горизонтальном направлении, а значения высоты модели H менялись соответственно с шагом $5D_{св}$ от $H = L_{св}$ до $H = L_{св} + 30D_{св}$. Диаметр сваи принят равным 100мм, так как предполагается, что в последующих исследованиях конических буринъекционных свай диаметр острия не будет превышать данного значения, поэтому диаметр острия равный 400 мм в исследованиях расчетной области в вертикальном направлении не рассматривался.

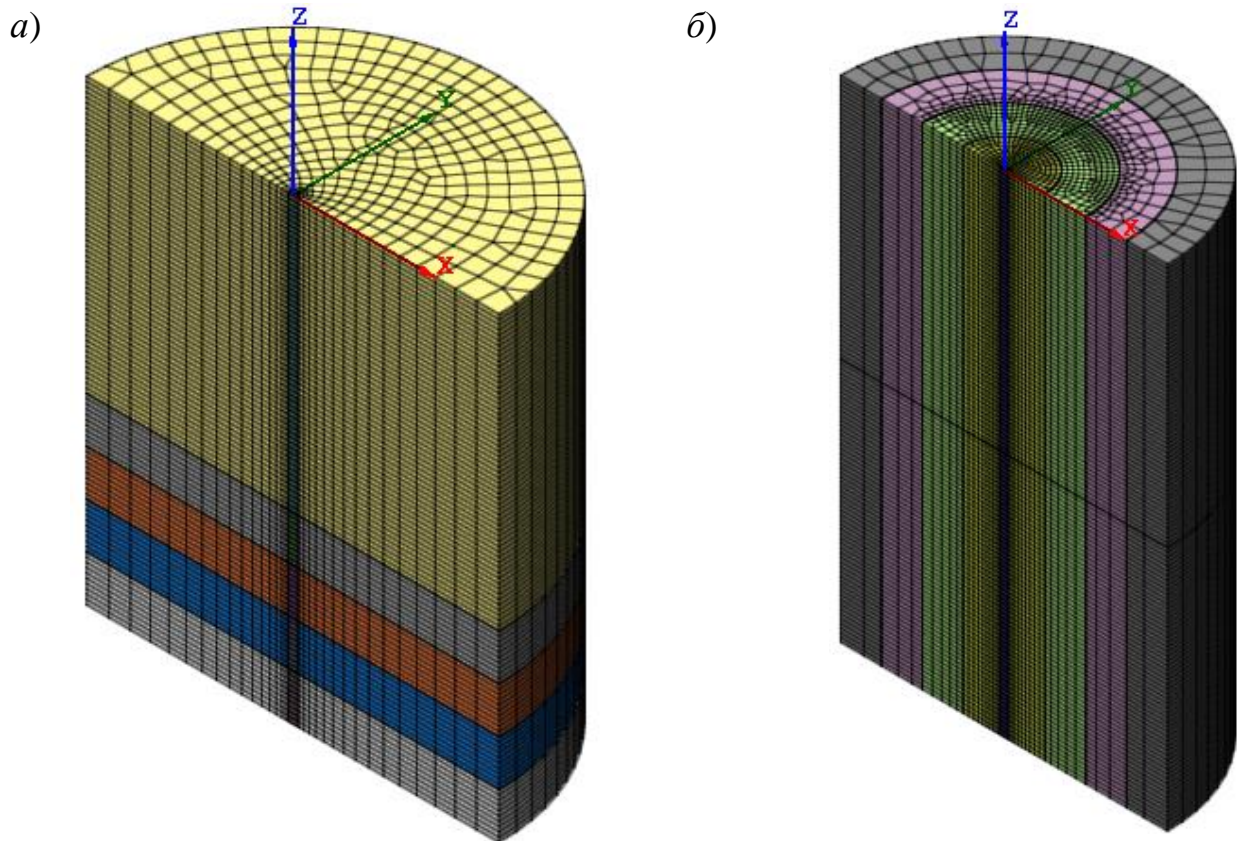


Рисунок 2.13 – Общий вид расчетной модели для исследования влияния краевых условий:

a – расчетная область в вертикальном направлении;
б – тоже в горизонтальном направлении

Далее приведены результаты расчетов для обоснования размеров расчетных областей в вертикальном и отдельно горизонтальном направлениях.

Размер расчетной области в вертикальном направлении. По результатам решения задач, по определению влияния величины расчетной области в вертикальном направлении на осадку буроинъекционной цилиндрической сваи, построены графики. В работе представлен график (рис. 2.14) для свай диаметром 100 мм в грунтовых условиях соответствующих данным ИГЭ-1, как наиболее характерный.

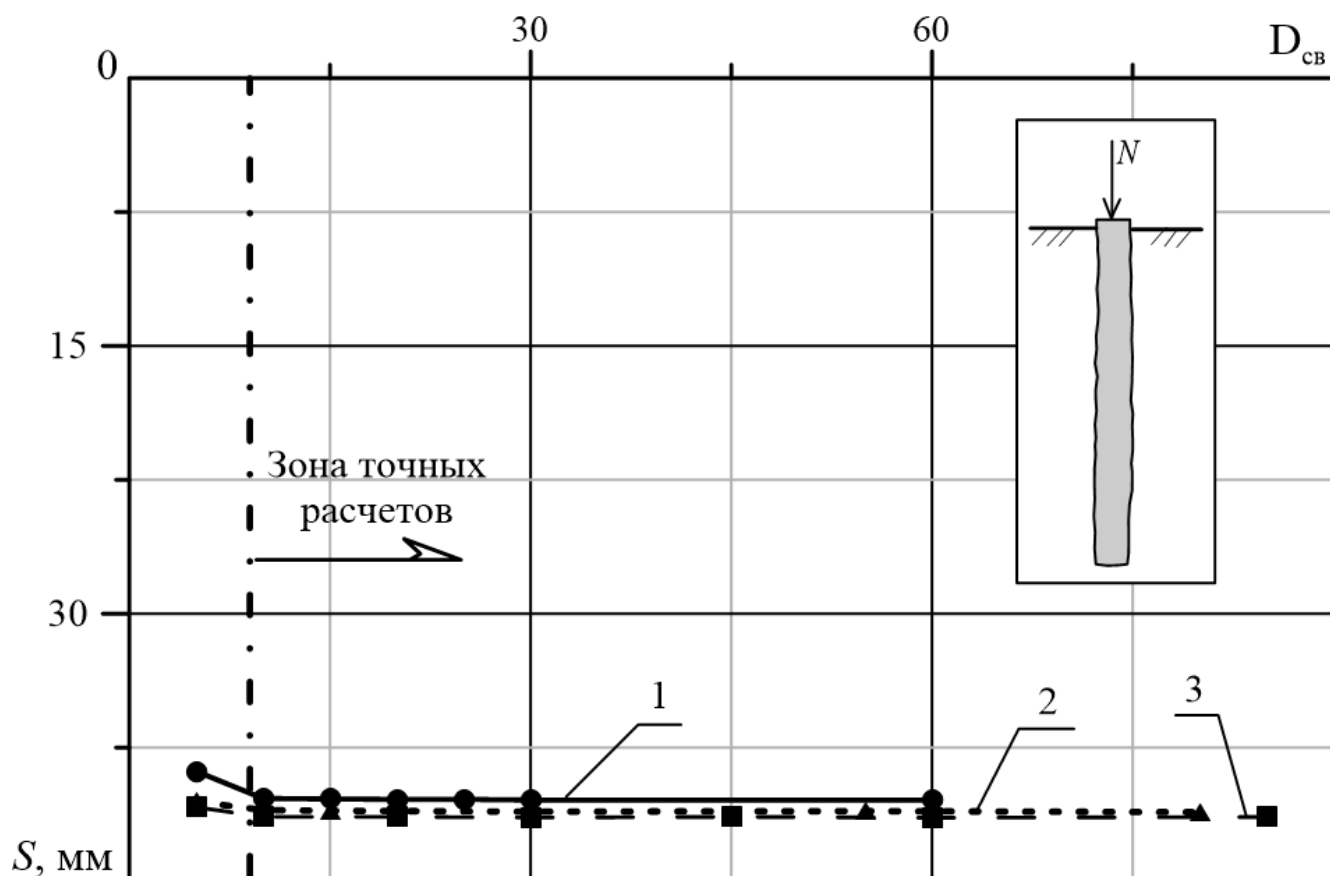


Рисунок 2.14 – Размер расчетной области в вертикальном направлении:
1 – длина сваи 3 м; 2 – то же 7 м; 3 – то же 11 м

Из графика (рис. 2.14) видно, что в интервале значений от $5D_{св}$ до $10D_{св}$ все кривые возрастают. После прохождения точек 1, 2 и 3 (соответствуют $10D_{св}$) кривые выполаживаются. Это свидетельствует о том, что дальнейшее увеличение расчетной области в вертикальном направлении не оказывает существенного (более 1 %) влияния на результаты расчета. Для грунтовых условий соответствующих данным ИГЭ-9 были получены аналогичные результаты.

Можно сделать вывод о том, что минимальный размер расчетной области ниже острия буроинъекционной цилиндрической и конической сваи должен составлять не менее 10 диаметров сваи.

Далее при проведении исследований при моделировании размер расчетной области в вертикальном направлении принят равным $10D_{св}$.

Размер расчетной области в горизонтальном направлении. По результатам расчетов для обоснования размеров расчетной области в горизонтальном направлении построены графики. Для наглядности в работе представлен

график (рис. 2.15) для свай диаметром 100мм расположенных в грунтовых условиях ИГЭ-1.

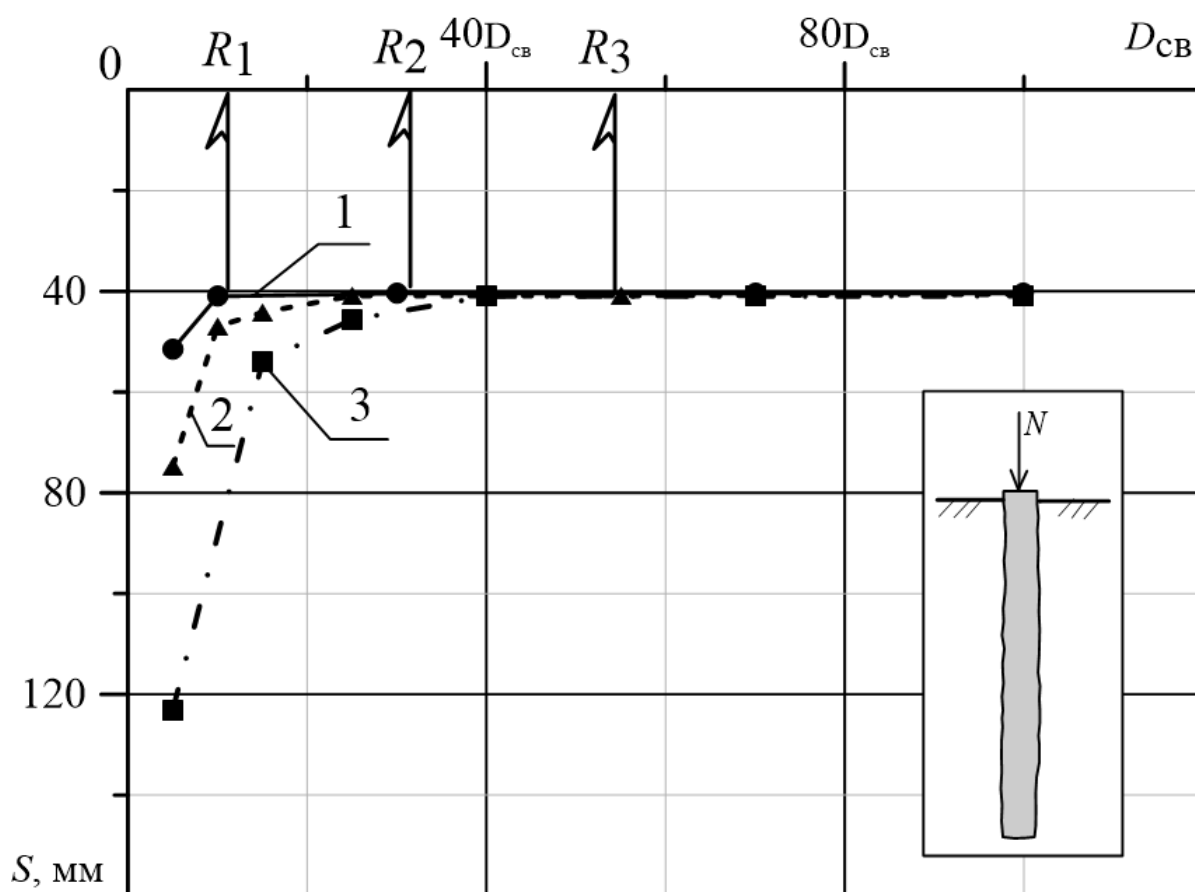


Рисунок 2.15 – Размер расчетной области в горизонтальном направлении:
1 – длина сваи 3 м; 2 – тоже 7 м; 3 – тоже 11 м

Из графика (рис. 2.15) видно, что каждая кривая в интервале значений от $5D_{св}$ до точек 1, 2 и 3 (точки перегиба) соответственно убывают. После прохождения данных точек кривые выполаживаются и строятся параллельно оси абсцисс, что свидетельствует об отсутствии влияния величины размера расчетной области в горизонтальном направлении на результаты расчетов. Также следует отметить, что в отличие от результатов исследований вертикальной расчетной области, для каждой кривой характерна своя точка перегиба. Результаты расчетов для моделей с грунтовыми условиями соответствующими ИГЭ-9 схожи с данными ИГЭ-1, однако, точки перегиба у них не совпадают.

Из этого можно сделать вывод о том, что величина расчетной области в горизонтальном направлении при расчете буроинъекционных свай напрямую зависит

от ее длины и типа грунтовых условий. При неверном назначении величины расчетной области, погрешность определения осадки одиночной буроинъекционной сваи может составлять до 318 %. Значение абсциссы (R_1 , R_2 и R_3) в точках перегиба (1, 2 и 3) на графике, по сути, является минимальным размером расчетной области характерным для буроинъекционных свай различной длины, диаметра и грунтовых условий. Таким образом, для назначения величины расчетной области в горизонтальном направлении на основе полученных данных выделены значения минимального размера расчетной области для свай различной длины и диаметра в глинистых грунтах. На основе этих данных был построен график. Для наглядности в работе представлен график для свай диаметром 100 мм (рис. 2.16). График для свай диаметром 400 мм аналогичен.

На графика (рис. 2.16) видно, что величина расчетной области в горизонтальном направлении увеличивается с увеличением длины свай. При этом для грунтовых условий соответствующих ИГЭ-1 величина расчетной области в зависимости от длины меняется в интервале от 10 до $40D_{св}$, а для ИГЭ-9 в интервале от 15 до $55D_{св}$. Обе зависимости носят линейный характер. Можно предположить, что графики зависимости величины расчетных областей в горизонтальном направлении для промежуточных грунтовых условий (ИГЭ-2...8) будут находиться в области между графиками 1 и 2. Так как в рамках проводимых исследований не ставилась задача по определению величин расчетных областей в горизонтальном направлении для всех типов грунтовых условий, то в качестве основной принимаем зависимость соответствующей грунтовым условиям ИГЭ-9. Для удобства ее можно описать выражением вида:

$$R = 5L_{св}, \quad (2.15)$$

где R – минимальный размер расчетной модели в горизонтальном направлении, в долях от $L_{св}$.

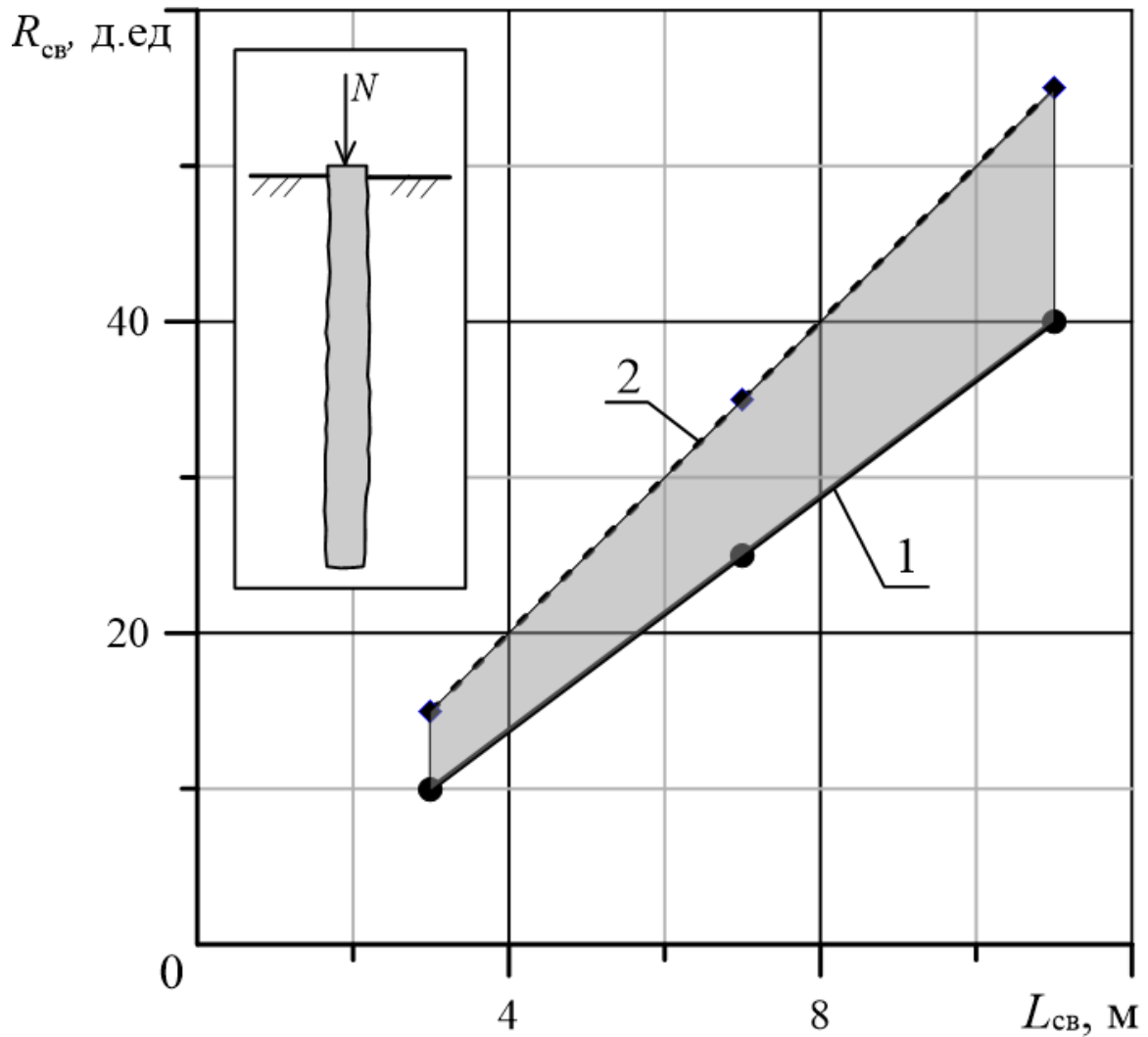


Рисунок 2.16 – График зависимости величины расчетной области в горизонтальном направлении от длины буроинъекционной сваи:
1– для условий ИГЭ-1; 2 – тоже ИГЭ-2

Далее, в исследованиях, размеры расчетной области в горизонтальном направлении для расчетной системы «буроинъекционная коническая свая – грунт» назначаются с использованием выражения (2.15).

2.5.2. Обоснование применяемого критерия сходимости итерационного решателя

Программа *Midas GTS NX* позволяет использовать для управления итерационным процессом один из трех критериев сходимости расчета, основанный на контроле усилий, перемещений или энергии деформации. В общем случае каждый из критериев описывается выражением:

$$\text{Сила} = \frac{\sqrt{\delta g_i^T \delta g_i}}{\sqrt{\Delta g_i^T \Delta g_i}} \quad (2.15)$$

$$\text{Перемещение} = \frac{\sqrt{\delta u_i^T \delta u_i}}{\sqrt{\Delta u_i^T \Delta u_i}} \quad (2.16)$$

$$\text{Энергия} = \left| \frac{(\delta u_i \ \delta g_i) (\delta u_i \ \delta g_i)^T}{(\Delta u_i \ \Delta g_i) (\Delta u_i \ \Delta g_i)^T} \right|, \quad (2.17)$$

где u – узловые перемещения;

Δu_i – полное приращение перемещений узлов конечных элементов от текущего шага на i -ой итерации;

δu_i – инкремент перемещений на i -ой итерации;

Δu_i^T – ограничение перемещений i -ой итерации

g_i – результирующая сила на i -ой итерации;

δg_i – инкремент сил на i -ой итерации;

Δg_i^T – ограничение по силе на i -ой итерации.

Для оценки влияния критериев сходимости на перемещения буроинъекционной сваи в параметрах расчета устанавливался один из критериев сходимости итерационного решателя. Численное значение критерия назначалось как $\lg N$, где N менялось соответственно $-1, -2, \dots, -7$. Исследования проводились для сваи диаметром 100 мм и длиной 7 м в глинистых грунтах с физико-механическими характеристиками соответствующими ИГЭ-1. Над данной численной моделью, были проведены серии расчетов, в которых по отдельности исследовалось влияния каждого из критериев сходимости итерационного решателя.

По данным выполненных расчетов построен график (рис. 2.17). Из него видно, что в диапазоне значений относительной погрешности решения системы линейных уравнений от 0,1 до 0,0001 величина перемещений буроинъекционной сваи при использовании различных критериев сходимости расчета отличаются друг от друга, в среднем, от 2 до 12 %. Однако, следует отметить четко выраженную точку перегиба графиков (рис. 2.17, поз. 4) после прохождения, которой

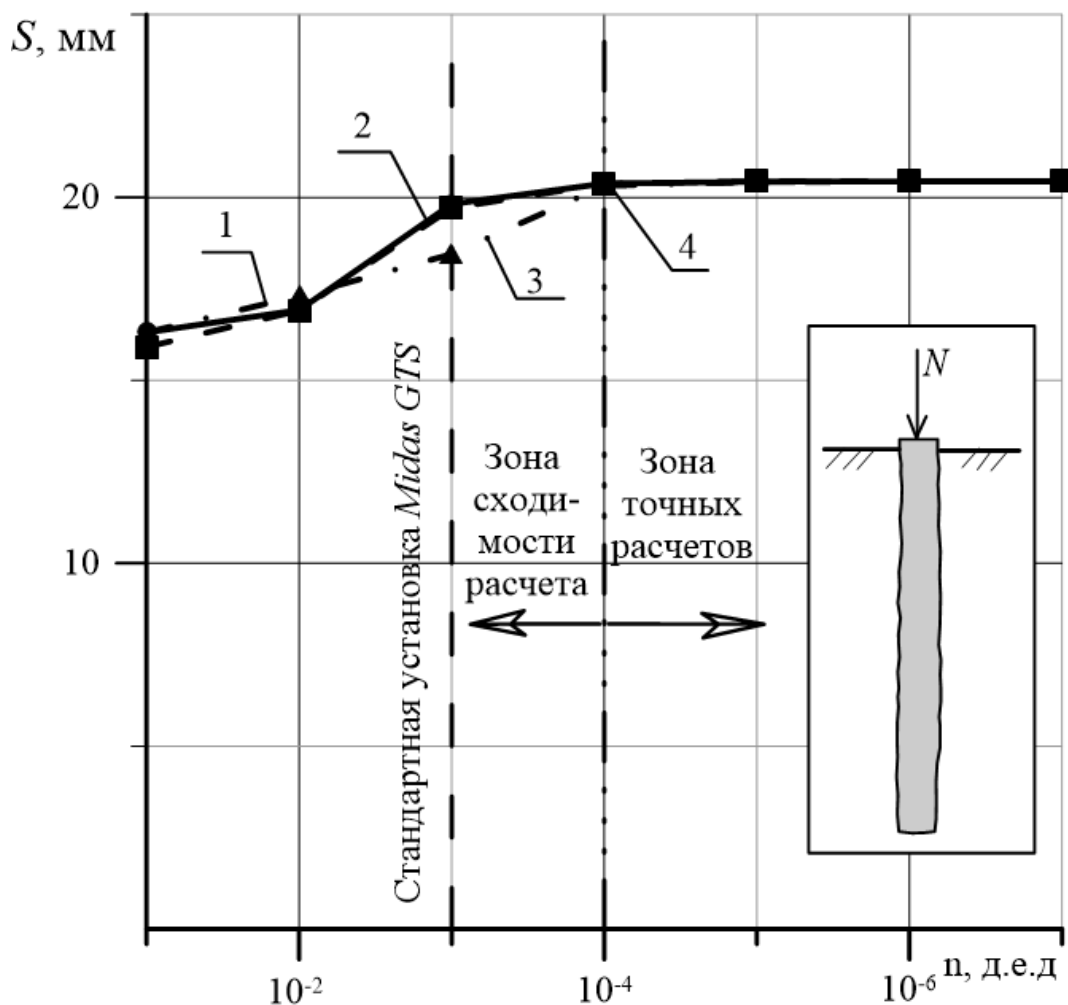


Рисунок 2.17 – Влияние критерия сходимости итерационного решателя на результаты расчета осадки буринъекционной цилиндрической сваи: 1– критерий сходимости «перемещения»; 2 – то же «сила»; 3 – то же «энергия»

относительное приращение перемещений не превышает 0,01 %. Использование предустановленной в программе величины критерия сходимости (0,001) дает разброс значений перемещений сваи в диапазоне от 18,4 до 19,8 мм, в зависимости от выбранного типа критерия разброс в оценке перемещений может достичь 9 %.

