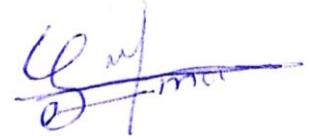


На правах рукописи



**Хегази Осама Мохаммед Махмуд**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СИЛ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ТРЕНИЯ ПО  
БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ СВАИ, ВЫЗВАННЫХ ОСАДКОЙ  
ОКРУЖАЮЩЕГО ГРУНТА**

Специальность: **2.1.2 – «Основания и фундаменты, подземные сооружения»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва-2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Знаменский Владимир Валерианович**

Официальные оппоненты: **Шашкин Алексей Георгиевич**  
Доктор геолого-минералогических наук,  
общество с ограниченной ответственностью  
«Институт строительного проектирования  
«Геореконструкция», генеральный директор

**Разводовский Дмитрий Евгеньевич**  
Кандидат технических наук,  
акционерное общество «Научно-  
исследовательский центр «Строительство»,  
Научно-исследовательский, проектно-  
изыскательский и конструкторско-  
технологический института оснований и  
подземных сооружений им. Н.М. Герсевича,  
заместитель директора

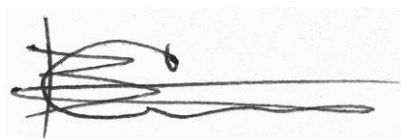
Ведущая организация федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Пензенский государственный  
университет архитектуры и строительства»

Защита состоится « 7 » июня 2023 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.339.05 (Д 212.138.14) созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, в Зале Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте <http://www.mgsu.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сидоров  
Виталий Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Слабые глинистые грунты распространены в Египте в средней и северной частях дельты реки Нил, где их мощность достигает 15 и более метров, а влажность составляет от 60% до 90%. Слабые глинистые грунты подстилаются песками крупными и средней крупности. Применение свай, прорезающих толщу слабой глины и передающих нагрузки на песчаные грунты, позволяет обеспечить несущую способность фундаментов возводимых на них зданий без превышения нормативных значений их осадок. Осложняющим моментом здесь является известное специалистам догружающее сваи негативное или отрицательное трение, которое возникает на их боковой поверхности при оседании слоя слабого грунта вокруг сваи, вызванное разными причинами, основной из которых является пригрузка насыпью дневной поверхности слабой толщи. В этом случае на участках, где величина оседания грунта превышает смещение (осадку) сваи, на ее поверхности возникает сила трения, направленная не вверх, как обычно, а вниз, которая суммируясь с внешней нагрузкой на сваю от сооружения может привести к потере сваей несущей способности или вызвать ее существенную дополнительную осадку, что необходимо учитывать при проектировании.

Изучение явления отрицательного трения, возникающего в результате проседания окружающего сваю слабого глинистого грунта - одна из старых-новых тем. Старых, потому что ее изучение началось в шестидесятые годы двадцатого века, а новой, как возобновляемой в условиях постоянного увеличения населения во всем мире, приведшего к неизбежности и необходимости использования площадей, сложенных слабыми глинистыми грунтами и поиску новых решений для снижения воздействия отрицательного бокового трения на поведение и несущую способность свайных фундаментов, которые являются наиболее распространенным типом фундаментов при строительстве на слабых грунтах.

Несмотря на «возраст» темы и на то, что в последние годы был проведен ряд исследований для изучения влияния отрицательного трения на сваю, многие факторы, определяющие степень этого влияния остаются неизученными, как, например соотношение модулей деформации грунта вдоль боковой поверхности сваи и под ее острием, сжимаемость ствола сваи, зависимость развития отрицательного трения от внешней нагрузки на сваю и т. п. Это обстоятельство говорит о необходимости проведения дальнейших всесторонних исследований по изучению влияния различных факторов на развитие и распределение сил отрицательного трения на боковой поверхности сваи в оседающем слабом глинистом грунте, разработки инженерной методики его учета при определении допустимой нагрузки на сваю и предложений по способам уменьшения его воздействия на сваю.

В связи с изложенным темой диссертации, посвященную изучению указанных вопросов, следует признать актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Экспериментальным и аналитическим исследованиям влияния развития сил отрицательного трения на боковых поверхностях свай, вызванных оседающим по тем или иным причинам грунтом, посвящено много отечественных и зарубежных работ (Terzaghi, Poulos и Mattes, Bjerrum и др., Walker and Dravall, Бахолдин Б. В., Григорян А. А., Арутюнов И. С., Leung et al., Габибов Ф. Г., Акопян А. Ф., Уткин В. С., Далматов Б. И., Россихин А. А., Фадеев А.Б., Пилягин А. В., Тер-Мартirosян З. Г., Знаменский В. В., Le Duong, Crawford C. B., Endo M. и др., Johannessen I. J., Lee C. J. и Chen C. R. и др.). Большинство из этих работ проводилось экспериментально на площадках, сложенных слабыми грунтами, пригруженными после погружения свай слоем насыпи, что и привело к их оседанию. Решались задачи, связанные с необходимостью оценки несущей способности свайных фундаментов в конкретных условиях строительной площадки. В целом проведенные эксперименты позволили получить информацию о механизме возникновения и развития сил отрицательного трения, а также об их количественной оценке, но для систематизации экспериментальных данных с целью разработки методики расчета несущей способности свай в оседающем грунте этого оказалось явно недостаточно. Наряду с полевыми натурными экспериментами, был также проведен ряд экспериментальных исследований возникновения и развития сил отрицательного трения в

лабораторных условиях на центрифуге, которые также проводились с целью решения той или иной конкретной задачи. Что касается аналитических исследований, то, как отметил Б.И. Далматов, «большое число факторов, влияющих на развитие отрицательного трения, а также характерная для слабых грунтов значительная неоднородность их сложения не благоприятствуют разработке «строгих» решений, доступных для практического использования. Поэтому попытки получить так называемые «строгие» решения не привели к желаемым результатам». Это было сказано в 1970 г., но с тех пор, в связи с развитием численных методов, появилась возможность всестороннего комплексного изучения вопроса развития сил отрицательного трения по боковым поверхностям свай в оседающих грунтах и разработки инженерного метода его учета при проектировании свайных фундаментов, чему и посвящена настоящая диссертационная работа.

**Цель диссертационной работы** – исследования закономерностей развития сил отрицательного трения на боковых поверхностях одиночных буровых свай, вызванных оседающим грунтом, и разработка инженерного метода их учета при определении допускаемой нагрузки на сваю.

**Задачи исследования:**

1. Разработка трехмерной численной модели с использованием ПК ABAQUS для изучения взаимодействия оседающих массивов водонасыщенных глинистых грунтов с одиночными вертикальными и наклонными сваями. Верификация разработанной численной модели.
2. Исследование численным методом зависимости положения «нулевой точки» и максимального осевого усилия в стволе сваи от геометрических параметров сваи, угла ее отклонения от вертикали, модуля упругости материала сваи, характеристик грунта вдоль ствола сваи и под ее нижним концом, нагрузки на голову сваю от сооружения, дополнительной нагрузки на поверхности грунта и условий сопряжения головы наклонной сваи с ростверком (свободная голова, заделка сваи в жесткий недеформируемый ростверк).
3. Исследование влияния щебеночных свай-дрен на развитие сил трения на боковой поверхности вертикальных железобетонных фундаментных свай в оседающем грунте.
4. Разработка модели искусственной нейронной сети и для прогнозирования положения «нулевой точки» (НТ) и значения максимальной осевой силы, возникающей в стволе свае.
5. Разработка инженерных методов расчета положения (НТ) и допускаемой нагрузки на сваю, работающую в условиях оседающего грунта.

**Объект исследований** – одиночные вертикальные, наклонные и конусные сваи, передающие нагрузку на основание в условиях оседающего грунтового массива.

**Предмет исследований** – влияние различных факторов на распределение сил отрицательного трения на боковой поверхности сваи, положение «нулевой точки» и максимальных осевых усилий в ее стволе, вызванных оседающим грунтом. Эффективность использования щебеночных свай-дрен для снижения сил отрицательного трения на боковой поверхности рабочих свай в слабом глинистом грунте.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- получены новые данные о механизме возникновения и распределения сил отрицательного трения на боковых поверхностях свай в оседающем грунтовом массиве;
- установлены закономерности влияния геометрических параметров сваи, модуля упругости ее материала, нагрузки на голову сваи от сооружения, характеристик грунта, интенсивности нагрузки на его поверхности и угла наклона сваи на положение «нулевой точки» и максимального осевого усилия в ее стволе;
- установлены наиболее значимые факторы, влияющие на развитие сил отрицательного трения на боковых поверхностях свай в оседающем грунте;
- установлен механизм влияния щебеночных свай-дрен на развитие сил отрицательного трения на боковой поверхности железобетонной фундаментной сваи, передающей нагрузку на основание в условиях оседающей грунтовой толщи.

**Теоретическая значимость работы состоит в:**

- установлены зависимости интенсивности и распределения сил отрицательного трения от способа сопряжения сваи с ростверком (свободная голова, жесткая заделка головы сваи в недеформируемый ростверк);
- установлена зависимость величины возникающего в наклонной свае изгибающего момента от ее диаметра, угла наклона и жесткости грунта под нижним концом сваи;
- разработаны модель искусственной нейронной сети и получено эмпирическое уравнение для прогнозирования положения «нулевой точки» и значения максимальной осевой силы, возникающей в стволе свае в оседающем грунте;
- выполнена оценка применения щебеночных и конусных свай для снижения влияния отрицательного бокового трения на несущую способность свай.

**Практическая значимость работы заключается в следующем:**

- в возможности использования результатов выполненных исследований для анализа последствий вертикальных планировок территорий, застроенных зданиями на свайных фундаментах;
- в возможности использовать полученные уравнения и инженерную методику при проектировании фундаментов на вертикальных и наклонных сваях;
- в возможности снижать интенсивность сил отрицательного трения за счет применения конусных свай или щебеночных свай-дрен;
- в возможности выполнять расчет глубины расположения «нулевой точки» и максимальной осевой силы, возникающей в теле сваи при оседании грунта, по разработанной компьютерной программе;
- в возможности использования результатов проведенных исследований и разработанных методик расчета для актуализации нормативных документов в области геотехники.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой выполненного исследования являлись труды отечественных и зарубежных ученых, технологов, проектировщиков и строителей в области геотехники. В выпускной работе применялись следующие методы:

- анализ литературных источников по тематике диссертационной работы;
- верификация разработанной трехмерной численной модели с использованием ПК ABAQUS путем сравнения полученных результатов с результатами моделирования на центрифуге;
- численное моделирование работы одиночных свай различной геометрической формы, в том числе под защитой щебеночных свай-дрен, с применением современных сертифицированных программ;
- использование современных методов математико-статистического анализа и программных комплексов SPSS и MATLAB при обработке результатов проведенных исследований.

**Достоверность результатов** проведенных в диссертационной работе исследований и сделанных выводов подтверждается применением основных положений моделей поведения материалов, применяемых в механике грунтов, теории упругости, теории пластичности, использованием современных комплексов и методик обработки экспериментальных данных, непротиворечием полученных результатов имеющимся данными о развитии сил отрицательного трения на боковых поверхностях свай в оседающем грунте.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика и результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния системы «свая–оседающий грунтовый массив».
2. Результаты численных расчетов влияния различных факторов, включающих геометрические параметры сваи, модуль упругости ее материала, характеристики грунта в МСС модели, интенсивность нагрузки на поверхности грунта и угол наклона сваи на распределение

сил отрицательного трения на ее боковой поверхности, положение «нулевой точки» и максимальное осевое усилие в стволе сваи в оседающем грунте.

3. Результаты изучения влияния распределения сил отрицательного трения на боковой поверхности наклонной сваи с целью определения величины максимального изгибающего момента, возникающего в ее стволе в результате действия отрицательного трения.