Таким образом, вид и величина критерия сходимости не вносят существенной погрешности в результаты расчета при относительной погрешности решения системы линейных уравнений 10^{-4} и менее. Далее при расчете одиночных буринъекционных конических свай в качестве критерия сходимости итерационного решателя выбран критерий «энергия», при этом его значение принято 10^{-4} .

2.5.3. Обоснование применяемых видов конечных элементов

Как известно на сегодняшний день, для дискретизации расчетных областей при решении геотехнических задач, существует целое семейство различных типов конечных элементов. Однако, какие либо указания или рекомендации по применению того или иного типа конечных элементов применительно к расчетам осадки одиночных свай отсутствуют.

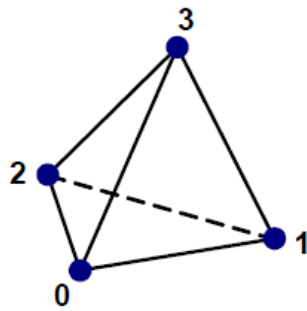
Таким образом, отдельный интерес представляет вопрос, связанный с влиянием применяемого типа конечных элементов на результаты расчета осадки буроинъекционной свай методом конечных элементов.

Исследования, в ПК *Midas GTS NX* выполнялись на примере расчетной модели буроинъекционной цилиндрической сваи длиной 7 м и диаметром 100 мм. Физико-механические характеристики грунта приняты в соответствии со значениями ИГЭ-1. Нагрузка на оголовок сваи принята в соответствии с данными таблицы 2.3, как для сваи соответствующей длины и диаметра. Для проведения исследований отдельно созданы 4 расчетные схемы системы «буроинъекционная коническая свая – грунт», в которых для дискретизации расчетных областей применялись различные типы конечных элементов (тетраэдры и гексаэдры низшего и высшего порядка). Для наглядности, применяемые в исследованиях, типы конечных элементов представлены на рисунках (рис. 2.18).

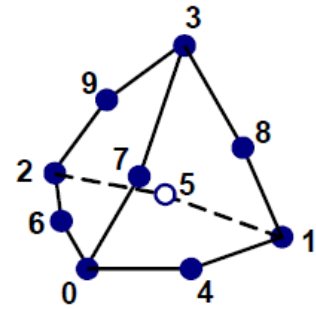
Далее, над выше описанными моделями, проведены серии расчетов, по результатам которых построены графики (рис. 2.19).

Из графика (рис. 2.19) видно, что в интервале значений количества узлов сетки конечных элементов (N) от 0 до 13×10^4 изменение значений осадки сваи составляют от 10,2 до 21,8 мм, при этом относительная погрешность вычислений (δ_x) составляет порядка 53%. Также для каждой кривой существует область, в которой она параллельна оси абсцисс, что может свидетельствовать об отсутствии влияния применяемого типа конечных элементов на результаты расчетов. Для каждой кривой характерно минимальное количество узлов сетки конечных элементов при последующем увеличении количества узлов влияние применяемого вида конечных элементов минимально.

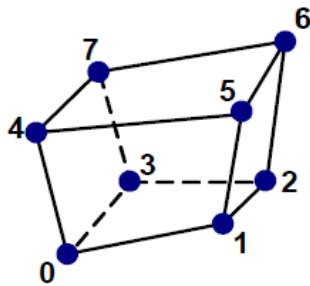
а)



б)



в)



г)

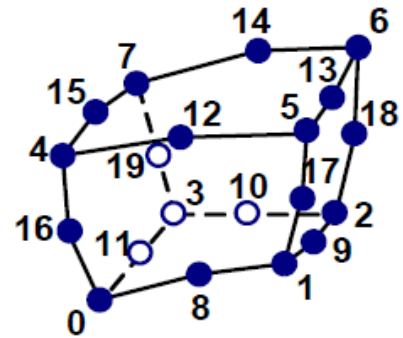


Рисунок 2.18 – Применяемые типы конечных элементов:
a – тетраэдр низшего порядка; *б* – тетраэдр высшего порядка, *в* – гексаэдр низшего порядка, *г* – гексаэдр высшего порядка

Таким образом, можно сделать вывод о том, что от применяемого вида конечных элементов в значительной степени зависят результаты расчета осадки сваи. Наименьшее количество узлов сетки конечных элементов *a*, следовательно, и времени проведения расчета, требуется для расчетной системы, в которой дискретизация расчетной области выполнена гексаэдрами высшего порядка. Открытым остается вопрос о минимальном количестве узлов сетки конечных элементов требуемом для различных величин расчетных областей.

Основываясь на сказанном выше, для дискретизации расчетной области в последующих расчетах применяются гексаэдры высшего порядка. Вопрос, связанный с минимальным количеством узлов сетки конечных элементов рассмотрен ниже.

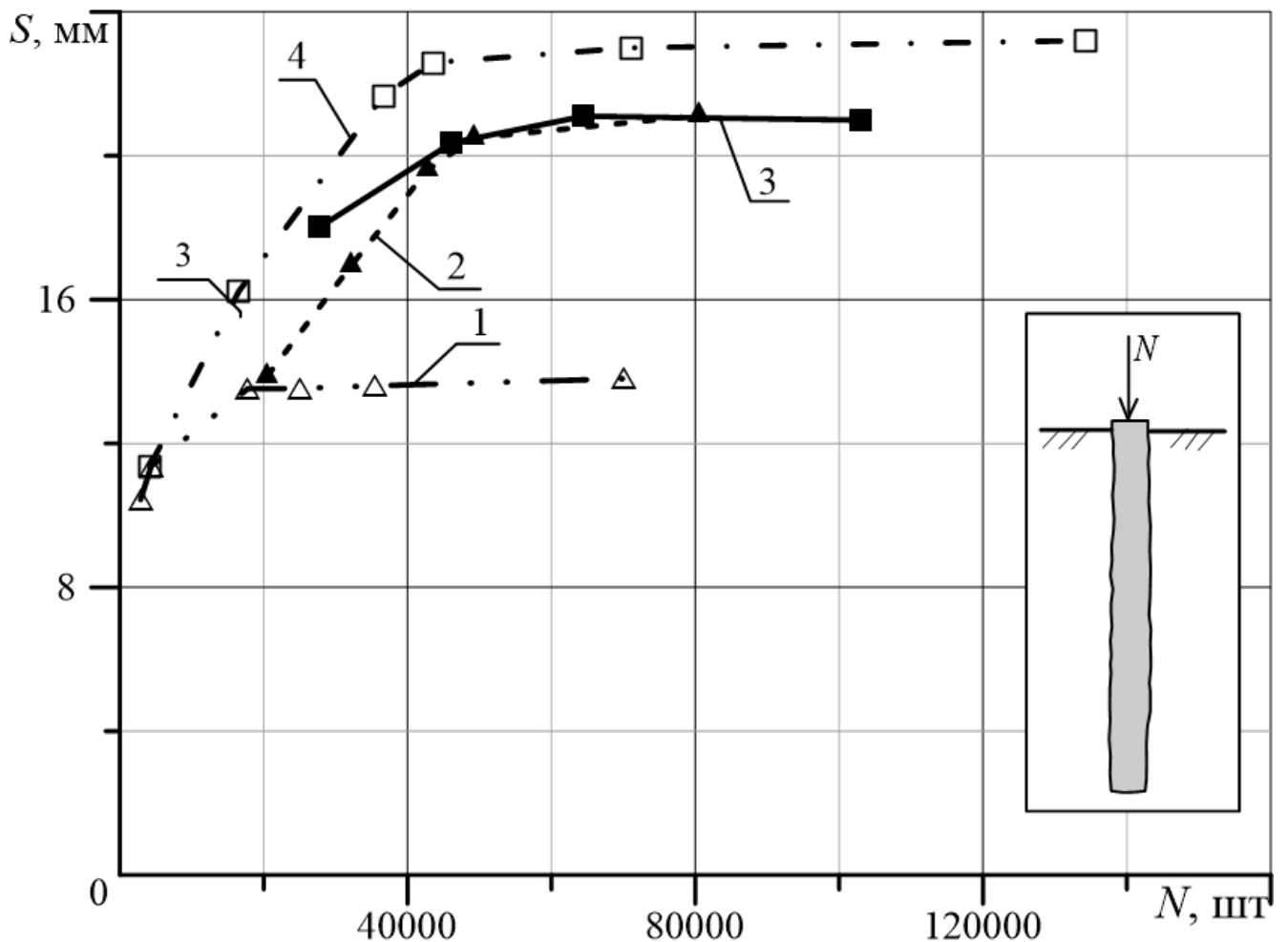


Рисунок 2.19 – Влияние используемого типа конечных элементов расчетной модели на расчет осадки буроинъекционной цилиндрической сваи:
 1 – тетраэдры низшего порядка; 2 – тетраэдры высшего порядка; 3 – гексаэдры низшего порядка; 4 – гексаэдры высшего порядка

2.5.4. Обоснование количества узлов сетки конечных элементов

Влияния количества узлов сетки конечных элементов изучалось на примере расчета осадки модели системы «буроинъекционная цилиндрическая свая-грунт» для свай диаметрами 100, 250 и 400 мм. Длина свай принята равной 3 м. В качестве грунтовых условий были выбран грунт с физико-механическими характеристиками соответствующими ИГЭ-1, как наиболее слабый и представляющий наибольший интерес. Расчетная область разбивалась с разной густотой сетки. Исследования проводились для количества узлов от 500 до 62000 штук в объеме расчетной модели с геометрическими характеристиками соответствующими ми-

нимально допустимым размерам в вертикальном и горизонтальном направлениях. По результатам расчетов построен график.

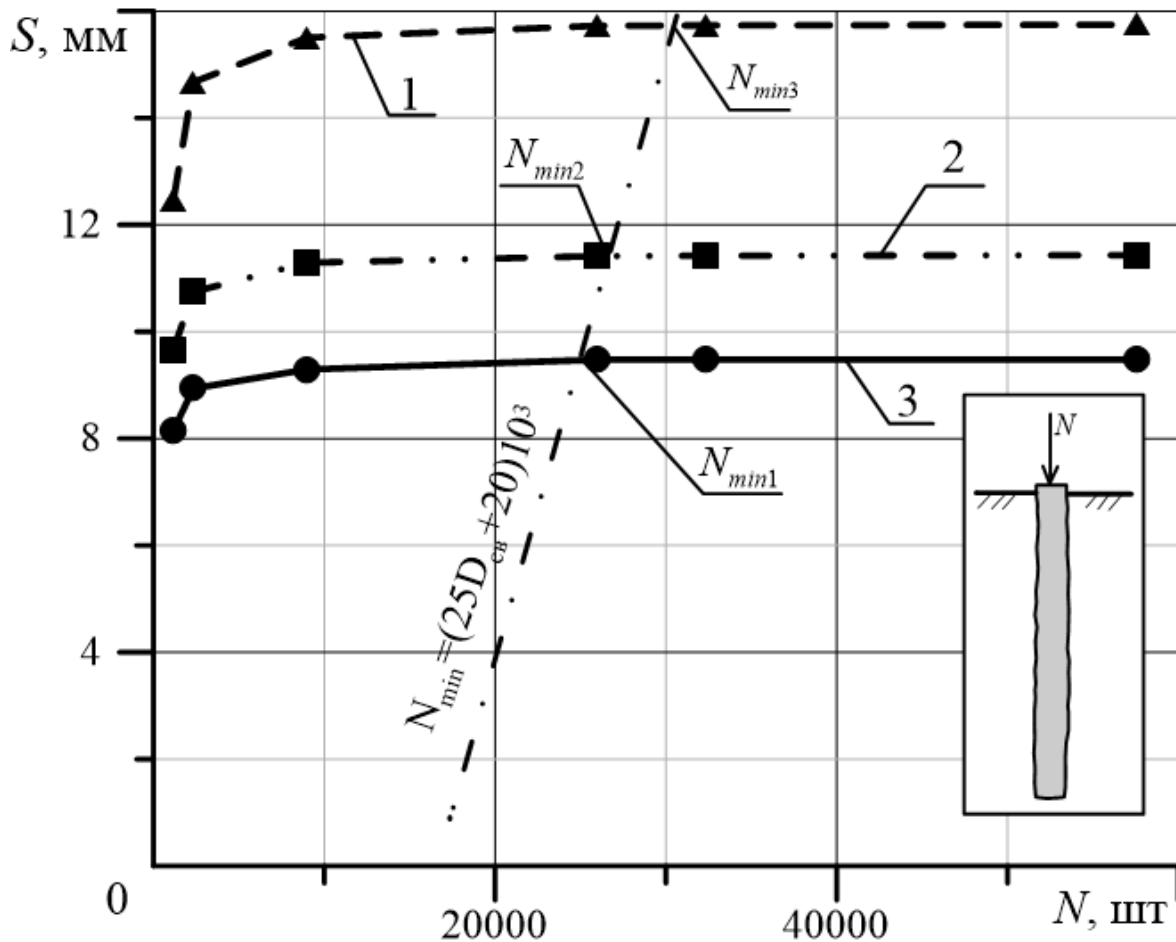


Рисунок 2.20 – Влияние количества узлов сетки конечных элементов численной модели на результаты расчета осадки буринъекционной сваи:
 1 – буринъекционная цилиндрическая свая диаметром 100 мм;
 2 – тоже 250 мм; 3 – тоже 400 мм

Из графика (рис. 2.20) видно, что в интервале значений количества узлов от 500 до $N_{\min 1,2,3}$ осадка оголовка для всех диаметров свай увеличивается. Сгущение сеток и последующее увеличение количества узлов более чем $N_{\min 1,2,3}$ практически не влияет на результаты расчетов. Через точки минимальных значений количества узлов можно провести линию, которую можно описать выражением:

$$N_{\min 1} = (25D_{\text{св}} + 20) \cdot 1000 \quad (2.18)$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при густоте сетки конечных элементов меньшей, чем N_{\min} результаты расчета будут не корректны. Применение сеток с количеством узлов более N_{\min} может привести к увеличению времени расчета без повышения его качества.

Так как уравнение (2.18) получено для свай различного диаметра и постоянной длины ($L_{\text{св}} = 3$ м), то для его применения при расчете свай других типоразмеров, требуется его корректировка. Для этого были отдельно проведены серии расчетов для свай длинами 7 и 11 метров соответственно. При этом были выбраны буринъекционные сваи диаметром 400 мм, так как, согласно графика (рис. 2.21), для расчета свай такого диаметра в численной расчетной модели должно быть наибольшее (по сравнению с другими диаметрами) количество узлов сетки конечных элементов. По полученным данным построен график.

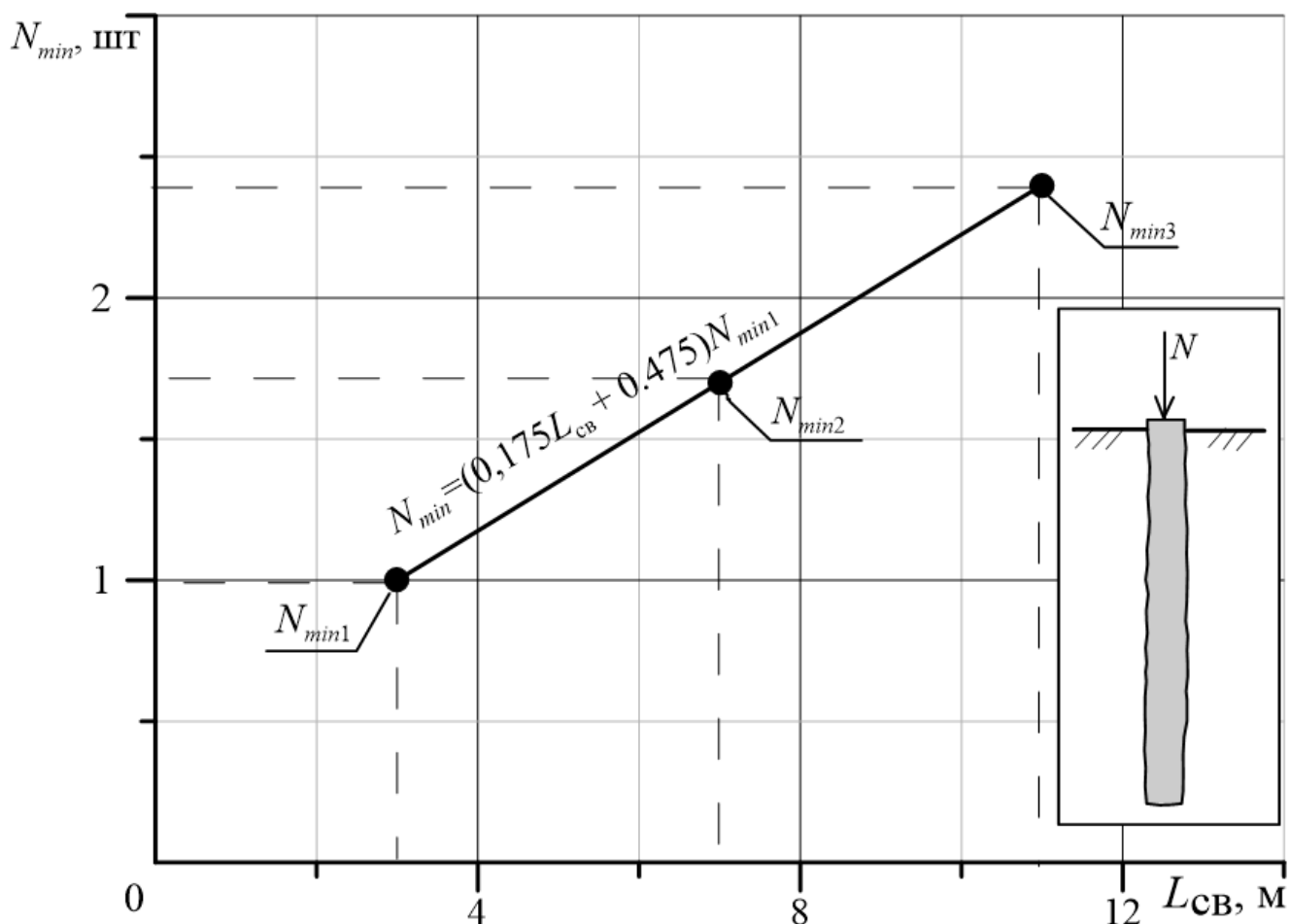


Рисунок 2.21 – График зависимости минимального количества конечных элементов в расчетной модели от длины сваи

Как видно из графика (рис. 2.21) с увеличением расчетной длины сваи требуемое количество узлов в расчетной модели так же увеличивается. По своему виду зависимость носит линейный характер, которую можно описать уравнением:

$$N_{min} = (0,175L_{св} + 0,475)N_{min1} \quad (2.19)$$

Учитывая, что выражение (2.19) получено для свай длиной 3м и соответственно с его помощью можно определить значения N_{min1} . Далее, подставив значения выражения (2.19) преобразуем уравнение (2.20) в выражение вида:

$$N_{min} = (25D_{св} + 20) \cdot 1000 \cdot (0,175L_{св} + 0,475) \quad (2.20)$$

Из рассмотрения выражения (2.20) видно, что оно учитывает, как диаметр буроинъекционной сваи, так и ее длину.

Таким образом, при помощи выражения (2.20), можно определить минимальное количество узлов в расчетной схеме системы «буроинъекционная коническая свая – грунт».

Далее, в исследованиях, при дискретизации расчетных областей, сетка конечных элементов задается с густотой при которой общее количество узлов в расчетной модели не менее N_{min} определяемого при помощи выражения (2.20).

2.6. Выводы по разделу 2

1. По данным аналитических, численных и экспериментальных исследований разработано эффективное конструктивное решение буроинъекционной конической сваи для глинистых грунтов, которое подтверждено патентами РФ на изобретения (2010, 2017). Область применения рассматриваемых конструкций свай для глинистых грунтов составляет 3 – 8 м.;

2. Разработана методика численного моделирования работы буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах. Методика позволяет на основе при-

нятого подхода получать зависимости нагружения буроинъекционных конических и цилиндрических свай; сопоставлять полученные данные с результатами экспериментов. На основании сравнения результатов расчетов с результатами натурных испытаний можно сделать вывод о том, что при помощи численного моделирования методом конечных элементов можно с достаточной точностью описать поведение одиночных конических буроинъекционных свай.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СЖИМАЮЩИХ НАГРУЗОК

3.1. Исследование влияния угла наклона боковой поверхности буройнъекционной конической сваи на ее несущую способность

Исследование графиков осадок. Для оценки работы буройнъекционных конических свай в глинистом грунте были проведены численные исследования их нагружения внешней вертикальной нагрузкой N . Исследования проводились в программном комплексе *Midas GTS NX* [64] При этом, в качестве расчетной схемы были приняты буройнъекционная коническая свая со следующими параметрами: материал свай – мелкозернистый бетон класса В25; длина свай $L_{св} = 7$ м, диаметр оголовка $D_{ог} = 390$ мм, диаметр нижнего конца $D_{нк} = 100$ мм. Грунтовые условия были представлены однородным суглинком текучепластичной, мягкопластичной и тугопластичной консистенции. Характеристики грунта: удельный вес грунта $\gamma = 18$ кН/м³; число пластичности $I_p = 10$ %; показатель текучести $I_L = 0,4–0,8$; угол внутреннего трения $\varphi = 14–20$ град; удельное сцепление $c = 10–38$ кПа. Модуль общей деформации грунта различного состояния принят $E = 8–14$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,32–0,35$. Рассматриваемый глинистый грунт не обладал специфическими неблагоприятными свойствами.

Результаты численных расчетов осадки буройнъекционной конической сваи расположенной в глинистом грунте суглинке текуче-пластичной консистенции представлены на рисунке 3.1.