4. Результаты оценки влияния устройства щебеночных свай-дрен и применения конусных свай на снижение сил отрицательного трения на боковой поверхности сваи в оседающем грунте.

5. Математические уравнения для прогнозирования положения «нулевой точки» и величины максимального осевого усилия, возникающих в теле цилиндрической и конусной сваи при оседании окружающего грунта.

6. Модель нейронной сети для прогнозирования положения «нулевой точки» и максимальной осевой силы, возникающей в свае при оседании окружающего грунта.

**Личный вклад автора диссертации** заключается в следующем:

- определены и сформулированы цель и задачи исследования;
- разработана методика и выполнены численные исследования закономерностей развития сил отрицательного трения на боковых поверхностях свай в оседающем грунтовом массиве;
- предложены и обоснованы численными расчетами способы снижения негативного влияния отрицательного трения на несущую способность свайных фундаментов в оседающем грунте за счет применения конусных свай и щебеночных свай-дрен;
- выполнен статистический анализ результатов проведенных исследований с помощью программы SPSS;
- разработаны искусственные нейронные сети и получены уравнения для определения положения «нулевой точки» и максимального значения догружающей силы, возникающей в свае за счет отрицательного трения, вызванного оседанием окружающего грунта;
- предложен инженерный метод определения несущей способности сваи, работающей в условиях оседающего грунта.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были рассмотрены и обсуждены на:

- 1) International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering (CONMECHYDRO – 2020) 23-25 April 2020, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Tashkent, Uzbekistan.
- 2) VII International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" (IPICSE 2020) 11th-14th November 2020, Tashkent, Uzbekistan.
- 3) Deep Foundations and geotechnical problems of territories (DFGC 2021) 26-28 May 2021, Perm, Russian Federation.
- 4) Китайско-Российский Форум молодых ученых в области геотехники и подземного строительства" 14–15 сентября 2022.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 3 научных статей, 3 из которых опубликована в журнале, индексируемом в базе данных ВАК, 3 статьи – на международных конференциях, индексируемых в базе данных Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, восьми глав, выводов, списка литературы и шести приложений. Общий объем работы 130 страниц, в том числе 112 страниц основного текста, включает 10 таблиц, 93 рисунков и 18 страницы списка использованных источников и приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первая глава** посвящена обзору результатов экспериментальных и теоретических исследований развития отрицательных сил трения и методов их учета при определении несущей способности свай в оседающем грунте. По результатам выполненного анализа определена цель и

сформулированы задачи дальнейших исследований по этому важному вопросу современного фундаментостроения.

**Вторая глава** посвящена исследованию работы вертикальных, наклонных и конусных свай в оседающем грунте. Дополнительно рассмотрен вопрос о влиянии заделки наклонной сваи в ростверк на распределение сил бокового трения и изгибающих моментов по ее длине при оседании грунта, а также вопрос о влиянии щебеночных свай-дрен на ускорение процесса консолидации окружающую рабочую железобетонную сваю водонасыщенного глинистого грунта и уменьшение сил отрицательного трения на ее боковой поверхности.

Исследования проводились методом конечных элементов в трехмерной постановке с помощью ПК ABAQUS. Грунт (слабая водонасыщенная глина) моделировался модифицированной моделью Cam Clay (MCC), слой песка моделью Мора-Кулона (MC), свая моделировалась как 3D линейный упругий материал. Интерфейс между сваем и грунтом моделировался с использованием алгоритма "поверхность к поверхности" в ПК ABAQUS 2017. Принималось, что поверхности находятся в контакте, когда относительное смещение между сваем и грунтом составляет менее 5,0 мм, при относительном смещении более 5,0 мм произойдет сдвига между поверхностями грунта и сваи. Трение между сваем и грунтом перед проскальзыванием моделировалось методом Мора-Кулона.

#### Численная модель, программа исследований

Численная 3D модель испытания одиночной вертикальной цилиндрической и конусной сваи с разбивкой конечно-элементной сетки и граничными условиями показана на Рисунке 1. Модель симметрична относительно осей X и Y, поэтому только одна ее четверть имеет сетку 3D. Нижняя граница модели грунта ограничивалась от смещения как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях ( $U_x=U_y=U_z=0$ ).

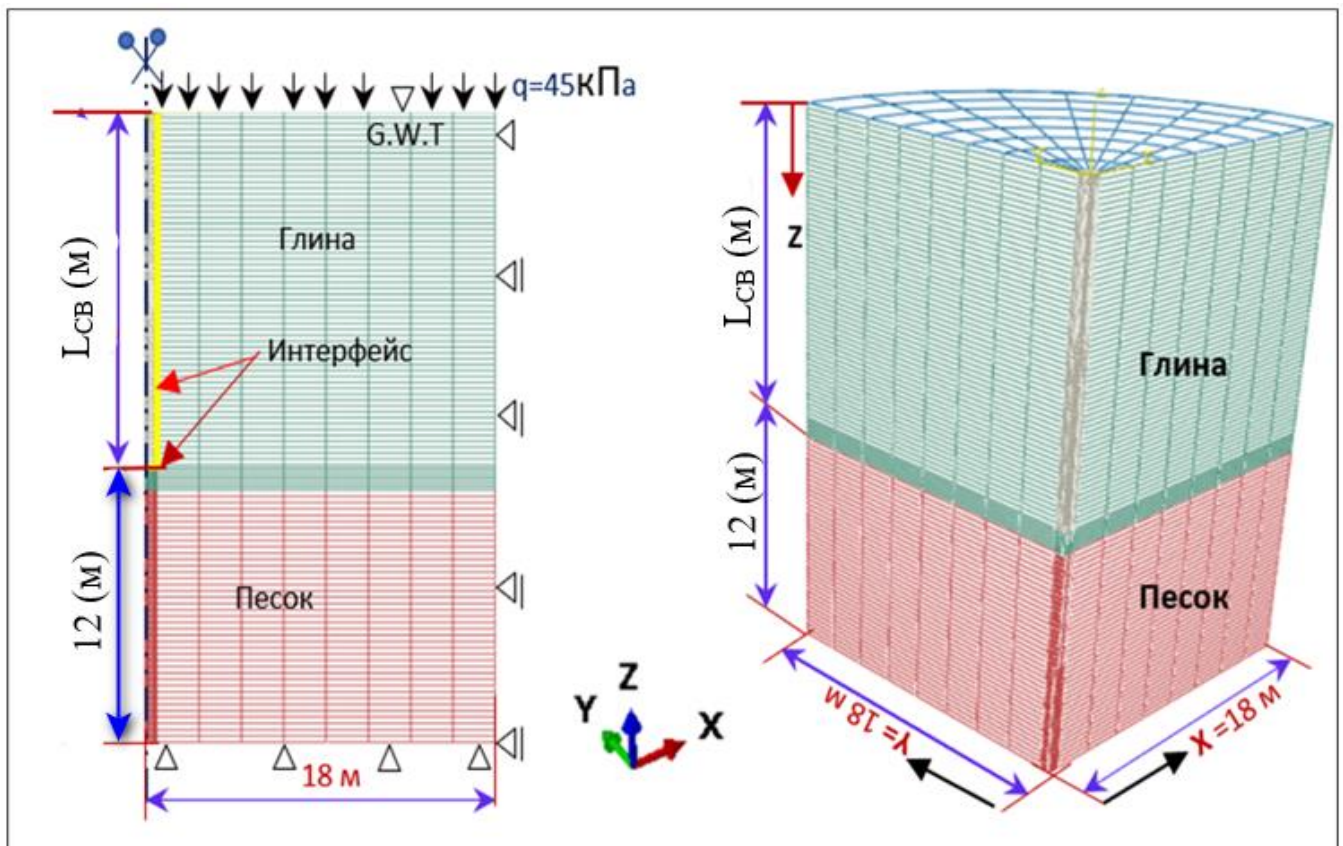


Рисунок 1 - Геометрия и граничные условия численной модели

Для верификации модели использовались результаты моделирования на центрифуге, проведенные Л.У. У. и др., 2016. Хорошая корреляция наблюдалась между полученными и

измеренными значениями касательных напряжений по боковой поверхности цилиндрической сваи, что подтвердило возможность использования разработанной модели для проведения намеченных исследований, программа которых представлена в Таблице 1.

В таблице 1. **OCR** - коэффициента переуплотнения глинистого грунта,  $\lambda$  - угловой коэффициент нормали уплотнения (NCL) в осях  $e - \ln P'$ ,  $k$ - угловой коэффициент линии набухания в осях  $e - \ln P'$ ,  $e$  - коэффициент пористости грунта,  $\mu$  - коэффициента трения между сваями и окружающим грунтом,  $E_{\Gamma}$  - модуль деформации глины,  $E_{п}$  - модуль деформации песка,  $E$ - модуль деформации сваи,  $Q_{\max}$  - максимальное осевое усилие в одиночной неэкранированной свае перед передачей на нее вертикальной нагрузки,  $a$ - осевое расстояния от сваи фундамента до щебеночных свай,  $K$ -Коэффициент фильтрации грунта (м/сек).

Таблица 1. Программа параметрических исследований

| Параметр                                      | Значение параметра   |
|---|--|
| Диаметр сваи, $D$ (м)                         | 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4  |
| Длина сваи, $L_{св}$ (м)                      | 16,8, 20, 40, 60, 80   |
| $L_{св}/D$                                    | (14; 16,66; 33,33; 50; 66,66)  |
| Нагрузка на поверхности грунта, $q$ (кПа)     | 40; 50; 60; 70; 80   |
| <b>OCR</b>                                    | 0,80; 0,90; 1,00; 1,10; 1,20   |
| $\lambda$                                     | 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25   |
| $k/\lambda$                                   | 0,10; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80   |
| $\mu$   | 0,08; 0,16; 0,32; 0,40; 0,50   |
| $E_{п}$ (кПа)                                 | 6500; 16250; 32500; 45500; 65000; 97500                                  |
| $E_{п}/E_{\Gamma}$                            | 1; 2,50; 5,00; 7,00; 10,00; 15,00  |
| Модуль Юнга сваи, $E$ (кПа)                   | (1,75; 3,5; 5,25; 7,0; 8,75) $\times 10^7$                               |
| Вертикальная нагрузка на голову сваи $N$ (кН) | (0,00; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75; 2,00) $\times Q_{\max}$ |
| Угол наклона сваи $\theta$                    | 0°; 5°; 10°; 15°; 20°; 25°   |
| Угол сбега конусной сваи $\alpha$             | 0°; 0,68°; 1,02°; 1,36°; 1,70°   |
| $a$ (м)                                       | 1,50; 3,00; 4,50; 6,00   |
| $K_{\Gamma}$ (м/сек)                          | $1 \times 10^{-8}$   |
| $K_{п}$ (м/сек)                               | $1 \times 10^{-4}$   |

## Результаты численного моделирования

### Вертикальная цилиндрическая свая

Полученные численным моделированием эпюры распределения сил трения по боковой поверхности сваи, осевых усилий и относительных смещений между сваями и грунтом в разное время, прошедшее с начала консолидации, на примере сваи длиной  $L_{св}=16,8$  м, диаметром  $D=1,20$  м при  $q = 45$ кПа,  $E_{п}/E_{\Gamma}=1,00$  показаны на Рисунках 2 и 3.

Из Рисунка 3 видно, что отрицательное трение, равное нулю на поверхности грунта, постепенно увеличивается с глубиной до максимального значения, а затем постепенно уменьшается в переходной зоне до достижения нулевого значения в нейтральной точке, после чего переходит в положительное и достигает значения максимального в точке, расположенной рядом с концом сваи. Осевая сила, возникающая в свае в процессе консолидации, постепенно увеличивается, начиная с верха сваи до максимального значения в конце переходной зоны, где относительное смещение между сваями и грунтом равно нулю, а затем уменьшается, как показано на Рисунке 2б.