Полученные результаты показывают, что характер изменения зависимости $S=f(N)$ в рассматриваемом глинистом грунте различного состояния одинаковый. Но количественные значения осадок S различные. Из рассмотрения графиков осадок (рис. 3.1) видно, что весь процесс нагружения буройнъекционной конической сваи можно условно разделить на три этапа. На первом этапе (этап 1) нагружения зависимость $S = f(N)$ носит линейный характер. Первый этап заканчивается при нагрузке $N_{1л} = 35$ кН для суглинка текучепластичного, $N_{2л} = 58$ кН и $N_{3л} = 78$ кН соответственно для суглинка мягкопластичного и тугопластичного.

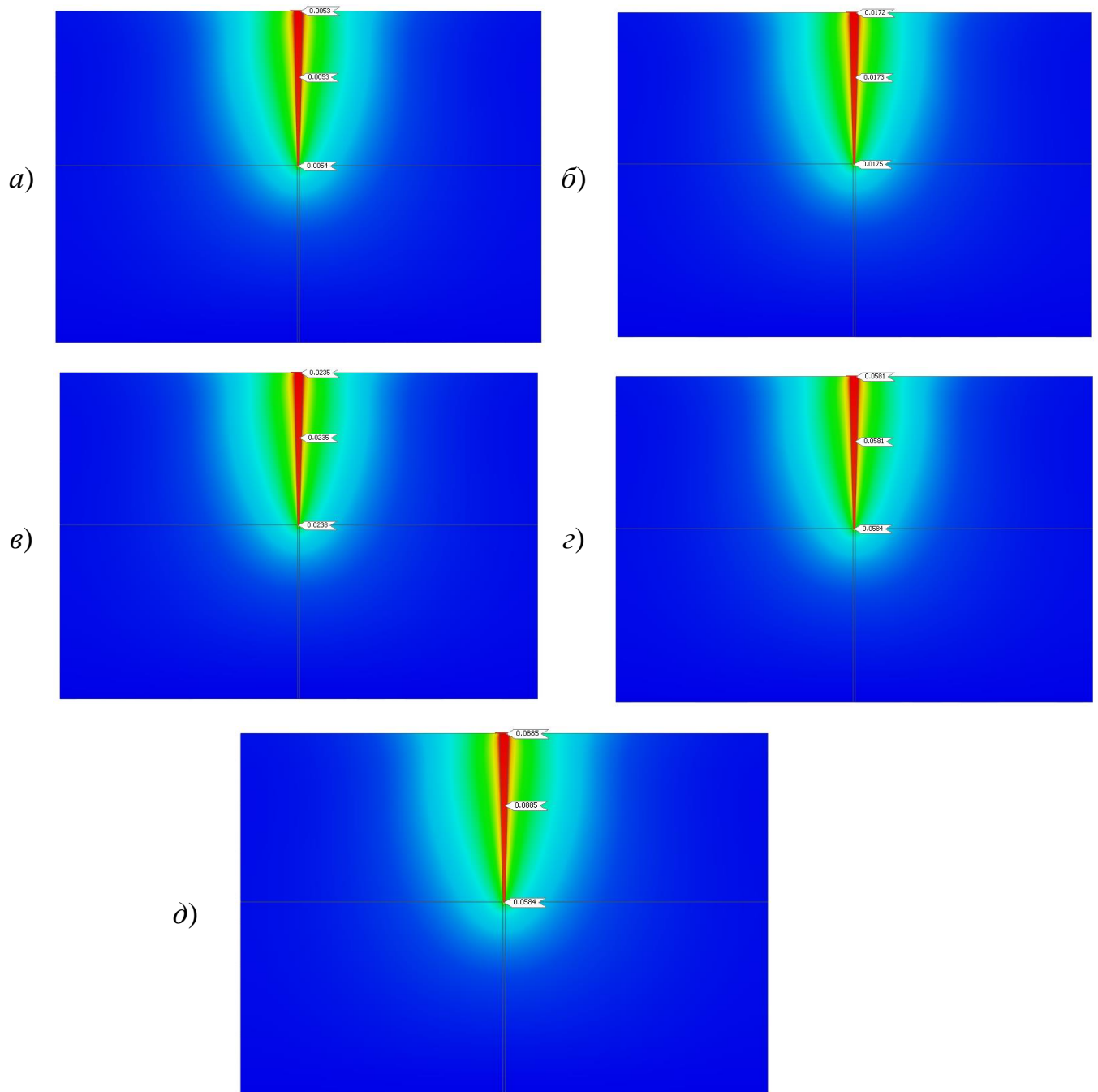


Рисунок 3.1 – Осадки буроньекционной конической сваи длиной 7 м в суглинке мягкопластичном: *a* – при внешней нагрузке 65 кН; *б* – то же 100 кН; *в* – то же 125кН; *г* – то же 181кН; *д* – то же 200 кН (флажками на рисунках даны перемещения сваи)

Линейную зависимость $S = f(N)$ можно объяснить работой сваи при внешней нагрузке N , действие которой не приводит к нарушению структурных связей грунта. Нижний конец сваи на рассматриваемом участке нагружения практически не участвует в работе, так как внешняя нагрузка N передается на основание за счет ее боковой поверхности. Перемещения сваи на этапе 1 носят упругий (квази-

упругий) характер. Затем, после превышения значений $N_{1л}$, $N_{2л}$, $N_{3л}$ наступает второй этап (этап 2) нагружения сваи. Линейная зависимость заканчивается и график $S = f(N)$ становится криволинейным (участки от $N_{1л}$ до $N_{1н}$; от $N_{2л}$ до $N_{2н}$; $N_{3л}$ до $N_{3н}$). Это свидетельствует о начале сдвига грунта по боковой поверхности буринъекционной конической сваи.

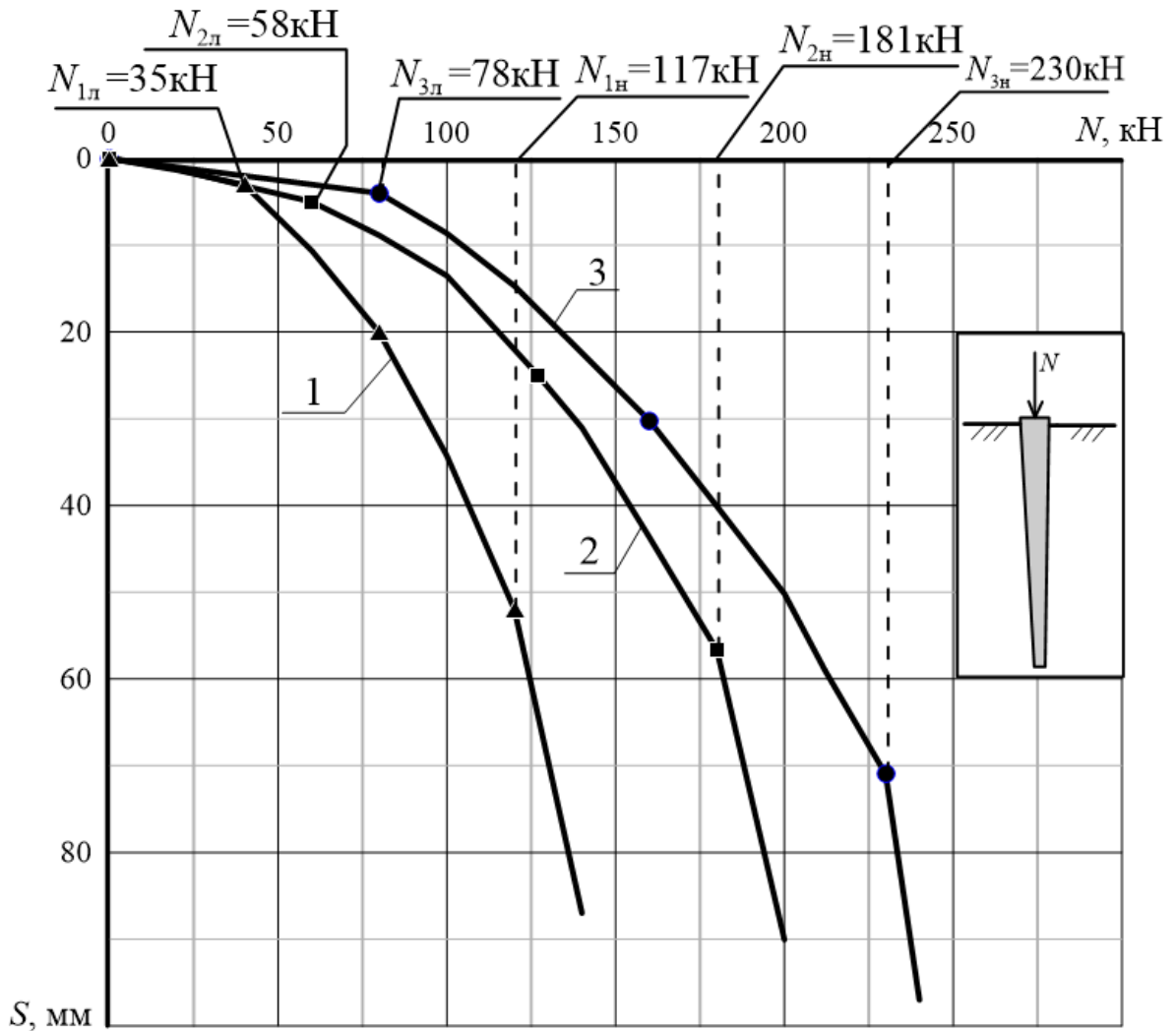


Рисунок 3.2 – Графики осадок буринъекционной конической сваи в глинистом грунте:

- 1, 2, 3 – соответственно в суглинке текучепластичной, мягкопластичной и тугопластичной консистенции; $N_{1л}$, $N_{2л}$, $N_{3л}$ – внешняя нагрузка N при завершении нагружения сваи на этапе 1 соответственно для суглинка текучепластичного, мягкопластичного и тугопластичного; $N_{1н}$, $N_{2н}$, $N_{3н}$ – внешняя нагрузка N при завершении нагружения сваи на этапе 2 соответственно для суглинка текучепластичного, мягкопластичного и тугопластичного

На этапе 2 работа сваи обусловлена силами трения (сопротивления) грунта по ее боковой поверхности. По мере развития сил трения (сопротивления f) в ра-

боту начинает включаться нижний конец сваи. На третьем этапе (этап 3), при достижении нагрузки $N_{1н} = 117$ кН (а также $N_{2н} = 181$ кН и $N_{3н} = 230$ кН) осадки сваи начинают стремительно возрастать при незначительном увеличении внешней нагрузки N . Это свидетельствует об исчерпании несущей способности F_d буроинъекционной конической сваи по грунту. Выявленные закономерности наблюдались для всех рассматриваемых разновидностей глинистого грунта (суглинки, супеси, глины).

По мере нагружения буроинъекционной конической сваи внешней нагрузкой N (суглинок мягкопластичный) вокруг ее ствола начинают формироваться зоны локального нарушения прочности грунта (зоны сдвигов). Подтверждением характера этой работы служат результаты ее численного моделирования с оценкой перемещения грунта в околосвайном пространстве (рис. 3.3). При этом рассматривалось нагружение конической сваи аналогичного конструктивного решения длиной $L_{св} = 7$ м. Было установлено, что при увеличении внешней нагрузки N зона сдвигов начинает формироваться в уровне острия сваи (рис. 3, а). Начало формирования этой зоны соответствует завершению этапа 1. На графиках осадок конической сваи (рис. 3.1), завершение этапа 1 соответствует нагрузке $N_{2л} = 58$ кН. По мере увеличения внешней нагрузки N зона сдвигов начинает развиваться вверх в направлении оголовка сваи (рис. 3.3, б). При внешней нагрузке N , соответствующей примерно 60–70% от предельной $N_{2л} = 181$ кН (для этапа 2), зона сдвигов начинает также формироваться и в уровне оголовка сваи (рис. 3.3, б). Она развивается вокруг ствола сваи на незначительную глубину (не более 0,15–0,25 длины сваи). При внешней нагрузке N , соответствующей примерно 85–95% от предельной $N_{2л} = 181$ кН (для этапа 2) происходит слияние зон сдвигов (верхней и нижней). Завершение процесса слияния зон сдвигов соответствует окончанию этапа 2 на графике осадок сваи (рис. 3.1). При величине внешней нагрузки N , превышающей предельную $N_{2л} = 181$ кН для этапа 2 ($N > N_{1н}$, $N > N_{2н}$, $N > N_{3н}$) свая переходит в следующий третий этап ее нагружения (этап 3). На этапе 3 (рис. 3.3 в) наблюдается интенсивный рост осадок S буроинъекционной кониче-

ской сваи, а внешняя нагрузка N , соответствующая началу этапа 3, может быть принята за ее несущую способность F_d .

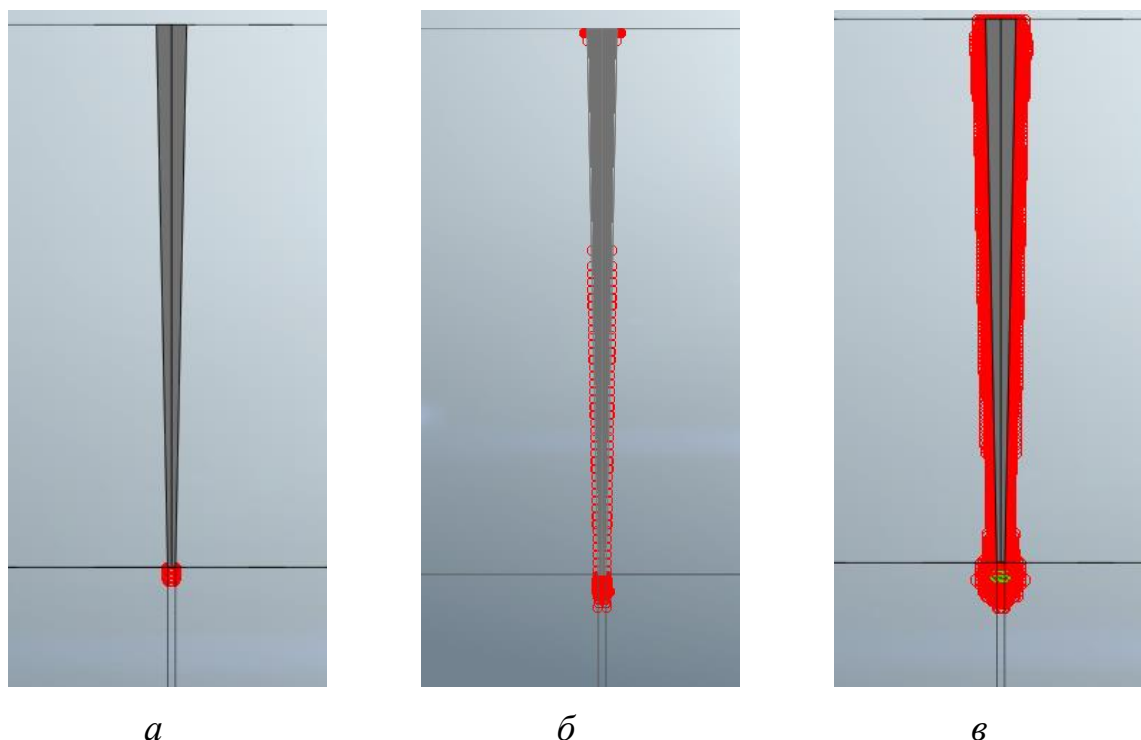


Рисунок 3.3 – Формирование зон сдвигов грунта (суглинок мягкопластичный) вокруг ствола буринъекционной конической сваи в зависимости от этапов ее нагружения:

a – окончание первого этап нагружения; b – второй этап нагружения; v – третий этап нагружения (потеря несущей способности сваи)

Таким образом, полученные данные (рис. 3.3) характеризуют работу буринъекционной конической сваи на всех этапах ее нагружения в глинистом грунте.

Оценка влияния угла наклона боковой грани буринъекционной конической сваи на ее несущую способность. Для оценки влияния угла наклона боковой грани буринъекционной конической сваи на ее несущую способность были выполнены серии расчетов для свай длинами 3 и 11 м. Расчеты выполнялись для свай расположенных в суглинках мягкопластичных с геометрическими параметрами острия и оголовка, как и в предыдущем эксперименте. Длина сваи составляла 7 м. Угол наклона боковой поверхности буринъекционной конической сваи равен 2 град. По полученным данным построены соответствующие графики (рис. 3.4). Так как графики для свай длиной 3 и 11 м аналогичны данным длиной 7 м, то в работе они не представлены. На их основе были получены значения несущей

способности для буринъекционных конических свай с различным углом наклона их боковой поверхности (рис. 3.4).

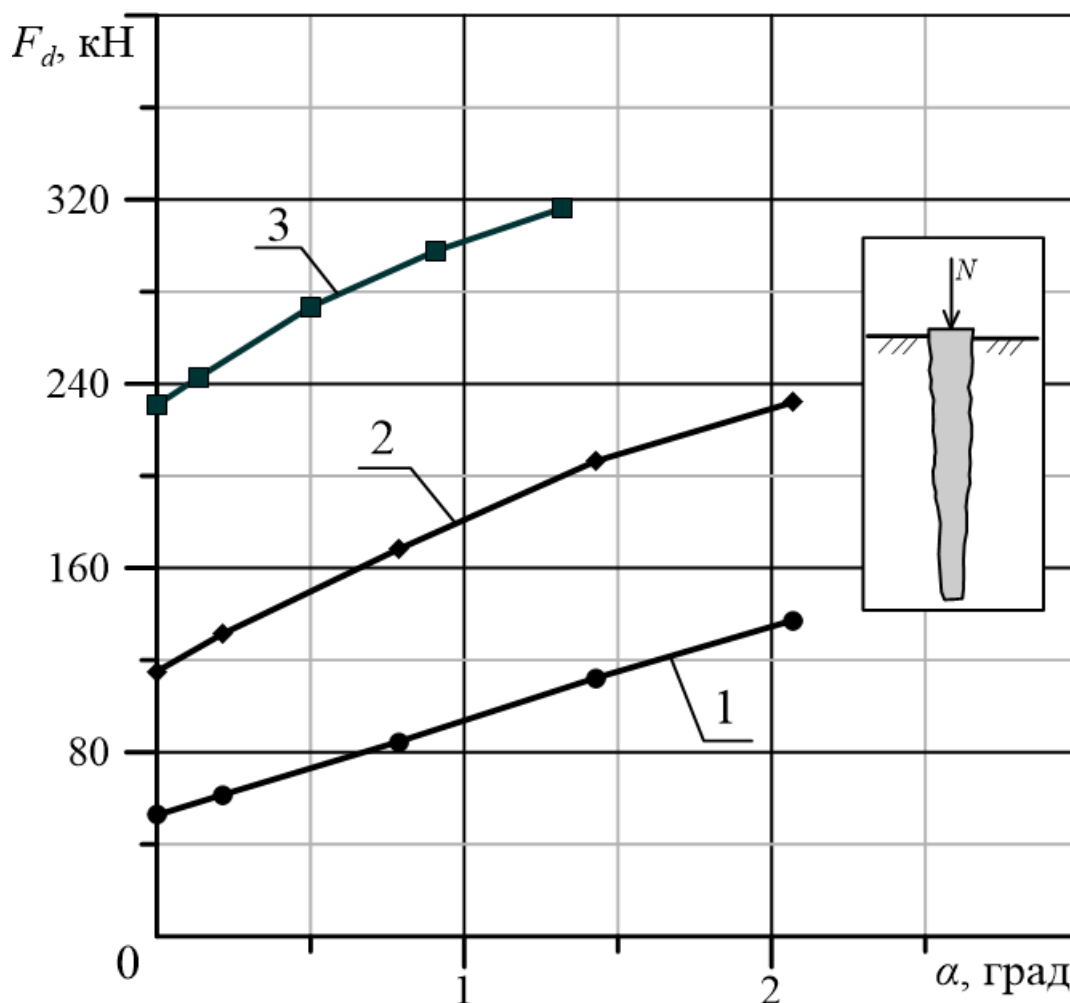


Рисунок 3.4 – Зависимость несущей способности буринъекционных конических свай от наклона боковой грани:

1 – буринъекционная коническая свая длиной 3 м; 2 – то же 7 м; 3 – то же 11 м

Из рассмотрения графиков (рис. 3.4) видно, что для всех кривых характерно их возрастание, что свидетельствует об увеличении несущей способности с увеличением угла наклона для всех видов свай. Также следует отметить, что для кривой 1, описывающей работу буринъекционных свай длиной 3 м, приращение несущей способности больше чем для кривой, характерной для свай длиной 11 м (рис. 3.4, поз. 3). Наглядно это показано на графике (рис. 3.5).

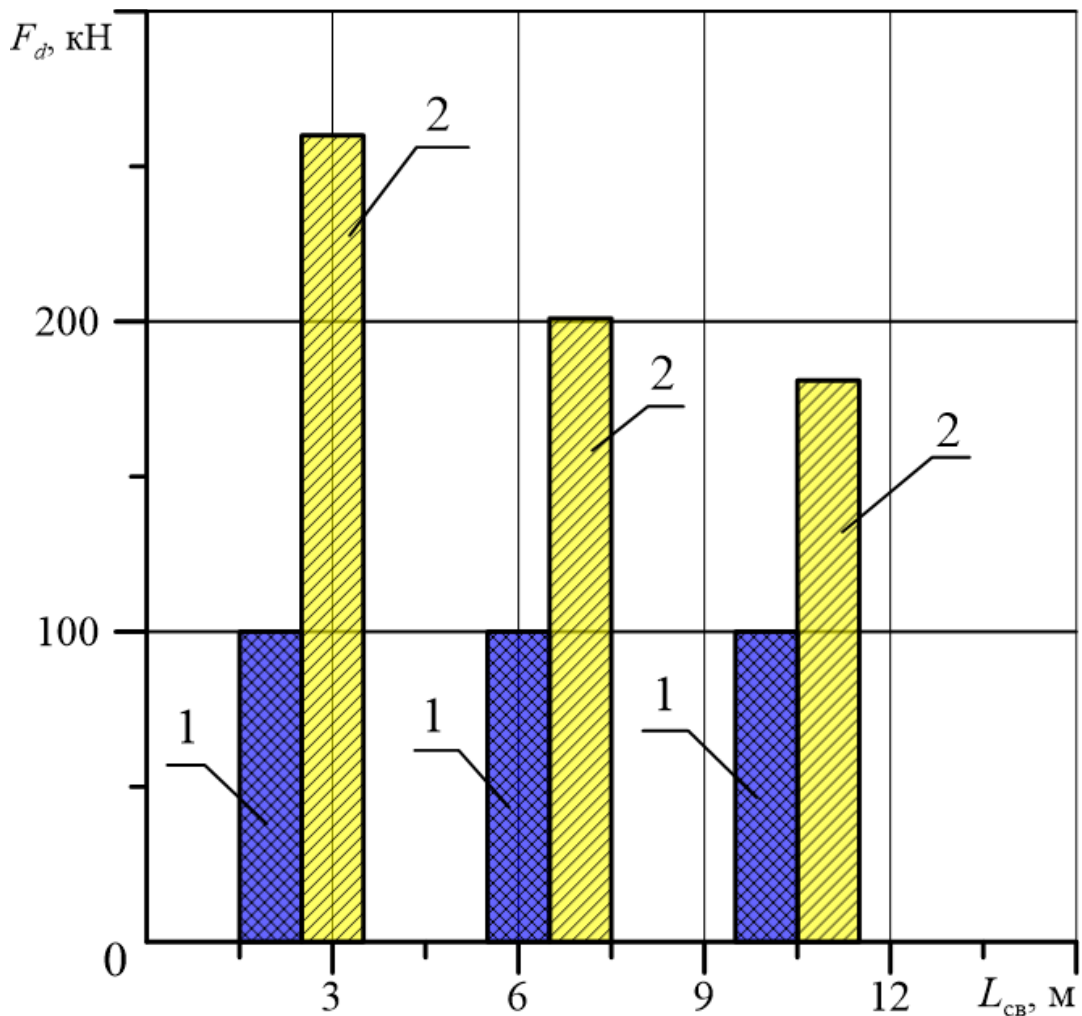


Рисунок 3.5 – Влияние угла наклона боковой поверхности буроинъекционных конических свай на их несущую способность:

1 – буроинъекционные цилиндрические сваи; 2 – то же конические сваи

Из графика (рис. 3.5) видно, что для свай длиной 3 м относительное приращение по несущей способности по сравнению с цилиндрической сваемой может достигать в 2,5 раза, а для 11 м сваи в 1,8 раз. Это можно объяснить тем, что с увеличением длины сваи при одинаковых диаметрах оголовка и острия сваи меняется ее коничность. Таким образом, можно сделать вывод о том, что максимальный эффект увеличения несущей способности для буроинъекционных конических свай наблюдается для свай длиной от 3 до 7 м (при постоянном диаметре оголовка).