На Рисунке 3 для тех же условий показаны эпюры относительных смещений между сваями и окружающим грунтом, которые показывают, что указанное относительное смещение в зоне отрицательного трения больше его критического значения  $\gamma_{cri} = 5$  мм, в переходной зоне оно



меньше  $\gamma_{cri}$ , а в зоне положительного трения относительное смещение становится отрицательным, что означает, что на этом участке осадка сваи больше, чем осадка грунта.

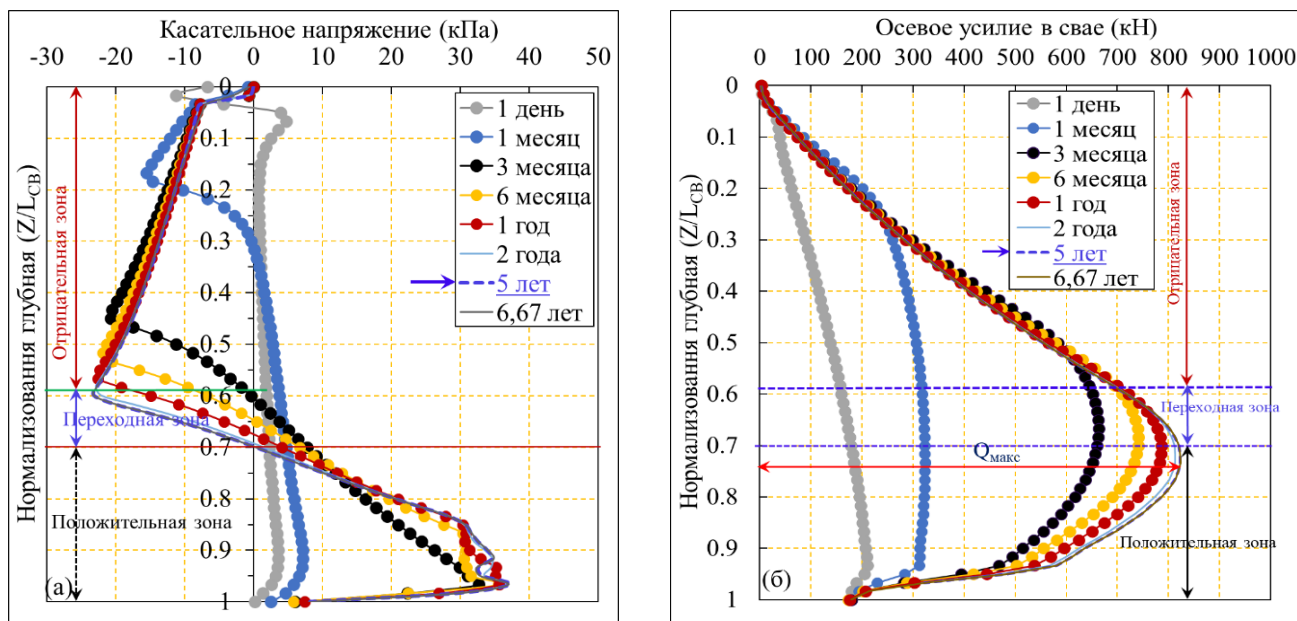


Рисунок 2 - Распределение касательных напряжений и осевых усилий по длине сваи при  $q = 45 \text{ кПа}$ ,  $E_{п}/E_{г}=1,00$ ,  $L_{св}=16,8 \text{ м}$ ,  $D=1,20 \text{ м}$

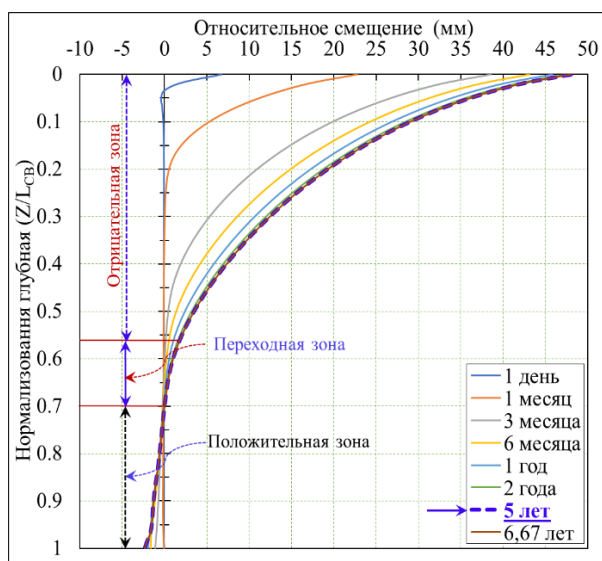


Рисунок 3 - Распределение относительных смещений между сваями и грунтом при  $q = 45 \text{ кПа}$ ,  $E_{п}/E_{г}=1,00$ ,  $L_{св}=16,8 \text{ м}$ ,  $D=1,20 \text{ м}$

Влияние длины и диаметра сваи на  $Z_0/L_{св}$  и  $Q_{\text{макс}}/q$ . А. На Рисунке 4 приведены графики, отражающие влияние длины и диаметра сваи на глубину расположения нулевой точки  $Z_0$  и максимальное осевое усилие в свае  $Q_{\text{макс}}$  для различных значениях отношения  $\kappa/\lambda$ . Глубина нулевой точки нормирована длиной сваи  $L_{св}$ , максимальное осевое усилие в свае – осевой нагрузкой в ее голове  $qA$ , где  $q = 45 \text{ кПа}$ ,  $A = \frac{\pi D^2}{4}$ . Графики показывают, что глубина расположения нулевой точки уменьшается, а максимальное осевое усилие в свае увеличивается при увеличении ее длины и диаметра. Приводит к уменьшению глубины расположения нулевой точки и увеличению максимального осевого усилия в свае и увеличению отношения  $\kappa/\lambda$ .

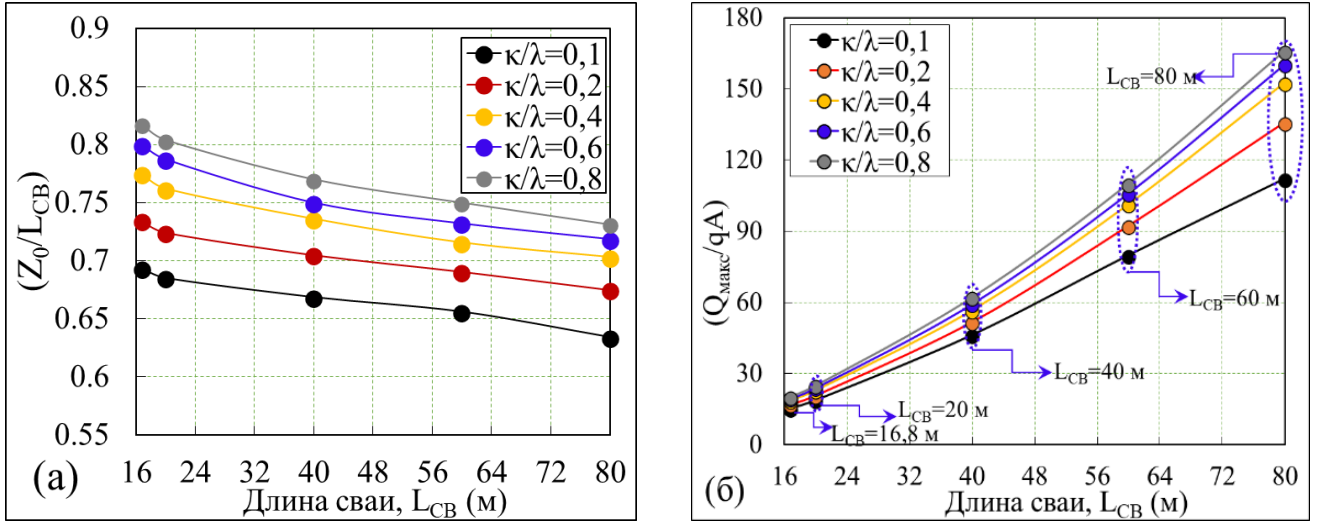


Рисунок 4 - Влияние длины сваи на (а) нормализованную глубину нулевой точки, (б) нормализованное максимальное осевое усилие в свае

Влияние жесткости грунта под нижним концом сваи, характеризуемое отношением ( $E_{II}/E_{I}$ ), которое варьировалось от 1 до 15 при модуле деформации слабого глинистого грунта  $E_{I}$  принимался равным 6500 кПа, на глубину расположения нулевой точки и значение максимальной осевой силы в свае представлено в виде графиков на Рисунке 5. Графики показывают, что глубина расположения нулевой точки и максимальная осевая сила в свае возрастают с повышением жесткости грунта под ее нижним концом при увеличении отношения  $E_{II}/E_{I}$  от 1 до 10. Дальнейшее увеличение жесткости грунта под нижним концом сваи практически не приводит к увеличению глубины расположения нулевой точки и  $Q_{max}$ , поскольку свая начинает работать как свая-стойка без дальнейшего увеличения ее осадки.

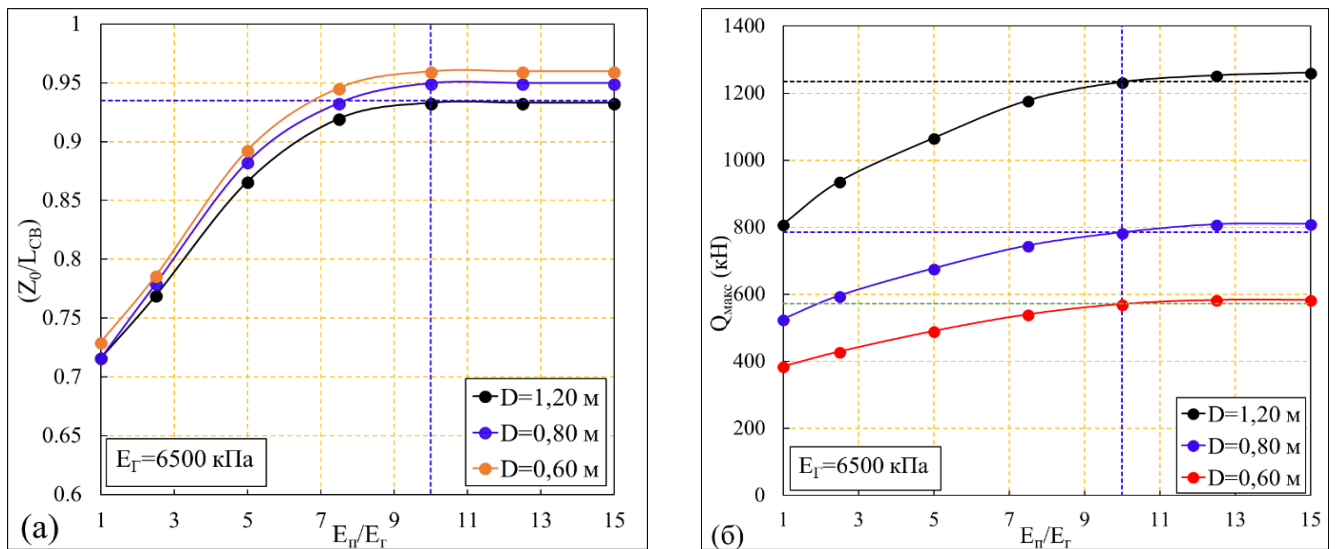


Рисунок 5 - Влияние отношения  $E_{II}/E_{I}$  на (а) глубину расположения нулевой точки, (б) величину максимальных продольных усилий в свае

Влияние сжатия ствола сваи на распределение бокового трения и осевых усилий по ее длине было изучено на трех типах свай – коротких ( $L_{CB}/D \leq 30$ ), длинных ( $L_{CB}/D > 30$ ) и сверхдлинных ( $L_{CB}/D > 50$ ). Расчеты показали, что в случае коротких свай сжатие их ствола не оказывает существенного влияния на распределение сил бокового трения и осевых усилий в свае, по мере увеличения длины свай это влияние возрастает и отчетливо проявляется в случае сверхдлинных свай.