Учитывая, что с увеличением угла наклона боковой грани буроинъекционных конических свай увеличивается площадь их боковой поверхности, то отдельный интерес вызывал вопрос, связанный с оценкой влияния изменения площади

боковой поверхности на несущую способность конических свай. Таким образом, дополнительно, по полученным данным, был построен график (рис. 3.6) влияния площади боковой поверхности буринъекционной конической сваи на ее несущую способность.

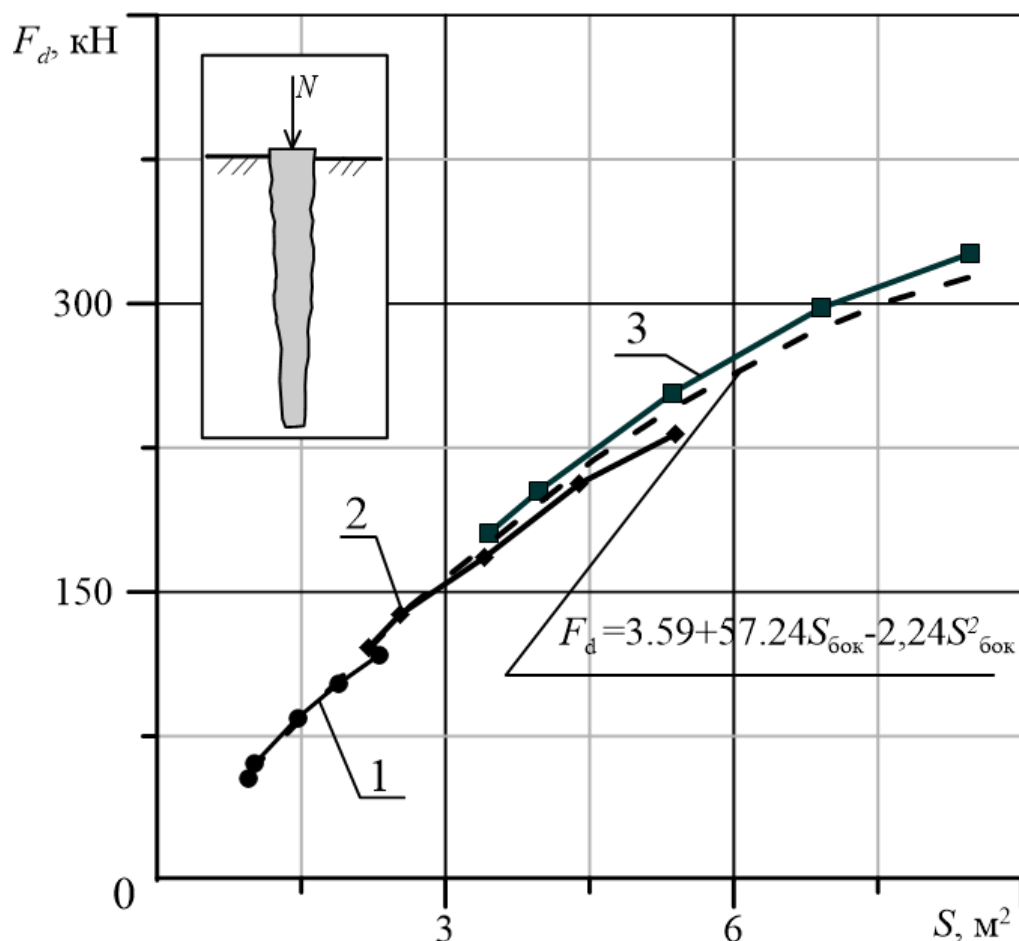


Рисунок 3.6 – График влияния площади боковой поверхности буринъекционных свай на их несущую способность:

1 – буринъекционная коническая свая длиной 3 м; 2 – то же 7 м; 3 – то же 11 м

Из рассмотрения графика (рис. 3.6) видно, что с увеличением площади боковой поверхности буринъекционных конических свай увеличивается и их несущая способность, что закономерно. Зависимость несущей способности конической сваи от площади ее боковой поверхности носит слабо нелинейный характер. Так же на графике (рис. 3.6) видно, что при одинаковой площади боковой поверхности, для свай различной длины, их несущая способность различна. Причем чем длиннее свая, тем это различие больше. Это можно объяснить тем, что с увеличе-

нием длины сваи увеличивается вертикальная составляющая, возникающая вследствие действия обжатия от собственного веса грунта на наклонную поверхность грани сваи.

Из этого можно сделать вывод о том, что конические сваи различной длины, но имеющие одинаковую площадь боковой поверхности обладают различной несущей способностью. Это различие может достигать до 8 %.

Для удобства, зависимость несущей способности буроинъекционных конических свай от площади боковой поверхности можно описать кривой полученной путем аппроксимации кривых представленных на графике (рис. 3.6). Полученную кривую можно описать следующим выражением:

$$F_{dk} = 3,59 + 57,24S_{бок} - 2,24 S_{бок}^2, \quad (3.1)$$

где F_{dk} – несущая способность конической буроинъекционной сваи, кН;

$S_{бок}$ – площадь боковой поверхности буроинъекционной конической сваи без учета площади ее острия, м².

Полученные данные аппроксимации в виде уравнения (3.1) могут быть использованы при разработке метода расчета несущей способности буроинъекционных конических свай.

Помимо оценки влияния площади боковой поверхности, был рассмотрен также вопрос, связанный с оценкой соотношения используемого объема материала свай (материалоемкость) и их несущей способности. Для этого был вычислен объем буроинъекционных конических свай различной длины (с различным углом наклона боковой поверхности) и сопоставлен с данными их несущей способности (рис. 3.7).

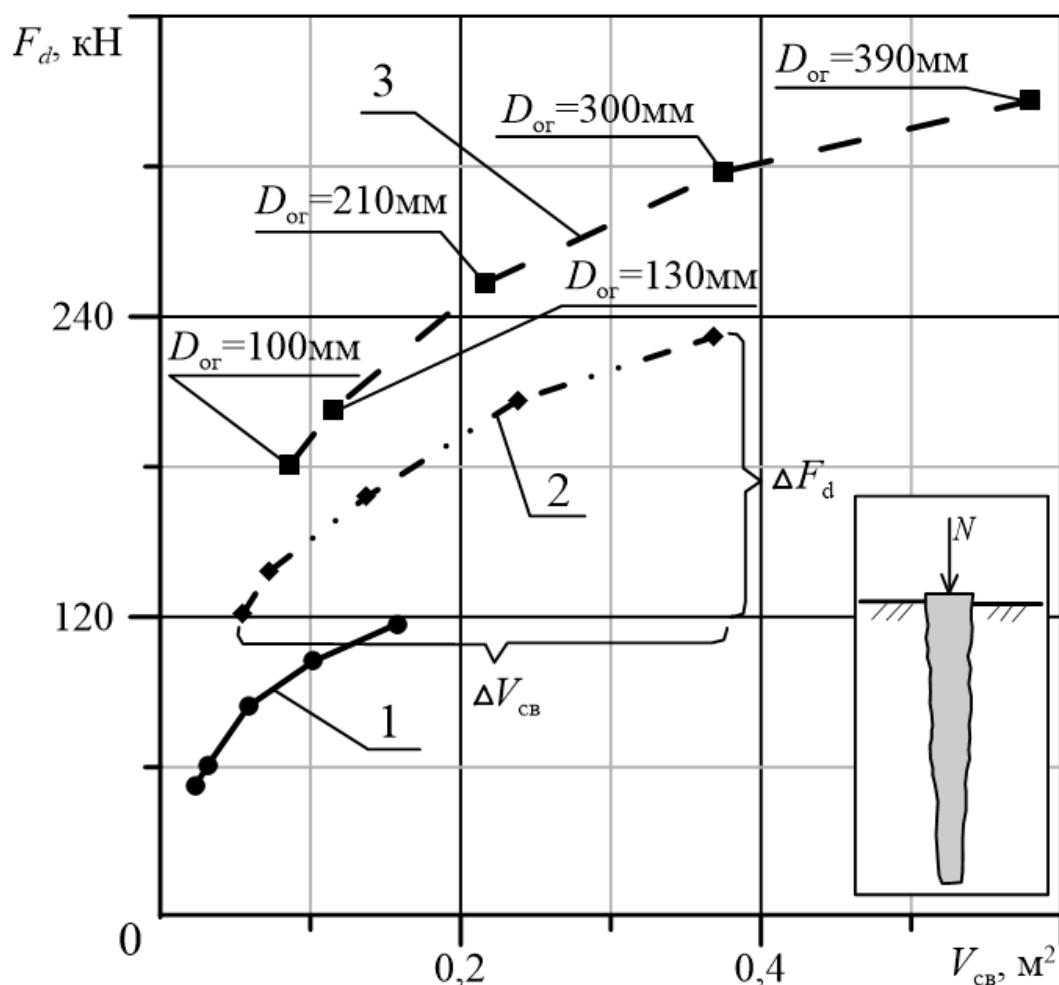


Рисунок 3.7 – Зависимость несущей способности буроинъекционных конических свай от расхода материала на их изготовление:

1 – буроинъекционная коническая свая длиной 3 м; 2 – то же 7 м; 3 – то же 11 м

Из графика (рис. 3.7) видно, что все кривые возрастают, что свидетельствует об увеличении несущей способности с увеличением материалоемкости свай. Так же следует отметить, что относительное приращение по несущей способности, т.е. соотношение увеличения несущей способности и используемого материала для свай длиной 3 м больше чем для свай длинами 7 и 11 м. Отношение изменения несущей способности к объему используемого материала для свай длиной 3 м составляет 0,64, для свай длинами 7 и 11 м составляет 0,54 и 0,47 соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективное использование материала тела свай происходит в относительно коротких буроинъекционных конических сваях.

Учитывая, что расчеты выполнялись для буринъекционных конических свай, то отдельный интерес вызывал вопрос, связанный со сравнением несущей способности конических свай и цилиндрических при одинаковой материалоемкости и соответственно и их стоимости устройства.

На примере расчета несущей способности буринъекционной цилиндрической сваи длиной 7 м и расположенной в суглинке мягкопластичном выполнены серии расчетов. Диаметр буринъекционной цилиндрической сваи выбран таким образом, что ее объем был равен соответствующей буринъекционной конической свае. Расчет выполнялся для цилиндрических свай диаметрами 116, 158, 208 и 242 мм, что соответствует коническим сваям с диаметрами оголовка 130, 210, 300 и 390 мм соответственно. По полученным данным построен график (рис. 3.8).

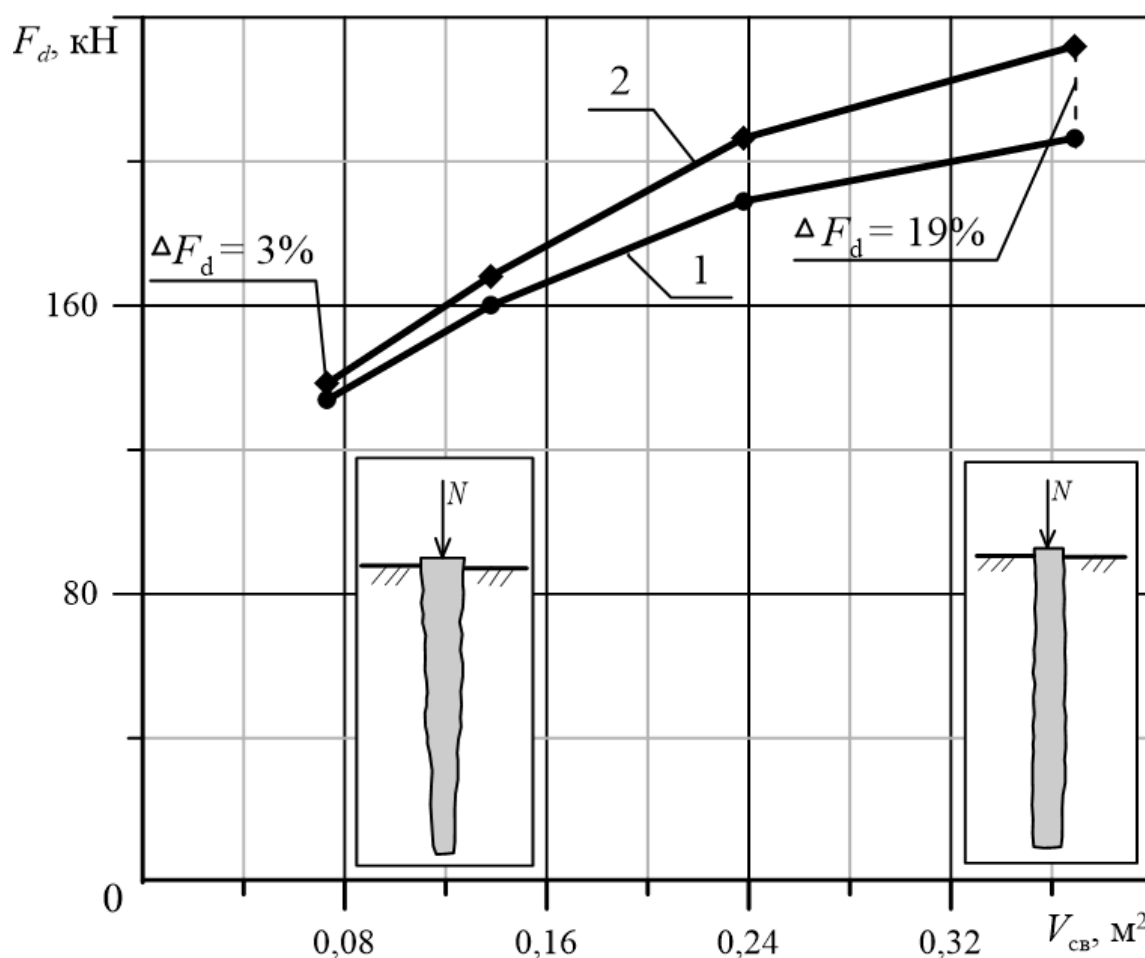


Рисунок 3.8 – Сравнение несущей способности буринъекционных конических и цилиндрических свай при одинаковом расходе материала:

1 – буринъекционные цилиндрические сваи; 2 – то же конические сваи

Из графика (рис. 3.8) видно, что кривые описывающие поведение конических и цилиндрических свай не совпадают и имеют разный угол наклона. При этом, с увеличением используемого объема материала свай разница в несущей способности на вертикальную нагрузку конических и цилиндрических свай возрастает. Увеличение несущей способности конических свай составляет от 3 до 13 % по отношению к цилиндрическим сваям.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что конические сваи обладают большей несущей способностью на вдавливание по отношению к цилиндрическим при одинаковой материалоемкости.

3.2. Исследование влияния длины буроинъекционной конической сваи на ее несущую способность

Для исследования влияния длины буроинъекционной конической сваи на ее несущую способность (осадку) в глинистых грунтах были выполнены серии расчетов для свай длиной ($L_{св}$) равных 3, 7 и 11 м. При этом диаметр острия ($D_{ост}$) и оголовка ($D_{ог}$) были приняты постоянными и равными 100 и 390 мм, что соответствует углу наклона боковой поверхности 2 град. Расчет выполнялся для грунтовых условий с физико-механическими характеристиками соответствующими суглинкам мягкопластичным. Шаг по нагрузке, прикладываемой к оголовку сваи, был принят 10 кН. По полученным данным построен график (рис. 3.9).

Из графика (рис. 3.9) видно, что зависимость несущей способности буроинъекционной конической сваи от ее длины носит линейный характер. Прямая возрастает, что свидетельствует об увеличении несущей способности с увеличением длины сваи, что вполне закономерно.

Из этого можно сделать вывод о том, что зависимость несущей способности буроинъекционной конической сваи от ее длины можно описать уравнением прямой. Что может позволить облегчить разработку инженерного метода расчета буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах.

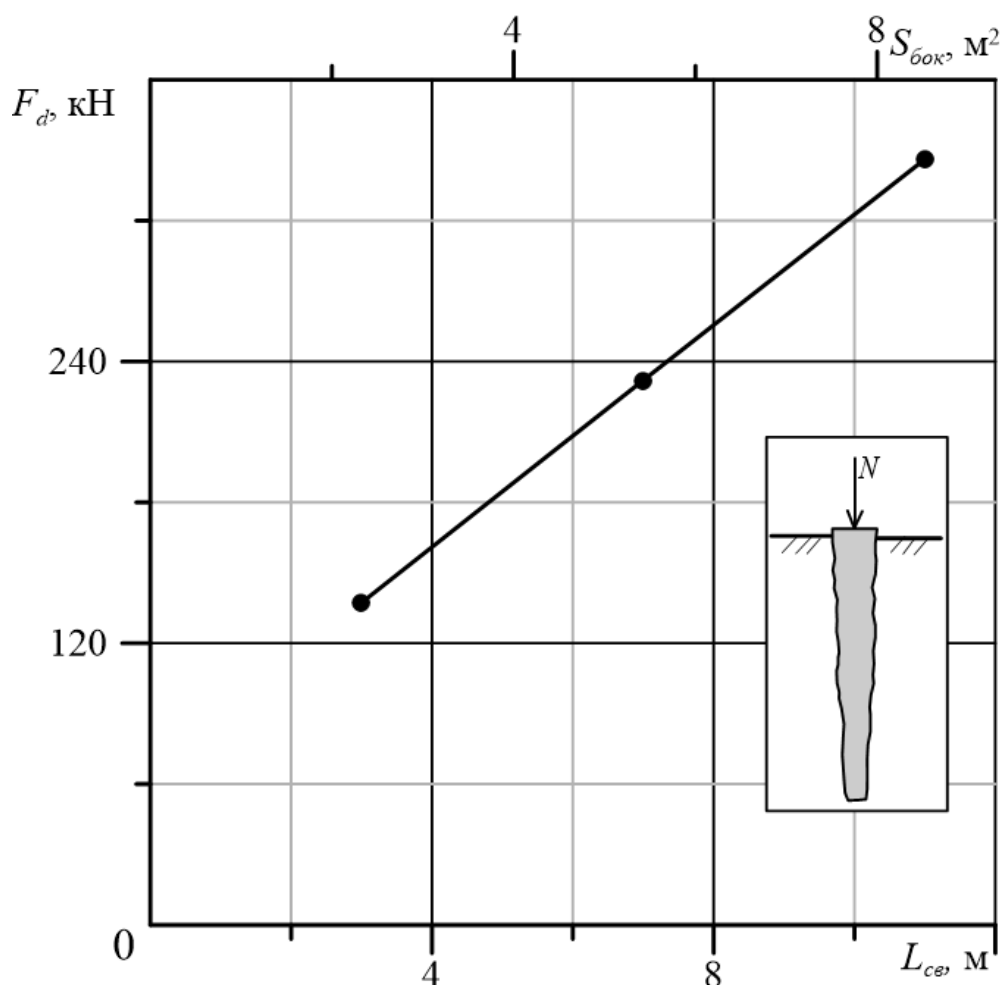


Рисунок 3.9 – График зависимости несущей способности буроналивной конической сваи от ее длины

3.3. Исследование влияния физико-механических характеристик грунтов на несущую способность буроналивной конической сваи

Влияние удельного сцепления грунта. Для оценки влияния удельного сцепления c грунта на перемещения (осадку) буроналивной конической сваи были выполнены расчеты. В качестве основной задачи была рассмотрена свая длиной 7 м. При этом, согласно принятых геометрических параметров, угол наклона боковой поверхности сваи α к ее продольной оси находился в диапазоне значений от 0 (цилиндрическая свая) до 2 град. Угол внутреннего трения грунта φ был принят постоянным и равным 17 град, а значения удельного сцепления грунта 10, 22 и 38 кПа. Интервал увеличения нагрузки принят равным 10 кН (рис. 3.10).

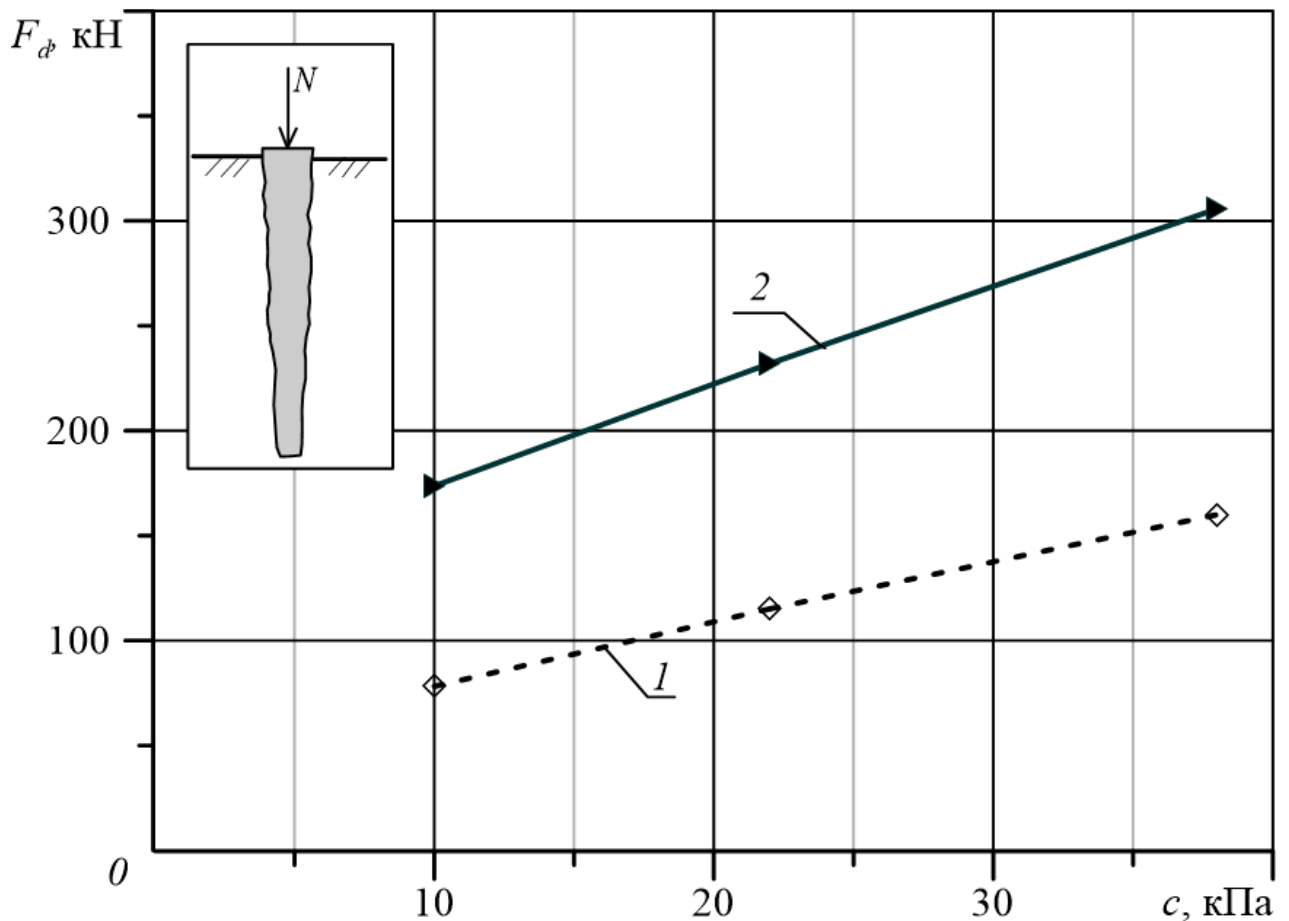


Рисунок 3.10 – Влияние удельного сцепления грунта c на несущую способность буринъекционной конической сваи F_d :

1 – угол наклона грани сваи $\alpha = 0$ град; 2 – то же $\alpha = 2$ град

Из графиков (рис. 3.10) видно, что зависимости 1, 2 изменения несущей способности свай F_d имеют слабовыраженный криволинейный характер. Это характерно как для цилиндрических свай (позиция 1) так и для конических (позиция 2). При этом установлено, что с увеличением удельного сцепления грунта c несущая способность цилиндрических и конических свай F_d возрастает. Например, при изменении характеристики c от 10 до 35 кПа несущая способность цилиндрических свай возрастает примерно в 1,6 раз (от 80 до 150 кН), а для конической сваи примерно в 2,2 раза (от 140 до 320 кН).