Исследование влияния интенсивности равномерно-распределенной нагрузки на поверхности грунтового массива и характеристик глинистого грунта в модели МСС на распределение сил трения на боковой поверхности сваи и осевых усилий в ее стволе показало следующее:

- глубина развития сил отрицательного трения  $Z_0$  и значение максимального осевого усилия в стволе сваи  $Q_{\text{макс}}$  увеличивается практически прямо пропорционально увеличению интенсивности нагрузки  $q$  для всех длин свай. Влияние интенсивности нагрузки на изменение  $Z_0$  и  $Q_{\text{макс}}$  тем больше, чем больше длина сваи;

- глубина развития сил отрицательного трения  $Z_0$  и смещение грунта относительно сваи возрастают с увеличением углового коэффициента  $k$ ;

- с увеличением коэффициента трения  $\mu$  увеличивается значение максимального осевого усилия в свае  $Q_{\text{макс}}$  и глубина расположения нулевой точки  $Z_0$ .

- максимальные осевые усилия  $Q_{\text{макс}}$ , развивающиеся в стволе сваи в случае недоуплотненной глины, когда  $OCR < 1$  больше, чем в случаях нормально уплотненной ( $OCR=1$ ) и переуплотненной ( $OCR > 1$ ) глины. Это связано с тем, что осадка окружающего сваю грунта, а следовательно, и смещение грунта относительно сваи  $S_{Г-С}$ , в случае  $OCR < 1$  больше, чем при  $OCR=1$  и  $OCR > 1$ .

### Наклонная цилиндрическая свая

Силы бокового трения, вызванные оседающим грунтом на боковой поверхности наклонной сваи, имеют различную интенсивность на ее противоположных в плоскости отклонения от вертикали сторонах, что приводит к развитию по длине сваи изгибающего момента. Разница в интенсивности боковых сил трения на противоположных сторонах сваи увеличивается с увеличением угла ее наклона и диаметра, а, следовательно, увеличиваются и вызванные этой разницей действующие на сваю изгибающие моменты. Зависимость максимального изгибающего момента от угла наклона свай различного диаметра показана на Рисунке 6.

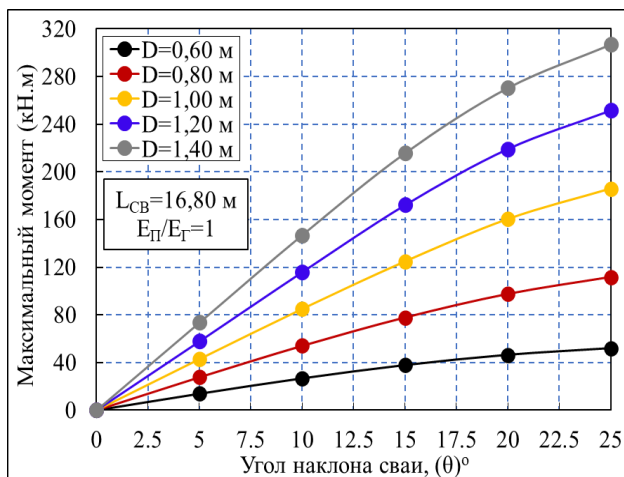


Рисунок 6 - Графики зависимости максимального изгибающего момента, действующего на сваю, от ее угла наклона

Установлено следующее различие в распределении сил бокового трения, изгибающих моментов и горизонтальных смещений у наклонных свай со свободной головой, и свай, заделанных в жесткий ростверк.

В отличие от сваи со свободной головой у заделанной в ростверк сваи отрицательное трение развивается по всей длине и принимает максимальное значение у ее нижнего конца. Нулевая точка отсутствует.

На Рисунке 7 показано распределение изгибающих моментов по длине наклонных свай со свободной головой и свай, заделанных в ростверк, при различных углах наклона сваи  $\theta$ . В первом случае возникающие в теле сваи изгибающие моменты постепенно увеличиваются по глубине и принимают максимальное значение примерно на середине сваи, а затем начинают уменьшаться. Во втором случае в месте заделки сваи в ростверк возникает максимальный положительный

момент (тем больший, чем больше угол наклона свай), который затем начинает уменьшаться и на глубине, равной примерно 0,2 длины свай, меняет знак на противоположный отрицательный. Отрицательный момент постепенно увеличивается и достигает максимального значения на глубине, равной половине длины свай, т. е. примерно на той же глубине, что и у свай со свободной головой, затем начинает снижаться и у нижнего конца свай практически исчезает.

На Рисунке 8 показано распределение горизонтальных смещений свободных и заделанных наклонных свай при различных значениях  $\theta$ . Положительным считается смещение, совпадающее с направлением угла наклона свай, отрицательным – смещение в противоположном направлении. Из рисунка видно, что в первом случае на верхнем участке ствола свай развивается отрицательное горизонтальное смещение, которое постепенно уменьшается, пока не исчезнет на глубине 0,7 длины свай. Положительное горизонтальное смещение развивается на нижнем участке наклонной свай, а значения как отрицательного горизонтального смещения, так и положительного, увеличиваются с увеличением угла наклона свай. Во втором случае горизонтальные смещения свай начинаются с нулевого значения и постепенно увеличиваются, пока не достигнут максимального значения примерно на середине участка положительных смещений свай, а затем остаются постоянными до их нижних концов. Так же, как и в первом случае, горизонтальные смещения свай во втором случае увеличиваются с увеличением угла наклона, но, в отличие от первого случая, не меняют свое направление, оставаясь положительными вдоль всей длины свай.