Для оценки эффективности использования конических свай по сравнению с цилиндрическими были выполнены дополнительные исследования. Они заключались в том, что в рассмотренных грунтовых условиях устанавливалась удельная несущая способность F_{du} конических и цилиндрических свай в глинистых грун-

тах. Под удельной несущей способностью понимается отношение несущей способности сваи F_d к ее объему ($F_{du} = F_d / V$). По результатам работы был построен график (рис. 3.10) который свидетельствует о следующем.

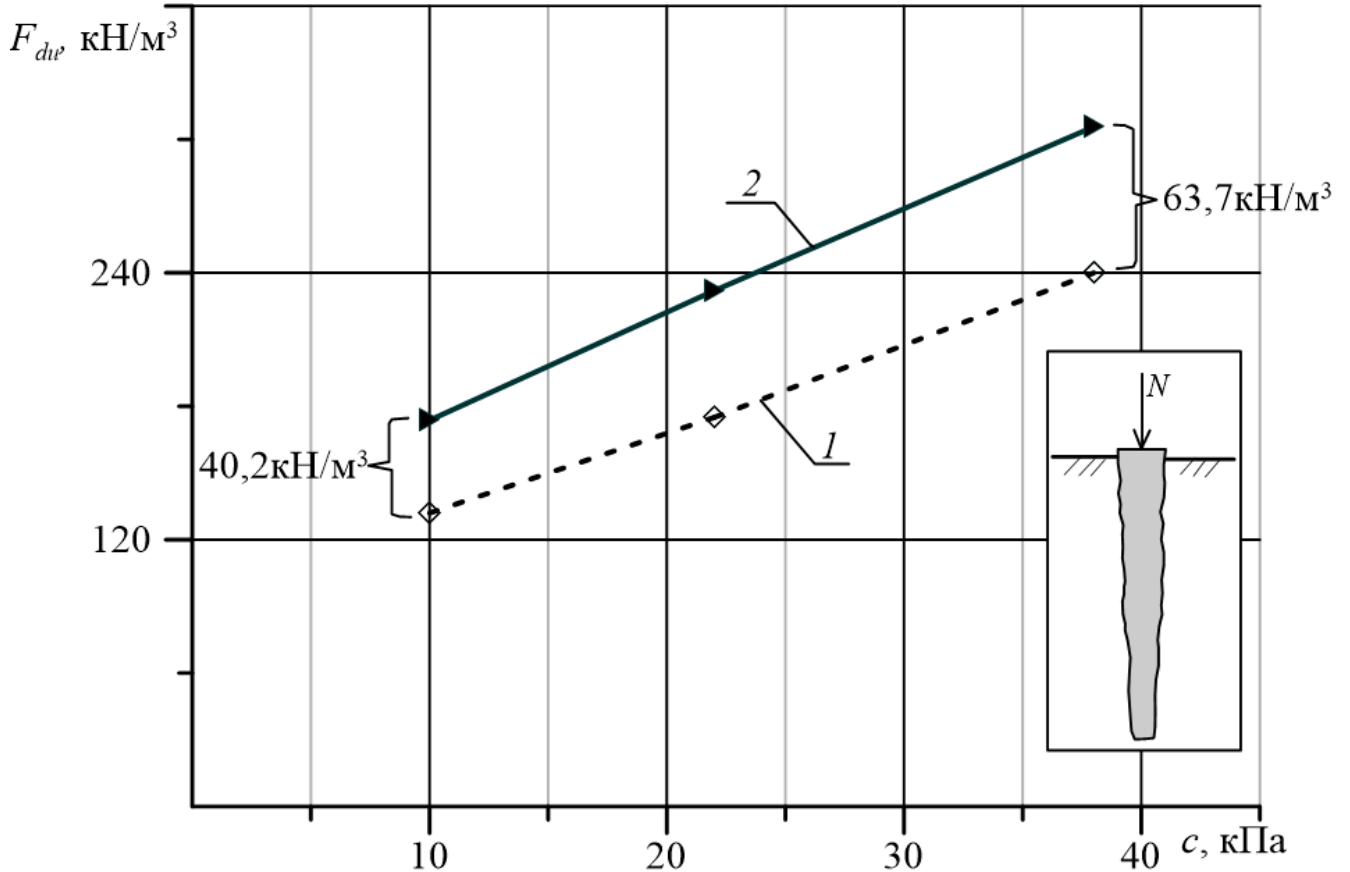


Рисунок 3.11 – Влияние удельного сцепления грунта c на удельную несущую способность F_{du} буроналивной конической сваи:
1 – угол наклона грани сваи $\alpha = 0$ град; 2 – тоже $\alpha = 2$ град

Удельная несущая способность конических свай F_{du} оказалась больше, чем у цилиндрических. При этом с изменением удельного сцепления c удельная несущая способность F_{du} возрастает быстрее, чем у цилиндрических. Так в рассматриваемом диапазоне значений удельного сцепления c от 10 до 38 кПа приращение несущей способности составило от 40 до 64 кН/м³ (примерно в 1,6 раза). Таким образом, установлено, что при одинаковой материалоемкости конических и цилиндрических свай несущая способность конических будет больше чем, цилиндрических. При этом с увеличением характеристики удельного сцепления грунта c эффективность конических свай возрастает по отношению к цилиндрическим.

Влияние угла внутреннего трения грунта. Для оценки влияния угла внутреннего трения глинистых грунтов были выполнены серии расчетов для буроинъекционных конических свай длиной 7 м. При этом диаметр оголовка ($D_{ог}$) и острия ($D_{ост}$) для всех свай был принят равным от 100 до 390 мм и 100 мм соответственно. Грунтовые условия и прикладываемые нагрузки были аналогичны первой серии проведенных исследований. При этом удельное сцепление c было принято постоянным и равным 22 кПа, а угол внутреннего трения φ принимал значения 14, 17 и 20 град. По результатам расчетов построен график (рис. 3.11).

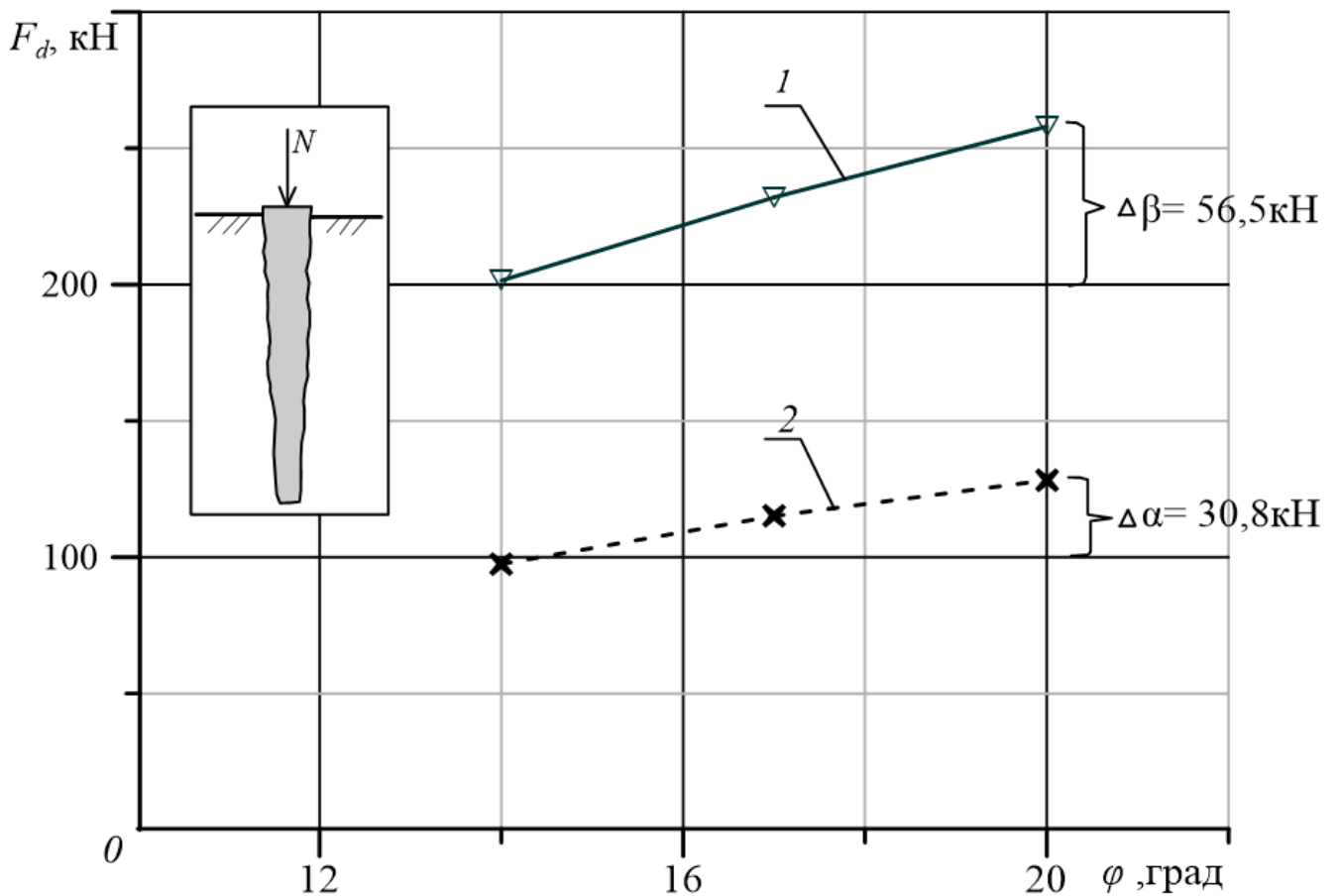


Рисунок 3.12 – График зависимости величины несущей способности одиночных буроинъекционных свай с различным углом наклона боковой поверхности от величины угла внутреннего трения грунта:

1 – угол наклона грани сваи $\alpha = 2$ град; 2 – угол наклона грани сваи $\alpha = 0$ град

Из графиков (рис. 3.12) видно, что с увеличением угла внутреннего трения φ несущая способность конических свай F_d возрастает аналогично несущей способности цилиндрических свай. При изменении характеристики φ от 14 до 20 град

несущая способность цилиндрических и конических свай возрастает примерно в 1,3.

Для оценки эффективности применения буроинъекционных конических свай, по аналогии с ранее выполненными исследования, были дополнительно проведены серии расчетов. В них исследовалось влияния угла внутреннего трения грунта φ на удельную несущую способность F_{du} . По результатам расчетов построен график (рис. 3.13).

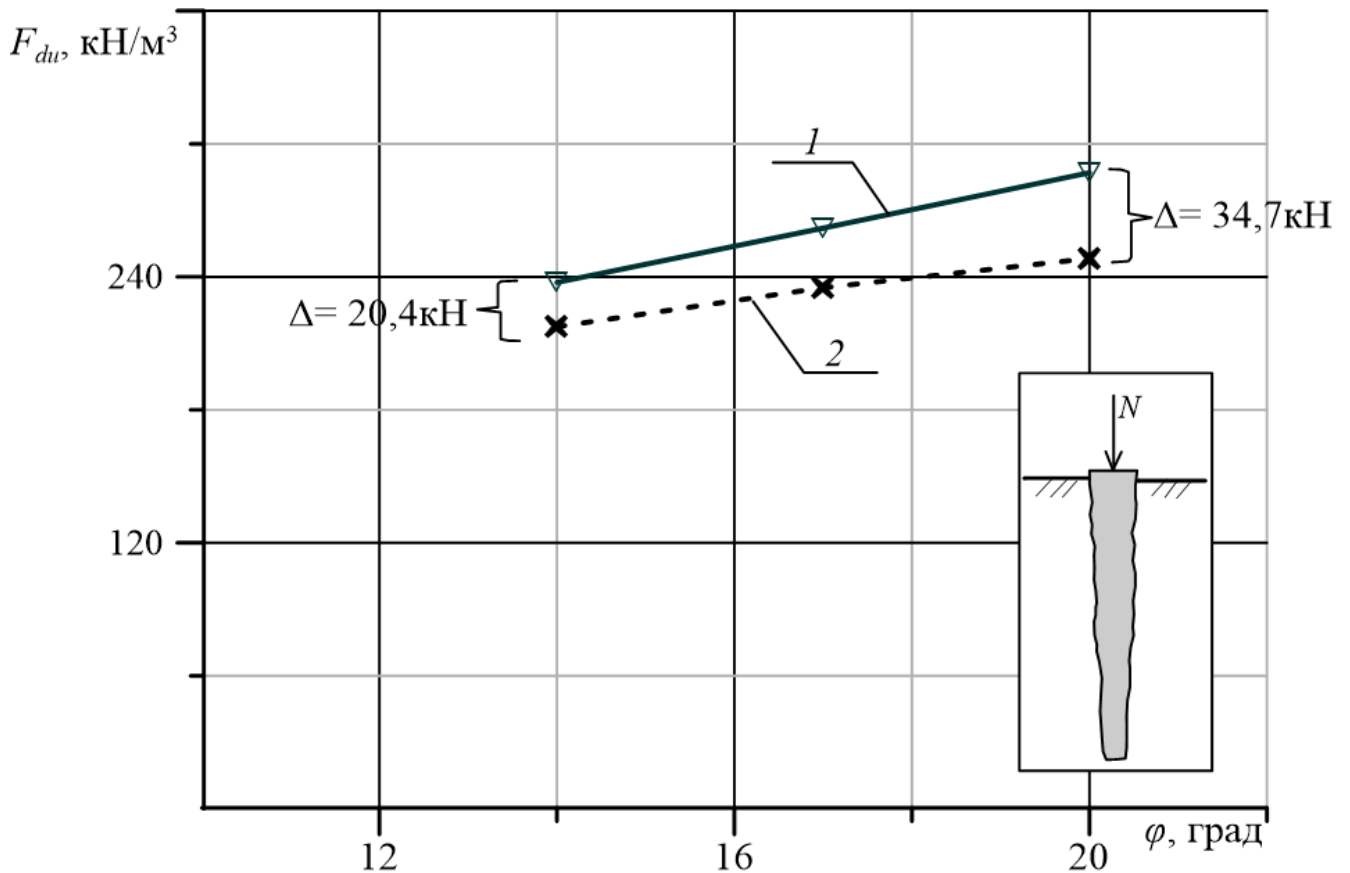


Рисунок 3.13 – Влияние угла внутреннего трения на удельную несущую способность буроинъекционной конической сваи:

1 – угол наклона грани сваи $\alpha = 0$ град; 2 – тоже $\alpha = 2$ град

Из графиков (рис. 3.13) видно, что удельная несущая способность F_{du} конических буроинъекционных свай больше чем у цилиндрических. При этом явно видно, что влияние угла внутреннего трения φ на удельную несущую способность сваи F_{du} значительно меньше, чем для удельного сцепления c . Так, в рассмотренном диапазоне значений угла внутреннего трения φ от 14 до 20 град приращение

несущей способности составило от 20 до 35 кН/м³. При этом в относительных величинах приращение по несущей способности составило всего от 12 до 21 % (примерно в 1,1–1,2 раза).

3.4. Выводы по разделу 3

1. 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.

2. 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.

3. 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) буро-инъекционной конической сваи.

4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Инженерный метода определения несущей способности буроинъекционной конической сваи

4.1.1. Сопоставление результатов расчетов несущей способности буроинъекционных конических свай по разным методам

Для сопоставления результатов расчетов несущей способности буроинъекционных конических свай по разным методам использованы следующие исходные данные. Грунт основания представлен глинистым грунтом с физико-механическими характеристиками соответствующими данным для суглинков мягкопластичной консистенции. При этом принято, что рассматриваемый глинистый грунт не обладает неблагоприятными специфическими свойствами.

Конструкция одиночной буроинъекционной конической сваи выбрана длиной 7 м. Величина диаметр оголовка сваи принимала значение от 130 до 390 мм. Диаметр острия сваи принят постоянным и равным 100 мм. При этом угол наклона боковой поверхности буроинъекционной конической сваи рассматривался равным 0,2, 0,8, 1,4, 2,2 град.

Исходя из анализа литературных источников рассмотренных ранее в главе 1 [2, 26, 35, 43, 59, 95 и др.] и анализа существующих методов расчета несущей способности конических и пирамидальных свай различных способов их изготовления [13, 29, 31, 35, 95 и др.] наиболее подходящими для оценки несущей способности буроинъекционных конических свай были приняты методы Б. В. Бахолдина, Ф. К. Лапшина и О. С. Вертынского, а также метод приведенный в СП 24.13330. 2011. Полученные данные по рассмотренным методам, сопоставлялись с результатами полученными по ПК *Midas GTS NX* (рис. 4.1).

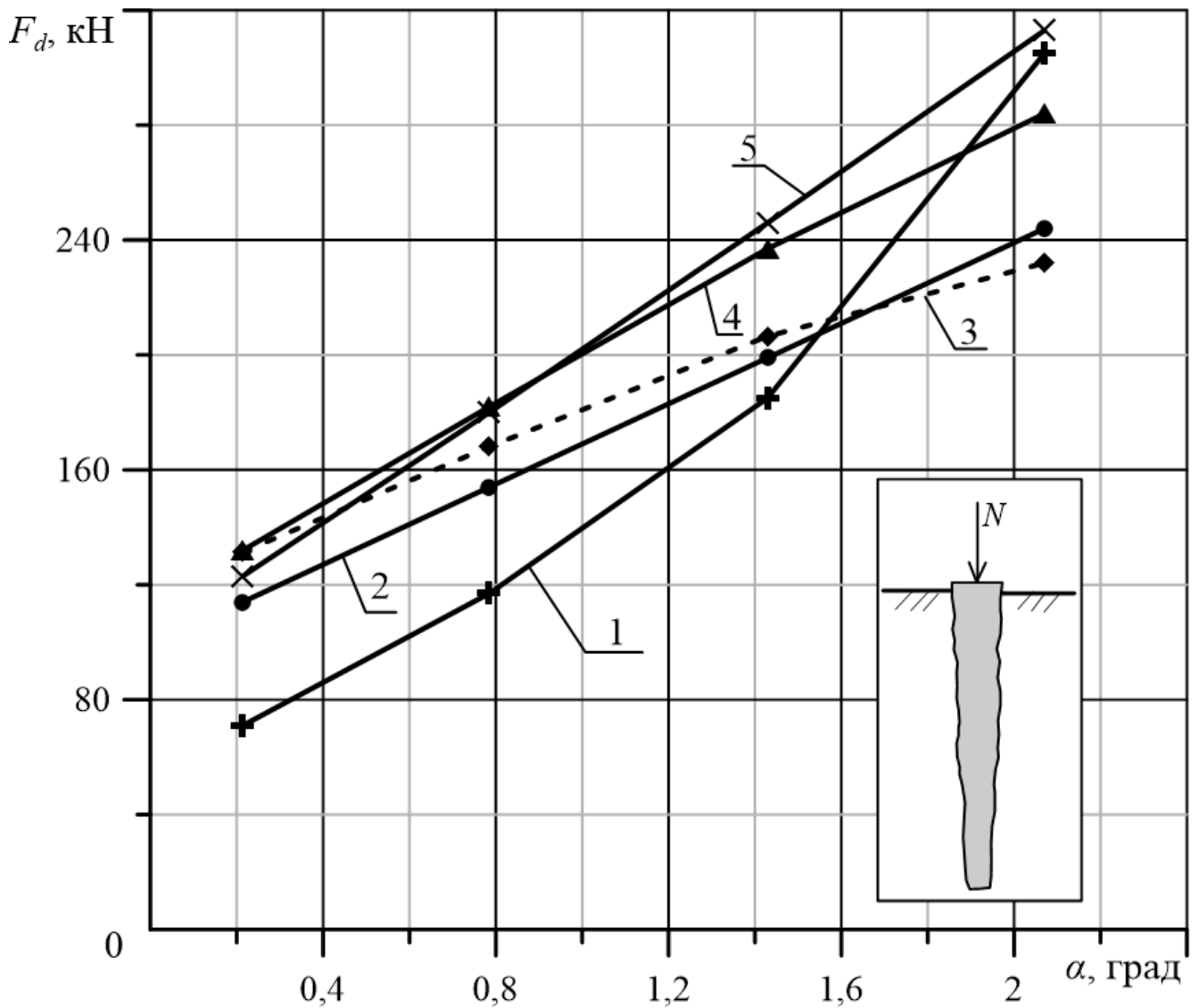


Рисунок 4.1 – Результаты расчета несущей способности буройнъекционных конических свай, выполненные различными методами:
 1 – метод О. С. Вертынского; 2 – то же Ф. К. Лапшина; 3 – данные ПК *Midas GTS NX*; 4 – метод Б. В. Боходина; 5 – то же СП 24.13330–2011

Из графика (рис. 4.1) видно, что результаты расчета несущей способности конической буройнъекционной сваи согласно методике СП 24.13330–2011 (рис. 4.1, поз. 5) во всем диапазоне значений угла наклона боковой поверхности сваи больше на 5–25 % чем значения полученные при помощи ПК *Midas GTS NX*. Несущая способность, вычисленная по методу предложенным О. С. Вертынским (рис. 4.1 поз. 1), в отличие от остальных методов носит криволинейный характер. В интервале значений угла наклона боковой поверхности грани сваи от 0,5 до 2 град несущая способность меньше на 30–35 % чем у других авторов. При угле

наклона боковой поверхности от 1,5 до 2,2 град резко возрастает и практически равно значениям, вычисленным по методу СП 24.13330–2011. Несущая способность, определенная по методу предложенном Б. В. Бахолдиным (рис. 4.1 поз. 4) завышена, при этом с увеличением угла наклона грани сваи от 0,2 до 2,2 град различие в несущей способности по сравнению с результатами, полученными экспериментально возрастает от 1,01 до 1,22 раза. Близкие результаты по сравнению с экспериментальными данными показали расчеты, выполненные по Ф. К. Лапшину (рис. 4.1 поз. 2). Однако для применения данного метода при расчете несущей способности конических буроинъекционных свай необходимо провести ряд уточнений, что бы повысить сходимость результатов расчетов.

Таким образом, в качестве основы для разработки метода определения несущей способности конических буроинъекционных свай в глинистых грунтах, был принят метод, предложенный ученым Ф. К. Лапшиным.

4.1.2. Разработка метода оценки несущей способности буроинъекционной конической сваи и основные результаты расчета

Для разработки метода расчета несущей способности буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах примем схему работы, согласно которой ее нагружение рассматривается в 3 этапа (рис. 4.2, б). Вполне очевидно, что несущая способность буроинъекционной конической сваи F_d длиной 7–8 м будет находиться в интервале нагрузок $N_n > F_d > N_n$. При этом значение F_d должно устанавливаться при осадке сваи S не превышающей значение $S \leq 40$ мм (ГОСТ 5686.2012).

Несущая способность буроинъекционных конических свай может базироваться на методах расчета, предложенных Б. В. Бахолдиным, Ф. К. Лапшиным, Б. И. Далматовым, А. Л. Готманом, А. Б. Пономаревым и др. для пирамидальных и конических свай, устраиваемых в грунте (набивные) или в готовом виде (забивные). Если пирамидальные или конические сваи устраиваются набивными, то скважины для них образуются обычно выштамповкой или раскатыванием (кроме пирамидальных свай). Если же такой формы сваи устраиваются забивными, то

используются сборные железобетонные элементы, которые погружаются в готовом виде в грунт.

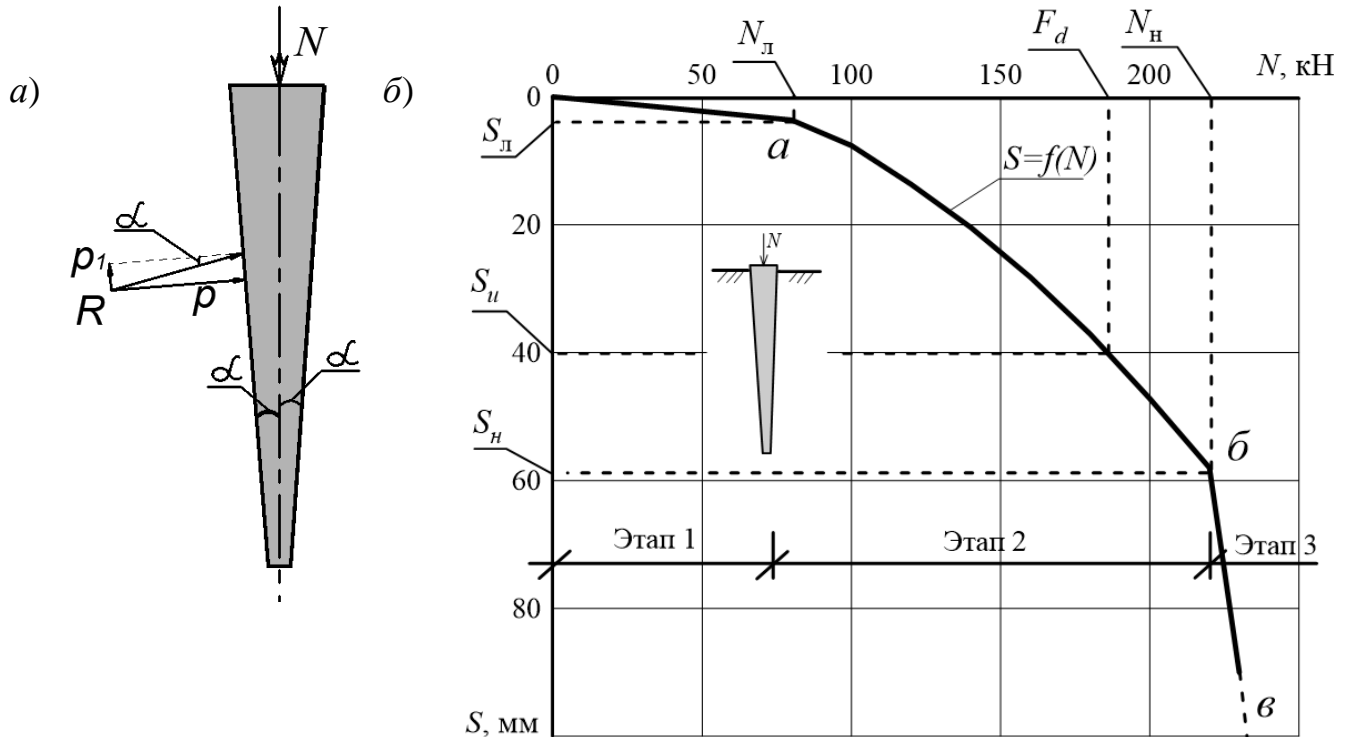


Рисунок 4.2 – Нагружение буроналивной конической сваи в глинистом грунте:

a – схема действующих усилий на сваю (обозначения приняты по Ф. К. Лапшину и др., 1979); b – зависимость осадки сваи от внешней нагрузки $S = f(N)$; N_{II} – внешняя нагрузка при завершении первого этапа нагружения сваи; N_H – тоже второго этапа нагружения сваи; R – реакция основания (расчетное сопротивление грунта); p – нормальная составляющая реакции к боковой поверхности (границы); p_1 – составляющая реакции параллельной к боковой поверхности (границы) сваи; α – угол наклона боковой грани сваи к вертикали

Для определения несущей способности F_d буроналивных конических свай воспользуемся методом Ф. К. Лапшина и др. [29-31], который наиболее близко отвечает условиям работы таких свай. Метод может учитывать обжатие сваи грунтом, которое появляется при нагнетании бетонной смеси в скважину и поддерживается при ее опрессовке. Согласно предложенному методу несущая способность набивной конической сваи F_d (по Лапшину Ф. К. и др.) вычисляется по формуле:

$$F_d = F \cos a [p (\operatorname{tg} a + \operatorname{tg} \varphi) + c], \quad (4.1)$$

где, F – площадь боковой поверхности сваи, м^2 ; 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, кПа.

Для оценки работы грунта и определения несущей способности буринъекционной конической сваи F_d в формулу (4.1) предлагается внести коррективы. Заменяем давление p на параметр $\sigma_{\text{обж}}$ – нормальное напряжение обжатия буринъекционной сваи. Вопросами оценки параметра $\sigma_{\text{обж}}$ занимался Р. В. Шалгинов и др. (2008–2010) для инъекционных свай [96]. Наличие параметра $\sigma_{\text{обж}}$ в грунте обусловлено действием давления нагнетания (инъекции) p_n мелкозернистого бетона в скважину при устройстве инъекционной сваи, которое составляет обычно для глинистого грунта $p_n = 500\text{--}900$ кПа [56]. После окончания процесса нагнетания (инъекции) бетона происходит снижение параметра $\sigma_{\text{обж}}$ ($\sigma_{\text{обж}} = p_n$) до значений порядка $\sigma_{\text{обж}} = 60\text{--}100$ кПа [54, 56] за счет уменьшения пористости глинистого грунта при его боковом уплотнении вдоль стенок скважины. Значение $\sigma_{\text{обж}}$ можно вычислить по формуле:

$$\sigma_{\text{обж}} = \sigma_{\text{ост}} + \sigma_0, \quad (4.2)$$

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 релаксации. Величина остаточного напряжения $\sigma_{\text{ост}}$ для глинистых грунтов установлена экспериментально и составляет порядка $\sigma_{\text{ост}} = 30\text{--}50$ кПа (Петухов А.А., 2006. Диссерт. канд. техн. наук) [54]. Меньшие значения $\sigma_{\text{ост}}$ принимаются для текучепластичных глинистых грунтов.

Горизонтальные напряжения от собственного веса грунта σ_0 вычисляются по формуле:

$$\sigma_0 = \xi \cdot \sigma_{zg}, \quad (4.3)$$

где ξ – коэффициент бокового давления грунта, принимаемый равным для супесей 0,3–0,5, а для глин и суглинков – 0,1–0,5 (Н. А. Цытович, 1963); σ_{zg} – вертикальное напряжение от собственного веса грунта, кПа.

Для определения несущей способности F_d буроинъекционной конической сваи предлагается 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 [57, 58]:

$$\varphi_{\text{упл}} = K_\varphi \cdot \varphi; \quad (4.4a)$$

$$c_{\text{упл}} = K_c \cdot c, \quad (4.4б)$$

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 свай; c , φ – соответственно удельное сцепление (кПа) и угол внутреннего трения (град) глинистого грунта естественного сложения;

K_φ , K_c – безразмерные коэффициенты, принимаемые по таблице 1.

Таблица 4.1. Значения коэффициентов K_ϕ , K_c для определения прочностных характеристик уплотненных глинистых грунтов вокруг ствола инъекционных свай после их опрессовки (по данным А. И. Полищука и И. В. Семенова, 2019 г.)

п/п	Наименование глинистого грунта	Значение безразмерных коэффициентов	
		K_ϕ	K_c
1	Супесь пластичная ($1 \geq I_L \geq 0$)	1,04...1,07	1,05...1,15
2	Суглинки, глины мягкопластичные и тугопластичные ($0,25 \leq I_L \leq 0,75$)	1,02...1,06	1,20...1,35

В формулу (4.1) введем также поправочный коэффициент k (табл. 4.2). Необходимость его использования обусловлена корректировкой результатов численных и аналитических расчетов несущей способности F_d рассматриваемых свай. Расчеты были выполнены для буроинъекционных конических свай с различными геометрическими параметрами, а также для глинистых грунтов различного состояния.

С учетом вышеизложенного несущую способность F_d буроинъекционных конических свай в глинистом грунте предлагается определять по формуле:

$$F_d = k A_i [\sigma_{\text{обж}} (\text{tg } \varphi_{\text{унл}} + \text{tg } \alpha) + c_{\text{унл}}] \cos \alpha, \quad (4.5)$$

где k – поправочный коэффициент учитывающий работу буроинъекционной конической сваи в глинистом грунте, принимаемый по табл. 2; A_i – площадь боковой поверхности сваи, м²; $\sigma_{\text{обж}}$, α – то же, что и в формулах (4.1) и (4.2).

Таблица 4.2 – Значения поправочного коэффициента k для буроинъекционных конических свай в глинистом грунте

Глинистые грунты вокруг ствола сваи	Параметр $D_{oz} / D_{нк}$	Коэффициент k , д. ед. при длине свай (м) равной		
		3	5	8
Супесь пластичная ($1 \geq I_L \geq 0$)	1,0	1,29	1,15	1,03
	2,3	1,28	1,04	0,94
	3	1,26	0,96	0,91
Суглинки и глины мягкопластичные ($0,25 \leq I_L \leq 0,75$)	1,0	1,27	1,12	1,02
	2,3	1,26	1,02	0,94
	3	1,23	0,96	0,91

Примечание: промежуточные значения коэффициента k устанавливаются интерполяцией.

Для оценки достоверности результатов расчета несущей способности F_d буроинъекционных конических свай по предлагаемой формуле (4.5) выполнено их сопоставление с данными, полученными расчетом, численно и экспериментально для буроинъекционных цилиндрических свай. Полевые испытания буроинъекционных свай статической нагрузкой проводились на строительной площадке в г. Краснодаре сложенной глинистыми грунтами (преимущественно суглинками). Предварительно на рассматриваемой площадке были проведены инженерно-геологические изыскания в соответствии с требованиями нормативных документов (СП 47.13330.2016) (рис. 4.3). В процессе изысканий отбирались пробы и монолиты грунтов для оценки сложения строительной площадки и определения физико-механических характеристик грунтов (ГОСТ 5180-2015 и ГОСТ 20522-2012). Данные о физических прочностных и деформационных характеристиках приведены в таблице 4.3.



Рисунок 4.3 – Инженерно-геологические изыскания на площадке проведения полевых испытаний буроинъекционных свай

Испытание буроинъекционных свай вертикальной статической вдавливающей нагрузкой выполнялось в соответствии с ГОСТ 5686-2012 (Грунты. Методы полевых испытаний сваями). Схема посадки буроинъекционной цилиндрической сваи на геологический разрез представлена на рисунке 4.4. Статическая нагрузка при испытании свай передавалась при помощи гидравлического домкрата грузоподъемностью 1000 кН (100 тс). Давление на домкрате создавалось при помощи маслонасосной станции НСР-400 и фиксировалось по манометру с ценой деления 5 атмосфер.

Измерение величины вертикального перемещения свай от нагрузки производилось двумя прогибомерами конструкции ПАО-6 с точностью отсчета 0,01 мм. Прогибомеры крепились к неподвижной реперной системе, устроенной вблизи сваи. На каждой ступени нагружения сваи отсчеты по прогибомерам снимались в

следующей последовательности: нулевой отсчет – сразу после приложения нагрузки, затем последовательно в течение первого часа через каждые 15 минут и далее через 30 минут до затухания перемещения сваи. Общий вид установки для проведения полевых испытаний натуральных буринъекционных цилиндрических свай приведен на рисунке 4.5.

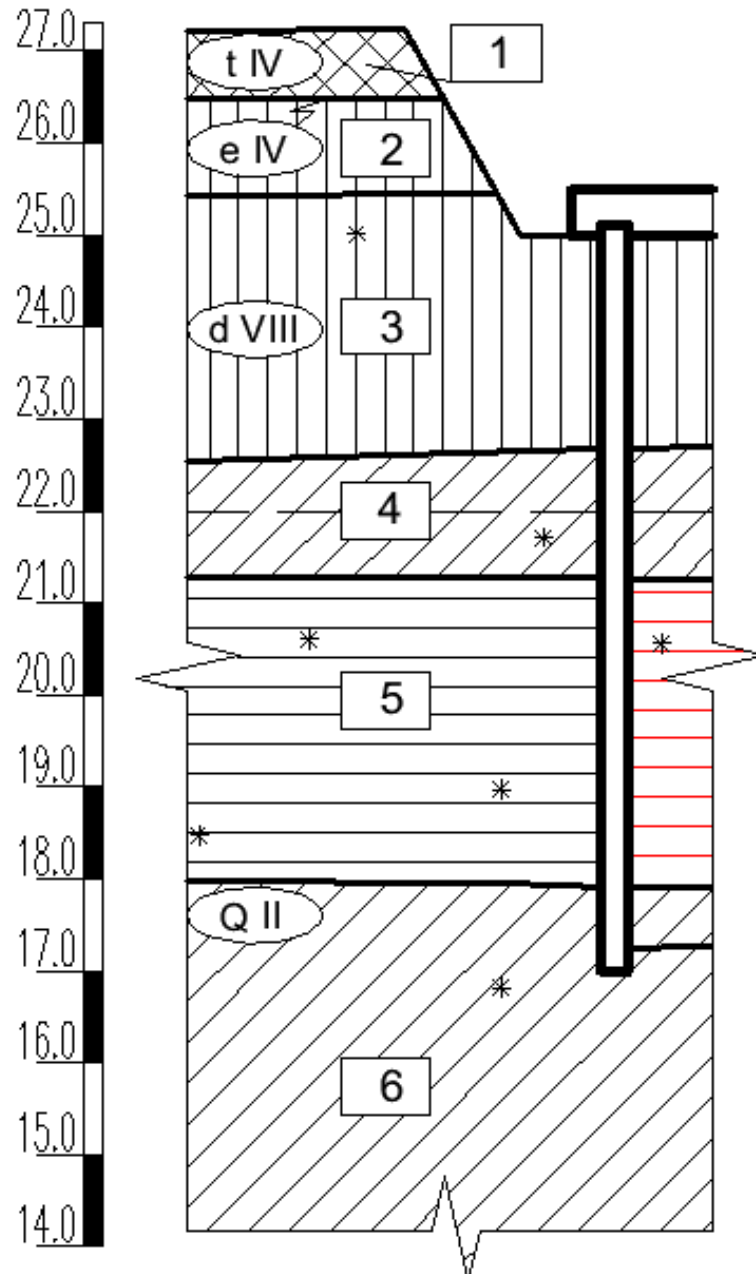


Рисунок 4.4 – Инженерно-геологический разрез площадки проведения натурных испытаний: 1 – почва современная, суглинистая, высокопористая; 2 – суглинок полутвердый; 3 – суглинок полутвердый; 4 – суглинок полутвердый; 5 – глина полутвердая; 6 – суглинок тугопластичный

Таблица 4.3 – Нормативные и расчетные характеристики физико-механических свойств грунтов

Номер ИГЭ	Наименование инженерно-геологических элементов (ИГЭ) по ГОСТ 25100-2011	Удельный вес грунта природной влажности, кН/м ³			Удельное сцепление, кПа			Угол внутреннего трения, град			Модуль деформации, МПа	Категория грунтов по сейсмичности
		γ_n	γ_I	γ_{II}	C_n	C_I	C_{II}	φ_n	φ_I	φ_{II}		
Класс природных дисперсных грунтов четвертичного возраста Группа - связные Подгруппа - осадочные Тип - минеральные (полиминеральные) Вид - глинистые												
1	Почва современная, суглинистая, высокопористая	17.5	17.3	17.4	—	—	—	—	—	—	—	II
2	Суглинок полутвердый, непросадочный	17.6	17.2	17.4	27	19	22	14	12	13	16.0	II
3	Суглинок полутвердый	20.6	20.0	20.3	28	18	22	25	23	24	22.0	II
4	Суглинок полутвердый	18.8	18.4	18.6	22	15	18	23	22	22	18.0	II
5	Глина полутвердая	19.3	19.0	19.1	29	18	22	21	18	19	19.0	II
6	Суглинок тугопластичный	19.6	19.5	19.5	28	18	22	20	17	18	14.0	II



Рисунок 4.5 – Общий вид установки для проведения полевых испытаний натуральных свай

Таблица 4.4 – Результаты оценки несущей способности буроинъекционных конических и цилиндрических натуральных свай

Параметры буроинъекционных свай	Метод оценки несущей способности буроинъекционной свай:				
	Конической		Цилиндрической		Цилиндрической по эксперименту
	по формуле (4.5)	ПК Midas <i>GTS NX</i>	по формуле (4.5)	ПК Midas <i>GTS NX</i>	
Объем бетона тела свай V , м ³ , при длине 8 м	0,79	0,79	0,77	0,77	0,77
Параметр $D_{ог} / D_{нк}$ для буроинъекционных свай	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

Сопоставление результатов исследований (табл. 4.4) показало, что в рассматриваемых грунтовых условиях наименьшее значение несущей способности F_d имеет буроинъекционная цилиндрическая свая ($F_d = 973$ кН) длиной 8 м, которое устанавливалось аналитически по формуле (4.5). Несущая способность F_d для конической свай длиной 8 м, установленная также аналитически по (4.5), на 15 – 20 % больше по сравнению с F_d для цилиндрической свай. Несущая способность F_d для этой свай установленная в ПК *Midas GTS NX* (1202 кН) на 3 % больше по сравнению с аналитическим методом ее определения. Наибольшая несущая способность F_d зафиксирована для буроинъекционной цилиндрической свай (1073 кН), значение которой было получено экспериментально.

Таким образом, полученное выражение (4.5) позволяет на этапе проектирования фундаментов зданий и сооружений определить несущую способность F_d для буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах. В качестве научной новизны следует отметить, что метод расчета F_d базируется на использовании запатентованного конструктивного решения буроинъекционной конической сваи; он учитывает данные нагружения сваи внешней нагрузкой и изменения прочностных характеристик уплотненного глинистого грунта вокруг ее ствола на этапе ее устройства.

4.1.3. Рекомендации по расчету несущей способности буроинъекционной конической сваи

Определение несущей способности буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах предлагается определять в следующей последовательности:

1. Выполняется оценка конструктивного и объемно-планировочного решения здания (сооружения), устанавливаются нагрузки, действующие на фундамент;
2. Выполняется анализ грунтовых условий площадки строительства, выбирается несущий слой грунта;
3. Определяется отметка дна котлована и отметка заложения подошвы ростверка;
4. Выбирается тип и геометрические характеристики конической буроинъекционной сваи;
5. Подбирается способ устройства буроинъекционной конической сваи;
6. Вычисляем площадь боковой поверхности A_i буроинъекционной конической сваи соприкасающуюся с грунтом:

$$A_i = \pi \cdot L_i \cdot (D_{\text{нач}} + D_{\text{ок}}) \quad (4.8)$$

7. Согласно выбранным геометрическим параметрам (диаметров острия и оголовка сваи, а также ее длины) определяется угол наклона боковой поверхности сваи (α) к вертикали;

8. Вычисляем по формуле (4.2) значение напряжения обжатия $\sigma_{обж}$. Для этого определяем вертикальные напряжения σ_{zg} от собственного веса грунта

$$\sigma_{zg} = \gamma_i \cdot h_i; \quad (4.6)$$

9. Используя формулу (4.3), определяем горизонтальные напряжения σ_0 от собственного веса грунта в уровне оголовка сваи и его острия:

$$\sigma_{0i} = \xi_i \cdot \sigma_{zgi}; \quad (4.3)$$

10. Вычисляем среднее значение горизонтального напряжения в грунте $\sigma_{i,ср}$ от собственного веса на отметке середины ствола буронагнетательной конической сваи:

$$\sigma_{i,ср} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} \quad (4.7)$$

11. Определяем остаточное напряжение $\sigma_{ост}$ вдоль боковой поверхности буронагнетательной конической сваи;

12. Вычисляем по формуле (4.2) нормальное напряжение обжатия $\sigma_{обж}$ буронагнетательной конической сваи в глинистом грунте на отметке середины ее ствола:

$$\sigma_{обж} = \sigma_{ост} + \sigma_{0,ср}; \quad (4.2)$$

13. Вычисляем по формулам (4.4а) и (4.4б) прочностные характеристики глинистого грунта с учетом его уплотнения:

$$c_{упл} = K_c \cdot c; \quad (4.4a)$$

$$\varphi_{упл} = K_\varphi \cdot \varphi, \quad (4.4б)$$

14. Подбираем по таблице 4.2 значение поправочного коэффициента k .

15. Вычисляем значение несущей способности F_d буроинъекционной конической сваи:

$$F_d = k \sum A_i [\sigma_{\text{обж}} (tg \varphi_{\text{ynl}} + tg a) + c_{\text{ynl}}] \cos a. \quad (4.5)$$

4.1.4. Пример оценки несущей способности буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах

Требуется определить несущую способность F_d одиночной буроинъекционной конической сваи в глинистом грунте.

Исходные данные. Буроинъекционная коническая свая выполнена длиной 5,15 м; диаметр оголовка сваи $D_{\text{ог}} = 350$ мм, диаметр острия $D_{\text{ос}} = 130$ мм. Длина сваи в грунте составляет 5,0 м. Дно котлована устроено на отметке -1,2 м от поверхности планировки. Грунтовые условия представлены двумя инженерно-геологическими элементами. С поверхности до отметки - 0,8 м – насыпной слой. С отметки – 0,8 и до отметки – 7,1 м залегают мягкопластичный суглинок (ИГЭ-1), с отметки – 7,1 м и ниже – глина мягкопластичная (ИГЭ-2). Физико – механические характеристики грунтов следующие. Удельный вес насыпного грунта $\gamma_0 = 18,6$ кН/м³. Суглинок мягкопластичный (ИГЭ-1): удельный вес $\gamma_1 = 19,3$ кН/м³; угол внутреннего трения $\varphi = 18$ град; удельное сцепление $c = 28$ кПа; модуль общей деформации $E_0 = 18$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$. Глина мягкопластичная (ИГЭ-2): удельный вес $\gamma_1 = 18,0$ кН/м³; угол внутреннего трения $\varphi = 14$ град; удельное сцепление $c = 22$ кПа; модуль общей деформации $E_0 = 12$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$ (рис. 5).

Решение. В соответствии с рекомендациями (п. 4.1.3) выполняем расчет несущей способности F_d буроинъекционной конической сваи ведем в по формуле (4.5) в следующей последовательности:

1. В рассматриваемом случае п. 1 рекомендаций не выполняется, так как не рассматривается конструктивное решение здания.

8. Вычисляем по формуле (4.2) значение напряжения обжатия $\sigma_{обж}$. Для этого определяем вертикальные напряжения σ_{zg} от собственного веса грунта в уровне дна котлована σ_{zg1} и острия сваи σ_{zg2} :

$$\sigma_{zg1} = \gamma_0 \cdot h_0 + \gamma_1 \cdot h_2 = 18,6 \cdot 0,8 + 19,3 \cdot 0,4 = 27,0 \text{ кПа};$$

Аналогично определяем: $\sigma_{zg2} = 123,5 \text{ кПа}$;

9. Используя формулу (4.3), определяем горизонтальные напряжения σ_0 от собственного веса грунта в уровне дна котлована и острия сваи:

$$\sigma_{01} = \xi_1 \cdot \sigma_{zg1} = 0,6 \cdot 27,0 = 16,2 \text{ кПа};$$

По аналогии устанавливаем: $\sigma_{02} = 74,1 \text{ кПа}$

10. Вычисляем среднее значение горизонтального напряжения в грунте $\sigma_{i,ср}$ от собственного веса на отметке середины ствола буроинъекционной конической сваи. В рассматриваемой задаче, горизонтальное напряжение в грунте $\sigma_{0,ср}$ от его собственного веса на отметке середины ствола буроинъекционной конической сваи составит (рис. 4.6 б):

$$\sigma_{0,ср} = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{02}}{2} = \frac{16,2 + 74,1}{2} = 45,2 \text{ кПа}$$

11. Остаточное напряжение $\sigma_{ост}$ вдоль боковой поверхности буроинъекционной конической сваи (рис. 4.6 б) принимаем равным $\sigma_{ост} = 35 \text{ кПа}$.

12. Устанавливаем, согласно (4.2) нормальное напряжение обжатия $\sigma_{обж}$ буроинъекционной сваи в глинистом грунте на отметке середины ствола сваи которое составит (рис. 4.6 з):

$$\sigma_{обж} = \sigma_{ост} + \sigma_{0,ср} = 35 + 45,2 = 80,2 \text{ кПа};$$

13. Вычисляем прочностные характеристики глинистого грунта с учетом его уплотнения, используя формулы (4.4 а), (4.4 б) и данные таблицы 4.1:

$$c_{\text{упл}} = K_c \cdot c = 1,25 \cdot 28 = 35 \text{ кПа};$$

$$\varphi_{\text{упл}} = K_\varphi \cdot \varphi = 1,03 \cdot 18 = 19 \text{ град},$$

14. По данным таблицы 4.2 подбираем значение поправочного коэффициента k . Исходя из заданных геометрических параметров буроинъекционной конической сваи и грунтовых условий значение коэффициента k составит 1,14;

15. Вычисляем по формуле (4.5) несущую способность F_d : буроинъекционной конической сваи:

$$F_d = k \sum A_i [\sigma_{\text{обж}} (\text{tg } \varphi_{\text{упл}} + \text{tg } a) + c_{\text{упл}}] \cos a = 1,14 \cdot 3,77 [75,2 (\text{tg } 19 + \text{tg } 1,3) + 35] \cos 1,3 = 268,5 \text{ кН}$$

Таким образом, несущая способность F_d : буроинъекционной конической сваи длиной 5 м составит $F_d = 268,5 \text{ кН}$.

4.2. Внедрение результатов исследований в практику проектирования зданий и сооружений

Реализация результатов выполненных исследований была внедрена в практику строительства на следующих объектах:

- Строительство мачт освещения на объекте: «Спортивно-туристический комплекс «Горная карусель», центральный сектор, отм. +1000 - +1500 м, некоммерческого предприятия АО «Красная поляна» (поселок Эсто-Садок, Краснодарский край);

- Проектирование жилого дома на объекте «Многоэтажный жилой комплекс со встроенно-пристроенными помещениями общественного назначения по ул. Обрывная, 132/1, г. Краснодар», предприятия ООО «СевКавСейсмозащита».

При строительстве мачт освещения на объекте: «Спортивно-туристический комплекс «Горная карусель», центральный сектор, отм. +1000 - +1500м» расположенного в поселке Эсто-Садок, Краснодарского края (Приложение Б) первоначально были запроектированы свайные фундаменты из буронабивных свай. Однако для реализации данного решения требовалась организация целой сети подъездных путей способных пропустить тяжелую буровую технику и организовать нормальную подачу бетона. Развитие такой временной инфраструктуры в условиях горной местности требовало затрат значительного времени. В связи с этим принято решение устраивать фундаменты мачт опоры освещения, используя данные полученные соискателем при выполнении диссертационных исследований.

Геологическое строение площадки проектирования мачт представлено следующими инженерно-геологическими элементами:

ИГЭ-1. Техногенный грунт: представлен преимущественно щебенистым грунтом с суглинистым заполнителем полутвердым реже дресвяный грунт с суглинистым заполнителем, с включением глыб до 15–20%, с прослоями и линзами суглинка щебенистого, полутвердого, местами до мягкопластичного.

ИГЭ-2. Суглинок полутвердой (местами мягко и текучепластичной) консистенции заполнителем, с линзами и прослоями суглинка коричневого и коричнево-бурого, тугопластичной консистенции (местами мягко и текучепластичной) щебенистого. Обломки средние реже крупные, преимущественно неокатанные.

ИГЭ-3. Глыбовый грунт карманами с суглинистым заполнителем, с линзами щебенистого, реже дресвяного грунта с суглинистым заполнителем полутвердым. Глыбы размером до 10 м, в среднем 0-5-1,5 м. Обломочный материал преимущественно основного и среднего состава нормальнощелочного ряда, представлен лавами базальтовых, андезитовых и авгитовых (подушечная лава) порфириров.

ИГЭ-4. Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем легким песчаным бурым, полутвердым и с включениями средних и редких крупных глыб магматических (вулканических) пород (до 5-7 м) до 20-25%, с линзами и прослоями глыбового грунта, местами суглинок щебенистый. Обломочный материал преимущественно основного и среднего состава нормальнощелочного ряда, пред-

ставлен туфами и лавами базальтовых, андезитовых и авгитовых (подушечная лава) порфириров.

Физико-механические характеристики приведены в таблице 4.5.

Исходя из данных инженерно-геологических изысканий и основываясь на результатах полученных соискателем в ходе диссертационных исследований были запроектированы свайные фундаменты на буроинъекционных конических сваях. Всего было запроектировано 46 фундаментов под осветительные мачты, из которых 21 фундамент под мачты высотой 28 м и 25 под мачты высотой 35 м. Под каждый фундамент устраивалось от 6 до 9 буроинъекционных конических свай длиной от 5 до 7 м. Предложенное и реализованное техническое решение представлено на рисунке 4.8. Проект устройства свайных фундаментов из буроинъекционных конических свай реализован в 2019 г.

Таблица 4.5 – Физико-механические характеристики грунтов на площадке строительства фундаментов под мачты освещения

№ ИГЭ	Наименование	Мощность слоя, м	Плотность грунта ρ , г/см ³	Угол внутреннего трения φ , град	Удельное сцепление c , кПа
1	Техногенный грунт	0,5-0,7	2,03	19	14
2	Суглинок с включением дресвы	3,74-4,4	2,18	17	19
3	Глыбовый грунт карманам с суглинистым заполнителем	1,8-2,2	2,23	39	16
4	Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем	более 3	2,09	20	24



Рисунок 4.7 – Осветительная мачта высотой 35 м на свайном фундаменте из буринъекционных конических свай

При проектировании фундаментов жилого дома на объекте «Многоэтажный жилой комплекс со встроенно-пристроенными помещениями общественного назначения по ул. Обрывная, 132/1, г. Краснодар», предприятием ООО «Сев-КавСейсмозащита» были использованы результаты исследований соискателя (Приложение Б). При проектировании фундаментов ведение работ предполагалось в условиях, где применение тяжелой техники практически не реализуемо. Поэтому было принято решение использовать буринъекционные конические сваи. Так как несущий слой грунта имел незначительную мощность (5-8 м), поэтому принято решение использовать буринъекционные конические сваи. Дан-

Таблица 4.6 – Физико-механические характеристики грунтов на площадке строительства жилого дома (ул. Обрывная 132/1, г. Краснодар)

Показатели	Почвенно-растительный слой	ИГЭ-1. Суглинок тугопластичный, тяжелый пылеватый	ИГЭ-2. Глина текучепластичная, тяжелая
Мощность слоя, м	0,3	8	Не менее 15
Плотность грунта, ρ , г/см ³	1,68	1,78	1,89
Коэффициент пористости e , д. ед.	-	0,55	0,63
Плотность частиц грунта, ρ_s , г/см ³	-	2,73	2,54
Естественная влажность W , %	-	12	35
Число пластичности I_p , %	-	14	29
Показатель текучести I_L , д. ед.	-	0,34	0,7
Угол внутреннего трения φ , град.	-	24	18
Удельное сцепление грунта c , кПа	-	22	12
Модуль деформации грунтов E , МПа	-	11	8
Коэффициент Пуассона μ	-	0,34	0,32

На рассматриваемой площадке под жилое здание (Литер Б) были запроектированы свайные фундаменты из буроинъекционных конических свай. Жилое здание по конструктивной схеме запроектировано каркасного типа высотой 48 м. Здание прямоугольной формы в плане, без подвала и чердачной крыши. В составе свайных фундаментов предусмотрено 567 буроинъекционных конических свай длиной 7 м. При этом несущая способность свай обеспечивалась преимущественно за счет сопротивления грунта по боковой поверхности (ИГЭ-1) Проект планируется к реализации в течение 2022 г.

Таким образом, предложенное конструктивное решение по устройству свайных фундаментов из буроинъекционных конических свай для жилого дома

(Литр Б) в г. Краснодаре позволило запроектировать фундамент в сложных грунтовых условиях.

4.3. Направления дальнейших исследований по оценке работы и совершенствованию методов проектирования буроинъекционных конических свай

Проанализировав и обобщив результаты выполненных исследований работы одиночных буроинъекционных конических свай в однородных глинистых грунтах можно определить следующие направления дальнейших исследований:

1. Разработка методов расчета осадок фундаментов из буроинъекционных конических свай для условий нового строительства (рис. 4.9, *а*) и реконструкции зданий (рис. 4.9, *б*);

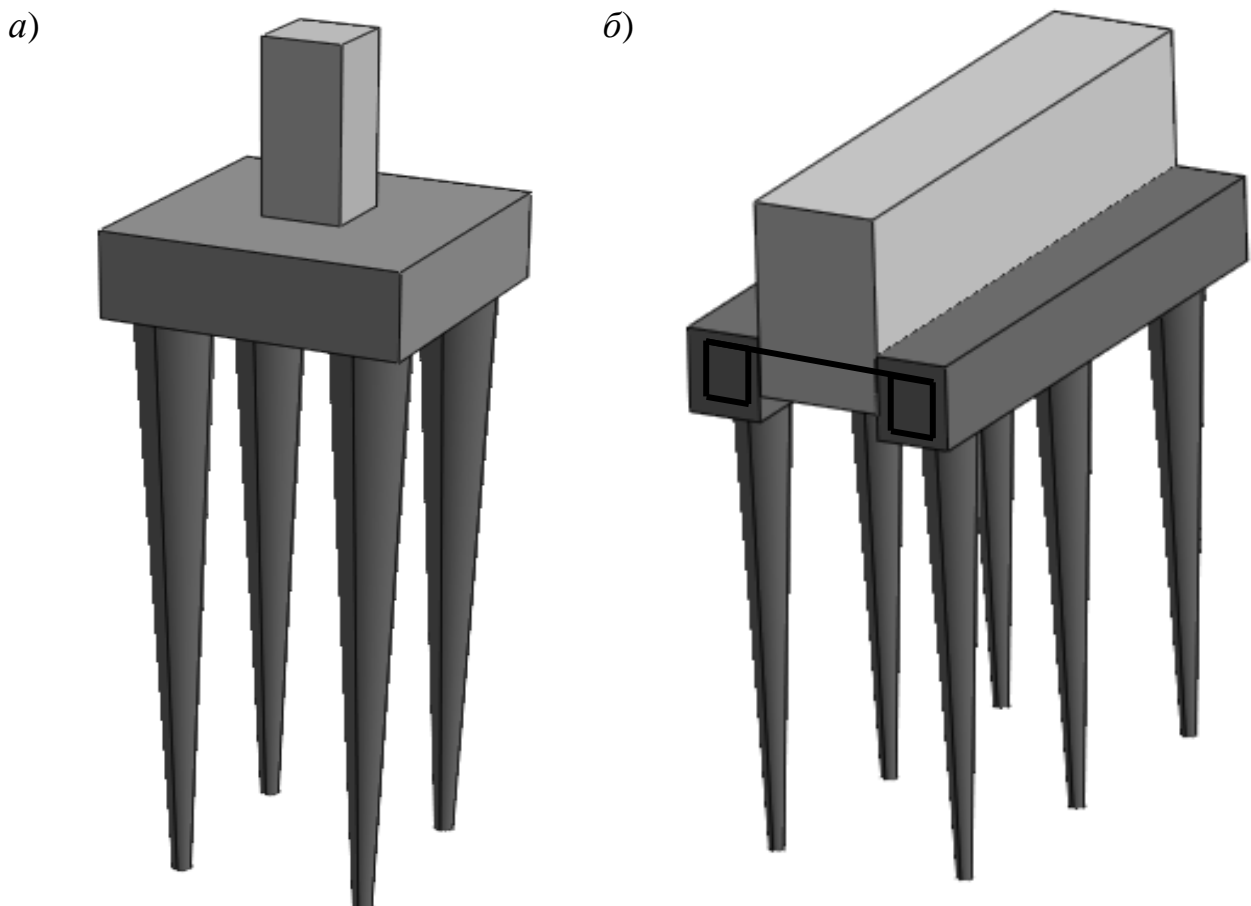


Рисунок 4.9 – Пример применения буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах:
а – для условий нового строительства; *б* – для условий реконструкции зданий и сооружений

2. Разработка методов расчета, конструирования фундаментов реконструируемых зданий с использованием буроинъекционных конических свай;
3. Расчет свайного фундамента из буроинъекционных конических свай на совместное действие вертикальных, горизонтальных и моментных нагрузок.

4.4. Выводы по главе 4

1. По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработан метод расчета несущей способности F_d буроинъекционных конических свай длиной от 3 до 8 м в глинистых грунтах, основанный на использовании данных об их нагружении внешней нагрузкой (N) и прочностных характеристиках уплотненных глинистых грунтов ($c_{упл}$, $\phi_{упл}$) вокруг ствола конических свай;
2. Для оценки достоверности результатов расчета несущей способности F_d буроинъекционных конических свай по предлагаемому методу [формула (4.5)] было выполнено их сопоставление с данными, полученными расчетом, численно и экспериментально для буроинъекционных цилиндрических свай в глинистых грунтах. Было установлено, что несущая способность F_d для буроинъекционных конических свай длиной 8 м, полученная расчетом ($F_d = 1166\text{--}1202$ кН) на 15–20 % больше по сравнению с данными для цилиндрических свай, установленным также расчетом ($F_d = 973\text{--}996$ кН). Данные о несущей способности F_d буроинъекционных цилиндрических свай, установленные экспериментально, на 8–10 % больше расчетных значений несущей способности F_d таких свай.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По данным аналитических, численных и экспериментальных исследований разработано эффективное конструктивное решение буроинъекционной конической сваи 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 сваи 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 раз.

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.

Список литературы

1. Барвашов, В. А. Методы оценки несущей способности свай при действии вертикальной нагрузки / В. А. Барвашов, Н. Б. Экимян, Э. Т. Аршба. – М. : ВНИИИС, 1985. – 69 с.
2. Бахолдин, Б. В. Исследование несущей способности пирамидальных свай / Б. В. Бахолдин, И. Т. Игонькин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1978, № 3. – С. 27–31.
3. Бахолдин, Б. В. К вопросу о сопротивлении грунта по боковой поверхности свай / Б. В. Бахолдин, Н. Т. Игонькин // Основания и фундаменты, подземные сооружения. – М. : Стройиздат. 1968. – С. 53–59.
4. Беспалов, А. Е. Напряженно-деформированное состояние оснований свайных фундаментов большой площади: дисс. ... канд. тех. наук: 05.23.02/ Беспалов алексей Евгеньевич. – М., 2009. – 173 с.
5. Бондарик, Г. К. Полевые методы инженерно-геологических исследований / Г. К. Бондарик, И. С. Комаров, В. И. Ферронский. – М. : Изд-во «Недра», 1967.
6. Бровин, С. В. Особенности работы буроинъекционных свай усиления в массиве слабых грунтов : автореф. дисс. канд. тех. наук: 05.23.02 / Бровин Сергей Владимирович. – СПб. : СПбГАСУ, 1994. – 22 с.
7. Вертынский, О. С. Определение несущей способности набивных конических свай / О.С. Вертынский // Вестник СГТУ. Архитектура и строительство. – 2006. – № 4 (16). – С. 77 – 81.
8. Владимиров, В. С. Уравнения математической физики / В. С. Владимиров, В. В. Жаринов. – М. : Физматлит, 2004. – 400 с.
9. Волков, В. Н. К вопросу разделения сопротивления сваи по острию и боковой поверхности / В. Н. Волков, И. В. Финаев // Основания и фундаменты в сложных инженерно-геологических условиях : тр. КХТИ им. Кирова. – Казань, 1978. – Вып. 2. – С. 40–47.

10. Глухов, В. С. Экономическое обоснование применения пирамидальных свай на слабых грунтах в фундаментах под колонны В. С. Глухов, О. В. Хрянина, А. А. Фабрикин // Вопросы планировки и застройки городов : материалы XXXV Всерос., XX Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во Пенз. госуд. ун-та арх-ры и строит-ва, 2013. – С. 136–139. – ISBN 978-5-9282-0598-0.
11. Готман, А. Л. Расчет свай и свайных фундаментов на горизонтальную нагрузку: Учеб. пособие. – М.: Издательство АСВ, 2020. – 212 с.
12. Готман, А. Л. Свайные фундаменты – эффективно развивающиеся направление в фундаментостроении / А. Л. Готман // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020. – № 3. – С. 2–10.
13. Готман, А. Л. Исследование работы пирамидальных штампоабивных свай на действие вертикальной нагрузки и их расчет / А. Л. Готман // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 10 (682). – С. 13–24.
14. Готман, А. Л. Определение несущей способности свай в выштампованном ложе / А. Л. Готман, Я. Ш. Зиязов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1984. – № 2. – С. 25–29.
15. Готман, А. Л. Сваи и свайные фундаменты. Избранные труды : Монография / А. Л. Готман. – Уфа, 2015. – 384 с.
16. Далматов, Б. И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б. И. Далматов, Ф. К. Лапшин, Ю. В. Россохин; под ред. Б. И. Далматова – Л. : Стройиздат, 1975. – 240 с.
17. Джантимиров, Х. А. Новейшие геотехнические технологии, конструкции и материалы / Х. А. Джантимиров, С. А. Рытов, Б. Э. Юдович // НИИОСП - 70 лет. Труды института. – М., 2001.
18. Джантимиров, Х. А. Разработка конструкции и методов расчета буронабивных свай НИИОСП им. Н. М. Герсеева : автореф. дисс. канд. тех. наук. / Джантимиров, Х. А. – М., 1986. – 18 с.

19. Дорошкевич, Н. М. Инженерные методы расчета свайных фундаментов при различных схемах их нагружения / Н. М. Дорошкевич, В. В. Знаменский, В. И. Кудинов // Вестн. МГСУ. – 2006. – № 1. – С. 119–132.
20. Друккер, Д. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование / Д. Друккер, Б. Прагер // Определяющие законы механики грунтов / под ред. Николаевского. – М., 1975. – С. 166–167.
21. Егоров, А. И. Опыт проектирования и строительства фундаментов из буроинъекционных свай / А. И. Егоров, Л. Б. Львович, Н. Р. Марочнин // Механика грунтов, основания и фундаменты. – М., 1982. – С. 14–16.
22. Забивные пирамидальные сваи в сельском строительстве // Инфо-мац. листок № 106–76. – Львовский ЦНТИ. – 1976.
23. Зарецкий, Ю. К. Расчет буронабивных свай по предельным состояниям / Ю. К. Зарецкий, М. И. Карабаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1985. – № 5. – С. 12–15.
24. Инструкция по устройству анкерных свай титан. Новые пути в анкерной технике. Проектирование и расчет // Frieder. Ischebeck GmbH. – 2013. – 23 с.
25. Клейнер, И. М. Метод прессиометрии для прогнозирования несущей способности буроинъекционных свай : диссер. ... канд. тех. наук / Клейнер И. М. – Минск, 1986. – 155 с.
26. Купчикова, Н. В. Предложения по дополнению классификации конструкций готовых и набивных свай с уширениями сверху и наклонными боковыми сваями / Н. В. Купчикова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал. – Астрахань : ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2015. – № 1 (11). – С. 25–35.
27. Конюшков В. В. Несущая способность буроинъекционных свай на вертикальную и горизонтальную нагрузки с учетом технологии их изготовления : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.02 / Конюшков Владимир Викторович. – СПб., 2007. – 217 с.

28. Конюшков, В. В. Оценка несущей способности буронабивных свай / В. В. Конюшков, В. М. Улицкий // Вестник гражданских инженеров Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. – СПб.: СПбГАСУ, 2007. – С. 52–57.
29. Лапшин, Ф. К. О закономерности изменения сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивных свай / Ф. К. Лапшин // Вопросы проектирования оснований и фундаментов зданий и сооружений : II межвуз. сб. – Куйбышев : КПИ, 1975. – С. 59–63.
30. Лапшин, Ф. К. Расчет свай по предельным состояниям. – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 1979. – 152 с.
31. Лапшин, Ф. К. Расчет оснований одиночных свай на вертикальную нагрузку: Дисс...д-ра техн. наук. – Саратов, 1988. – 469 с.
32. Луга, А. А. К нормам расчётных сопротивлений свай по грунту / А. А. Луга. – М. : Транспорт, 1965. – С. 52–57.
33. Малышев, М. В. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах) : учеб. пособие / М. В. Малышев, Г. Г. Болдырев – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. – 328 с.
34. Мангушев, Р. А. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии / Р. А. Мангушев, А. Л. Готман, В. В. Знаменский, А. Б. Пономарев. – М. : Изд-во АСВ, 2018. – 320 с.
35. Мангушев, Р. А. Об определении несущей способности буронабивных и буронабивных свай / Р. А. Мангушев, А. В. Кошман // Материалы 54-ой науч. конф. – СПб. : СПбГАСУ, 1997. – С. 22 – 23.
36. Мангушев, Р. А. Современные свайные технологии : учеб. пособие / Р. А. Мангушев, А. В. Ершов, А. И. Осокин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во АСВ, 2010. – 240 с.
37. Мангушев, Р. А. К вопросу контроля качества изготовления и приемки буронабивных свай / Р. А. Мангушев, А. Б. Пономарев // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 87–109.

38. Мангушев, Р. А. Оценка и анализ несущей способности буронабивных свай и свай-баррет глубокого заложения для высотного здания на слабых грунтах по результатам расчетов и полевых испытаний / Р. А. Мангушев, Н. С. Никитина // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – М.: 2018. Т.14, – № 2. – С. 109–116.
39. Маслов, Л. Б. Численные методы механики : курс лекций / Л. Б. Маслов. – Иваново : Изд-во ИГЭУ, 2006. – 128 с.
40. Мурзенко, Ю. Н. Экспериментальные исследования раздельной оценки несущей способности тензосвай в просадочных грунтах / Ю. Н. Мурзенко, Г. М. Борликов, В. М. Илишкина // Исследования по механике грунтов, основаниям и фундаментам : межвуз. сб. Колмыцкого госуниверситета. – Элиста, 1978. – С. 24–36.
41. Никитенко, М. И. Буроинъекционные анкеры и сваи при возведении и реконструкции зданий и сооружений / М. И. Никитенко. – Минск : БНТУ, 2007. – 580 с.
42. Нуждин, Л. В. Численное моделирование свайных фундаментов в расчетно-аналитическом комплексе SCAD Office / Л. В. Нуждин, В. С. Михайлов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. Пермь: 2018, № 1. – С. 5–18.
43. Нуждин, М. Л. Экспериментальное подтверждение возможности создания в грунтовом массиве инъекционных тел установленной формы / М. Л. Нуждин, Л. В. Нуждин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 2019, № 10 (730). – С. 101–112.
44. Отчет ЗАО "ПКТИ" о результатах полевых испытаний буроинъекционных свай на статическую вдавливающую нагрузку. – СПб. : ПКТИ, 2005.
45. Отчет ООО «Проектно-изыскательская фирма «ГеоФундаментПроект»» о результатах полевых испытаний буроинъекционных свай на статическую вдавливающую нагрузку на объекте: «Кинотеатр ИМАКС по ул. Уральской 79/1 в г. Краснодаре». – Краснодар: ГеоФундаментПроект, 2010. – 16 с.

46. Отчет об инженерно геологических изысканиях выполненный ООО ПКФ «Изыскатель». – Краснодар: ООО ПКФ «Изыскатель», 2007. – 57 с.
47. Парамонов, В. Н. Несущая способность буровых свай в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга / В. Н. Парамонов // тр. Междунар. семинара по механике грунтов. – М., 2000. – С. 250–252.
48. Патент № RU 2327007 С1 Российская Федерация МПК E02D 5/34 (2006.01). Способ образования буроинъекционной сваи / И. К. Попсуенко; заявитель и патентообладатель И. К. Попсуенко; заявл. 30.11.2006; опубл. 20.06.2008, Бюл. № 17. – 3 с.
49. Патент № RU 2672698 С1 Российская Федерация МПК E02D 27/08 (2006.01). Устройство для изготовления буроинъекционной конической сваи / А. И. Полищук, И. В. Семёнов, Д. А. Чернявский; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет И.Т. Трубилина»; заявл. 16.11.2017; опубл. 19.11.2018, Бюл. № 32. – 6 с.
50. Патент № RU 2514261 С1 Российская Федерация МПК E02D 5/54 (2006.01). Буроинъекционная свая с локальными уширениями / Д. А. Чернявский, И. В. Семёнов, О. Ю. Ещенко; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет И. Т. Трубилина»; заявл. 15.11.2012; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12. – 6 с.
51. Патент № RU 2524077 С1 Российская Федерация МПК E02D 5/46 (2006.01). Буроинъекционная свая с наклонными локальными уширениями / Д. А. Чернявский, И. В. Семёнов, О. Ю. Ещенко; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет»; заявл. 10.01.2013; опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21. – 6 с.
52. Патент № RU 2452815 С2 Российская Федерация МПК E02D 5/54 (2006.01). Мультикорневой грунтовый анкер / О. Ю. Ещенко, Д. А. Чернявский; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет»; заявл. 30.08.2010; опубл. 10.06.2012, Бюл. № 7. – 8 с.

53. Патент № RU 2425924 С1 Российская Федерация МПК E02D 5/54 (2006.01), Анкерная свая / О. Ю. Ещенко, Д. А. Чернявский; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет»; заявл. 11.05.2010; опубл. 11.08.2011, Бюл. № 22. – 8 с.
54. Петухов, А.А. Совершенствование способа устройства инъекционных свай в глинистых грунтах для условий реконструкции зданий [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук. / А. А. Петухов. – Томск, 2006. – 23 с.
55. Полищук, А. И. Усиление фундаментов реконструируемых зданий в г. Томске с использованием инъекционных свай / А. И. Полищук, А. А. Петухов // Межвузовский темат. сб. тр. СПбГАСУ. – СПб. : СПбГАСУ, 2007. – С. 162–171.
56. Полищук, А. И. Оценка несущей способности свай в глинистых грунтах с помощью ПК PLAXIS 3D Foundation [Текст] / А. И. Полищук, Д. Г. Самарин, А. А. Филиппович // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 3. – С. 351–359.
57. Полищук, А.И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий / А. И. Полищук. – 3-е изд., доп. – Нортэмптон STT: Томск : STT, 2007. – 476 с.
58. Полищук, А. И. Инженерный метод расчета осадки инъекционной сваи в глинистом грунте / А. И. Полищук, И. В. Семёнов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2019. – № 5. – С. 23–28.
59. Пономарев, А. Б. Основы исследований и расчета фундаментов из полых конических свай / А. Б. Пономарев // Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1999. – 166 с.
60. Пономарев, А. Б. О работе пустотелых конических свай / А. Б. Пономарев, Б. С. Юшков // Современные проблемы свайного фундаментостроения. Тез.докл. II Всесоюз. конф. Пермь, 1988. – С. 146–147.
61. Пономарев, А. Б. Взаимодействие полых конических свай с окружающим грунтом. : автореф. дисс. ... канд. тех. наук / Пономарев А. Б. – Пермь, 1991. – 16 с.

62. Пономарев, А. Б. Верификация результатов численного и аналитического расчета осадки одиночной сваи на аргиллитоподобных глинах / А. Б. Пономарев, Е. Н. Сычкина // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 2. – С. 11–13.
63. Пономарев, А. Б. К вопросу определения несущей способности свай на заторфованных территориях / А. Б. Пономарев, Д. Н. Сурсанов, Е. О. Ержаковский // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 2018, №3. –С. 2–6.
64. Применение. Возможности. Midas GTS [Электронный ресурс], 2013. – Режим доступа : <http://midasit.ru/products/products.asp?strCate=midasGTS>, свободный.
65. Применение пирамидальных свай с повышенным армированием и сборным низким ростверком // Информ. листок № 229–76. – Воронежский ЦНТИ. – 1975.
66. Применение прогрессивных конструкций фундаментов для районов с высокой сейсмичностью из коротких пирамидальных свай // Информ. листок № 86–43. – Иркутский ЦНТИ. – 1986.
67. Прыгунов, М. А. Особенности проектирования буроинъекционных свай повышенной несущей способности / М. А. Прыгунов // Мат. Респ. конф. – Казань : КГАСА, 2002. – С. 36–40.
68. Прыгунов, М. А. Устойчивость буроинъекционных свай : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / М. А. Прыгунов. – Казань, 2004. – 136 с. – РГБ ОД, 61:04-5/3351
69. Пьянков, С. А. Свайные фундаменты : учеб. пособие / С. А. Пьянков. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 105 с.
70. Работников, А. И. Несущая способность буронабивных свай в лёссовых грунтах/ А. И. Работников, В. С. Корякин // Промышленное строительство и инженерные сооружения. Л. – 1968.

71. Работников, А. И. Опыт применения фундаментов из буронабивных свай в лессовых просадочных грунтах / А. И. Работников, Б. М. Кованев, А. Н. Нахмуров. – С . 89
72. Расчёт свайных гидротехнических сооружений / С. Н. Левачев [и др.] – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
73. Рекомендации по применению буроинъекционных свай. – М. : НИИОСП им. Н.М. Герсевича, 2002. – 19 с.
74. Рекомендации по применению буроинъекционных свай. – М. : НИИОСП им. Н. М. Герсевича, 1984 – 52 с.
75. Рекомендации по применению полых конических свай повышенной несущей способности. В развитие СНиП 2.02.03-85 А. А. Бартоломей, Б. В. Бахолдин, Б. С. Юшков, А. Б Пономарев, Л. В. Сосновских, Б. С. Юшков. // Минстрой РФ. НИИОСП., ПГТУ. – М ., 1995. – 27 с.
76. Рыбников, А. М. Экспериментальные исследования несущей способности буронабивных конических свай / А. М. Рыбников // Основания фундаменты и механика грунтов. – 1990. – № 2. – С. 48–52.
77. Рытов, С. А. Эффективные современные технологии устройства буроинъекционных свай и грунтовых инъекционных анкеров / С. А. Рытов // Журнал государственного учреждения Московской области «Мособлгосэкспертиза» «Информационный вестник». – 2007 – № 1 (16).
78. Рытов, С.А. Современные конструкции каркасов буроинъекционных свай / С. А. Рытов // Механизация строительства. – 2008 – № 5. – С. 28–34.
79. Самохвалов, М. А. Обзор существующих конструкций буроинъекционных анкерных свай / М. А. Самохвалов, А. В. Гейдт, А. А. Паронко // Вестник МГСУ. М.: 2019, Т. 14, вып. 12. – С. 1530–1554.
80. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. – М. : ФГУП ЦПП, 2006. – 46 с.
81. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 81 с.

82. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М. : ОАО ЦПП, 2016. – 162 с.
83. Ситников М. А., Шайтаров Л. Д. Некоторые итоги применения пирамидальных прямоугольных свай в Белоруссии. 1988. № 1. С.38–39.
84. Силкин, А. М. Основания и фундаменты / А. М. Силкин, Н. Н. Фролов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ВО «Агропромиздат», 1987. – 285 с.
85. СТО-00000000-0001-2008. Рекомендации по применению свай СФА. – М. : НИИОСП им. Н. М. Герсевича. – М.: 2008. – 48 с.
86. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной документации на объекте: «Многоэтажный жилой комплекс со встроенно-пристроенными помещениями общественного назначения по ул. Обрывная, 132/1, г. Краснодар». – Краснодар: ООО НТЦ «СевКавСейсмозащита», 2018. – 68 с.
87. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной документации на объекте: «г. Краснодар, ул. Трамвайная, д.5». – Краснодар: ИП Жилин А.А., 2018. – 52 с.
88. Сваи в гидротехническом строительстве – учеб. пособие / В. Г. Федоровский, С. Н. Левачев, С. В. Курило, Ю. М. Колесников. – М., 2003. – 68 с.
89. Хазин, В. И. Опыт применения коротких пирамидальных свай /В. И. Хазин. – М. : Оргтрансстрой, 1970. – 12 с.
90. Хрянина, О. В. К оценке эффективности пирамидальных свай / О. В. Хрянина, Н. В. Кошкина, А. С. Горынин // Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во Пенз. госуд. ун-та арх-ры и строит-ва, 2013. – С. 130–136.
91. Хрянина, О. В. Факторы, влияющие на несущую способность пирамидальных свай / О. В. Хрянина, А. А. Белый // Современные научные исследования и инновации. [Электронный ресурс] – 2015. – № 4. URL : <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/51430>.

92. Хрянина, О. В. Исследование зависимости несущей способности пирамидальной сваи от ее длины / О. В. Хрянина, А. С. Галов // Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во Пенз. госуд. ун-та арх-ры и строит-ва, 2013. – С. 126–130.

93. Хрянина, О. В., Кошкина Н. В., Горынин А. С. Зависимость несущей способности от уклона боковых граней пирамидальных свай / О. В. Хрянина, Н. В. Кошкина, А. С. Горынин // Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во Пенз. госуд. ун-та арх-ры и строит-ва, 2013. – С. 122–126.

94. Численные методы расчетов в практической геотехнике : сборник статей междунар. науч.-техн. конф.; СПбГАСУ. – СПб., 2012. – 398 с.

95. Шадунц, К. Ш. О взаимодействии боковой поверхности свай с окружающим их грунтом основания / К. Ш. Шадунц // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2006. – № 03(019). – С. 27 – 36. – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2006/03/pdf/03.pdf>.

96. Шалгинов, Р.В. Совершенствование метода расчета инъекционных свай в глинистых грунтах для фундаментов реконструируемых зданий : автореф. дис. ... канд. тех. наук / Р.В. Шалгинов. – Томск, 2010. – 22 с.

97. Abdul Karim Elsalfiti. A Thesis In The Department Of Building, Civil and Environmental Engineering / Abdul Karim Elsalfiti // Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science at Concordia University Montreal, Quebec, CANADA, November 2011.

98. Adejumo, T. W. Effects of Shape and Technology of Installation on the Bearing Capacity of Pile Foundations in Layered Soil. / T. W. Adejumo // Sch. J. Eng. Tech. – 2015. – № 3(2A). – P. 104–111.

99. Alka M. Shah and S. P. Dave. Axial Response of Tapered Bored Piles in Sand Using Plaxis 3d / M. Shah Alka and S. P. Dave // International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. – 2013. – Vol. II/ Issue III/. P. 26–27.
100. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1977) // Standard Specification for Highway Bridges. – Washington, DC. – 469 pp. – Revised 1992.
101. Armour, T. Micropile Design and Construction Guidelines and Implementation Manual / T. Armour and P. Groneck // Report №. FHWA-SA-97-070, December 1998.
102. Bruce, D. A. Drilled and Grouted Micropiles: State-of-Practice Review, volume 1: background, classifications, cost / D. A. Bruce, I. Juran // Report №. FHWA-RD-96-016, July 1997.
103. Bruce, D. A. A Review of Drilling and Grouting Methods for Existing Embankment Dams / D. A. Bruce // ASCE Specialty Conference on Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation, N.C. State University, Raleigh, N.C., April 25 – 28. – P. 803–819.
104. Bruce, D. A. High Capacity Micropiles – Basic Principals and Case Histories / D. A. Bruce, M. E. Bruce, R. P. Traylor // GeoEngineering for Underground Facilities : Proc. of the 3rd National Conference of the Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers. – Geotechnical Special Publication. – 1999. – №. 90. – Urbana-Champaign, IL, June 13–17. – P. 188–199.
105. Drucker D. C. and Prager, W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design / D. C. Drucker and W. Prager // Quarterly of Applied Mathematics. – 1952. – Vol. 10, №. 2. – P. 157–165.
106. D'Appolonia, E. and Hribar, J.A. Load Transfer in a Step-Taper pile / D'Appolonia, E. and J.A. Hribar // J. of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. – 1963. – Vol. 89, №. SM6. – P. 57–77.

107. Ghazavi, M. Analytical Solution for Interaction between Non-Uniform Piles / M. Ghazavi // 5th National Congress on Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad. – Mashhad, Iran, 2010. – Vol. 9.
108. Ghazavi, M. Bearing Capacity of Tapered and Step-tapered Piles Subjected to Axial Compressive Loading / M. Ghazavi // Proceedings of 7th International Conference On Coastal, Ports & Marine Structures. – K. N. Toosi University of Technology, Iran, 2006. – Vol. 6.
109. Horvath, J. S. A half century of trapped-pile usage at the Jon F. Kennedy International airport / J. S. Horvath, T. Trochalides // Proceeding: Fifth international conference on case histories in geotechnical engineering – New York, NY, April 13 – 17, 2004. № – 11.05. – P. 1–8.
110. Jain, M. P., Rastogi P. C. and Bhandari R. K. Comparative behavior of Tapered and Uniform Diameter Piles in Loose Sands / M. P. Jain, P. C. Rastogi and R. K. Bhandari // Indian Geotechnical Journal. – 1979. – Vol. 9. – P. 154–162.
111. Jin Qi Wei, Experimental investigation of tapered piles / Jin Qi Wei // The University of Western Ontario, London, 1998.
112. Koreck, H. W. Small diameter bored injection piles / H. W. Koreck // Ground Engineering. – 1978. – №. 11(4). – P. 14–29.
113. Ulhawy F. H. Limiting Tip and Side Resistance: Fack or Fallacy? / Ulhawy F. H. // Proceedings, Analysis and Design of Pile Foundations, ASCE. – 1984. – P. 80–98.
114. Kurian, N. P. Studies on the Behaviour of Axially loaded Tapered Piles by the Finite Element Method / N. P. Kurian // International Journal for numerical and analytical Methods in Geomechanics. – 1995. – Vol. 19, №. 12/ – P. 869–888.
115. Kodikara, J. K. and Moore I. D. Axial Response of Tapered Piles in Cohesive Frictional Ground / J. K. Kodikara and I. D. Moore // J. of Geotech. Engrg., ASCE, N.Y., NY, U.S.A. – 1993. – №. 119 (4). – P. 675–693.
116. Lindqvist, L. and Petaja, J. Experiences of tapered Friction Piles / L. Lindqvist and J. Petaja // Proceedings : tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 1981. – Vol. 2. – P. 759–766.

117. Lizzi, F. Root-pattern piles underpinning / F. Lizzi // Proc. symposium on bearing capacity of piles. – Roorkee, 1964.
118. Lizzi, F. The static restoration of monuments / F. Lizzi // Sager publisher. – Genova, 1982.
119. Monika De Vos, Valerie Whenham. Innovative design methods ingeotechnical engineering / Monika De Vos, Valerie Whenham // GeoTechNet – European Geotechnical Thematic Network. – 2010. – Part 2. – 13 p.
120. Manandhar, S. and Yasufuku, N. End Bearing Capacity of Tapered Piles in Sands using Cavity Expansion Theory / S. Manandhar and N. Yasufuku // Memoirs of the Faculty of Engineering. – Kyushu University. – 2011. – Vol. 71, №. 4.
121. Manandhar, S. and Suetsugu, D. Extended Model of Cavity Expansion Theory for Evaluating Skin Friction of tapered Piles in Sand / S. Manandhar and D. Suetsugu // The 7th Geo T, NCDOT, Cary, USA, 2013.
122. Meyerhof, G. G. Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations / G. G. Meyerhof // J. of the Geotech. Engrg. Div., ASCE, N.Y., NY, U.S.A. – 1976. – №. 102 (GT3). – P. 195–228.
123. M. Hesahm El Naggar. Experimental study of axial behaviour of tapered piles / M. Hesahm El Naggar // Canadian Geotechnical Journal. – Canada. – 1998. – Vol.35. –P. 641–654.
124. Nordlund, R. L. Bearing capacity of piles in cohesionless soils / R. L. Nordlund // Journal of the soil mechanics and foundation division. –1963. – Vol. 89, №. SM3. – P. 1–35.
125. Nauroy, J. F. and Le Tirant, P. Model Tests of Piles in Calcareous Sands / J. F. Nauroy and P. Le Tirant // Proceedings, Geotechnical Practice in Offshore Engineering. – 1983. – P. 1–35.
126. Ostermayer, H. and Scheele. Research on Ground Anchors in Non-Cohesive Soils / H. Ostermayer and Scheele // Revue Francaise de Geotechnique. – 1997. – P. 392–397.
127. Peck, Ralph B. A Study of the Comparative Behavior of Friction Piles / Peck, B. A Ralph // Highway Research Board. – 1958. – Vol. 36. – P. 1–72.

128. Poulos, H. G. and Sim, K. B. Engineered Piles to Improve Cyclic Load Capacity / H. G. Poulos, and K. B. Sim // *Marine Geotechnology*. – 1990. – Vol. 9. – P. 131–140.
129. Rajapakse R.5 – Pile Design in Clay Soils // *Pile Design and Construction Rules of Thumb*. – 2008. – P. 75–98.
130. Rajapakse R.2 – Pile Types // *Pile Design and Construction Rules of Thumb*. – 2008. – P. 15–35.
131. Robinsky, E. I. and Morrison, C. F. Sand Displacement and Compaction Around Model Friction Piles / E. I. Robinsky and C. F. Morrison // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1964. – Vol. 1, №. 2.
132. Robinsky, E. L, and Morrison, C. F. Sand Displacement and Compaction Around Model Friction Piles / E. I. Robinsky and C. F. Morrison // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1964. – Vol. 1, №. 2. –P. 81–93.
133. Robinsky, E. I., Sagar, W. L., and Morrison, C. F. Effect of Shape and Volume on the Capacity of Model Piles in Sand / E. I. Robinsky, W. L. Sagar and C. F. Morrison // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1964. – Vol. 1, №. 4. – P. 189–204.
134. Smolczyk, U. *Geotechnical Engineering Handbook* / U. Smolczyk // Volume 3: Elements and Structures, Germany, February 2003. – P. 646.
135. Tristan, J. S. Bearing capacity of tapered piles / J. S. Tristan // University of Calgary, Canada, 1998.
136. Van Impe, W. F. Deformation of deep foundation / W. F. Van Impe // *General Report X.ECSMFE*. – Florence, 1991. – P. 2638–2640.
137. Van Impe, W. F. Developments in pile design / W. F. Van Impe // *DFI Conference. Stressa*, 1991. – P. 2217–2234.
138. Vesic, A. S. Investigation of Bearing Capacity of Piles in Sands / A. S. Vesic // *Proceedings: North American Conference on Deep Foundations*. – Mexico City. –1964. – Vol. 1. – P. 197–224.

139. Zil'Berberg, S. D. and Sherstnev, A. D. Construction of Compaction Tapered Pile Foundations / S. D. Zil'Berberg and A. D. Sherstnev // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 1990. – Vol. 27, №. 3. – P. 96–101.

ПРИЛОЖЕНИЯ

к диссертационной работе Чернявского Д. А.

Приложение А

Лицензионное соглашение на пользование программным комплексом
«*MIDAS GTS NX*»

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

MIDAS FAMILY PROGRAM

End User License Agreement



MIDAS FAMILY PROGRAM

End User License Agreement

End User License Agreement for Using MIDAS Family Programs

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

1. License

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

2. Use of License

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

3. License Transfer

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

4. Copyright

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

5. Responsibility

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

6. Warranty

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

7. Term

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

8. Maintenance

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

9. Online Services

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

10. Governing Law

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

11. Acknowledgement

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

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

Signed by :

End User Signature

Name _____

on behalf of _____ [End User Company]

MIDAS IT Signature



Name Vitaly Terentjev

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

Dated : 12 . 02 . 2015



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

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

MIDAS FAMILY PROGRAM

End User License Certificate for Using MIDAS Family Programs

Product Title : *midas FEANX (BTS NX)*

Product No. : *RUENFAX000014*

No. of Users : *1*

Name of Group (User) : *ООО „ГЕОТЭК“*

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

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



Date presented 12.02.2015

Presented by Vitaly Terentyev
Authorized Representative (Name & Signature)



Приложение Б

Справки о внедрении результатов исследований



НАО «Красная поляна»
 354000, г. Сочи, Северная ул., 14А
 Тел/факс.: + 7 (862)243-91-10
 e-mail: info@karousel.ru, www.gorkygorod.ru

№ 21 от «12» 12 2018 г.

СПРАВКА

**о внедрении результатов исследований
 соискателя кафедры «Оснований и фундаментов»
 ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ
 Чернявского Дениса Алексеевича**

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертационной работы Чернявского Дениса Алексеевича, представленные на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в производственной деятельности НАО «Красная поляна» при реконструкции объекта: «Спортивно-туристический комплекс «Горная карусель», центральный сектор, отм. +1000 - +1500м» расположенного в пос. Эсто-садок, г. Сочи, Краснодарского края.

Личный вклад Чернявского Д.А. заключался в разработке рациональных конструктивных решений фундаментов осветительных мачт на буроинъекционных конических сваях.

Использование разработанных Чернявским Д.А. конструктивных решений позволило повысить надёжность и безопасность строительства объекта.

Руководитель дирекции
 по эксплуатации и реконструкции
 НАО «Красная поляна»



Р.Ю. Жиров

М.Ю. Голубков
m.golubkov@karousel.ru



**ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЦЕНТР «СЕВКАВСЕЙСМОЗАЩИТА»**

ОГРН 1082309004139 ИНН2309113170 КПП231001001
р/с 40702810200090001399 в КБ «Кубань Кредит» (ООО).
Адрес: 350020, г. Краснодар, ул. Одесская, 48, Литер А3,
помещение 22/15, тел/факс: (861) 210-16-52, 210-16-53.
E-mail: ntc.sksz@yandex.ru

Исх. № 771/01-1272 от «20» апреля 2020 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований
соискателя кафедры «Оснований и фундаментов» ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ
Чернявского Дениса Алексеевича

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертационной работы Чернявского Дениса Алексеевича, представленные на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в производственной деятельности ООО «Научно-технический центр «СЕВКАВСЕЙСМОЗАЩИТА» при проектировании объекта: «Многоэтажный жилой комплекс со встроенно-пристроенными помещениями общественного назначения по ул. Обрывная, 132/1, г. Краснодар».

Личный вклад Чернявского Д.А. заключался в разработке рациональных конструктивных решений фундаментов на буроинъекционных конических сваях.

Использование разработанных Чернявским Д.А. инновационных конструктивных решений с применением буроинъекционных конических свай позволило повысить надёжность и безопасность строительства объекта при одновременном значительном сокращении сроков строительства.

Директор
ООО «НТЦ «СЕВКАВСЕЙСМОЗАЩИТА»



Лукманов Т.А.