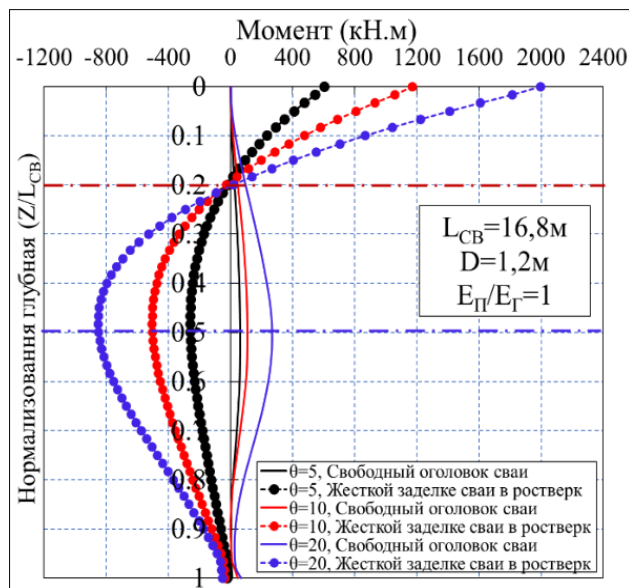


Рисунок 7 - Распределение изгибающих моментов по длине наклонных свай со свободной головой и свай, заделанной в ростверк, при различных  $\theta^\circ$

### Вертикальная конусная свая

Влияние угла сбега  $\alpha$  на распределение сил трения на боковой поверхности конусной свай показано на Рисунках 9 и 10. Приведенные на рисунках эпюры показывают, что с увеличением угла сбега отрицательное боковое трение уменьшается по мере увеличения угла конусности, а положительное увеличивается. Нулевая точка, характеризующая степень развития сил отрицательного трения на боковой поверхности свай у конусных свай расположена ближе к поверхности грунта, чем у цилиндрических ( $\alpha = 0$ ).

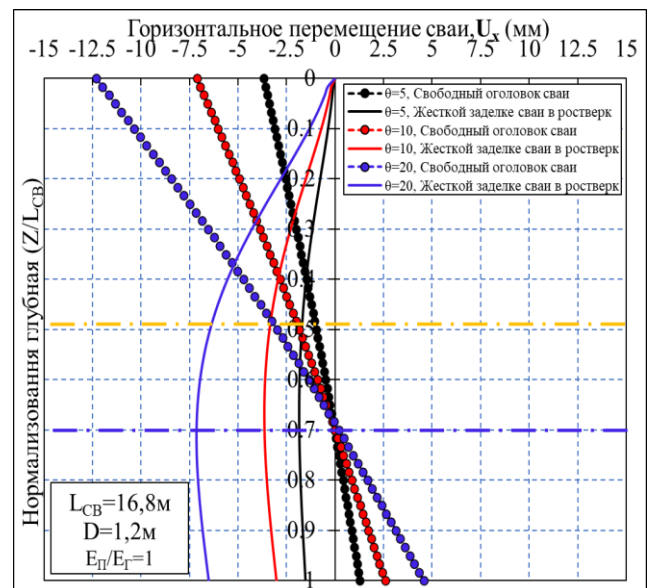


Рисунок 8 - Распределение горизонтальных смещений по длине наклонных свай со свободной головой и свай, заделанных в ростверк, при различных  $\theta^\circ$

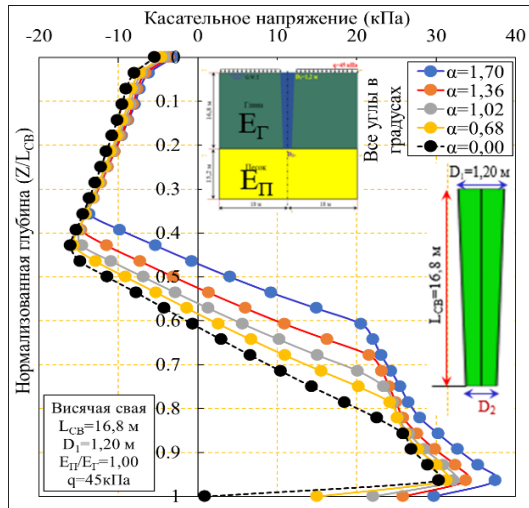


Рисунок 9 - Распределение касательных напряжений на боковой поверхности конусной сваи при различных значениях угла сбega  $\alpha$

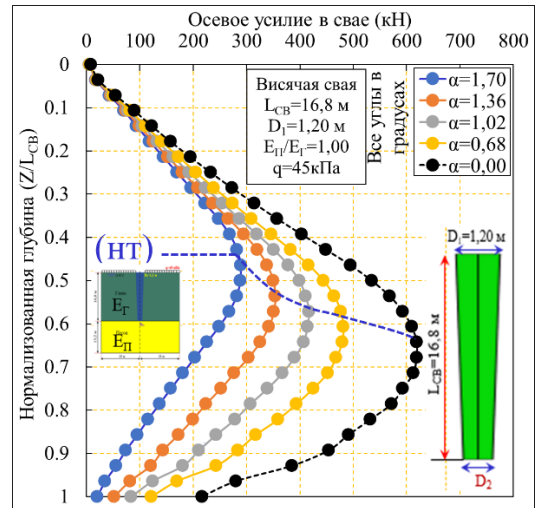


Рисунок 10 - Распределение осевых усилий в конусной свае при различных значениях угла сбega  $\alpha$

**Влияние щебеночных свай-дрен на работу одиночной сваи**

При исследовании влияния щебеночных свай-дрен на работу одиночной фундаментной сваи в оседающем слое слабого глинистого грунта рассматривалась вертикальная цилиндрическая свая, окруженная восемью щебеночными сваями диаметром 0,8 м той же длины  $L$ , что и железобетонная свая, симметрично распределенными по окружности диаметром 3 м ( $2,5D$ ).

На Рисунке 11 приведены эпюры распределения касательных напряжений и осевых усилий по длине сваи в различные промежутки времени, прошедшие с начала консолидации. Эпюры показывают, что экранирование рабочей сваи щебеночными приводит к уменьшению касательных напряжений на ее боковой поверхности и осевых усилий в ее стволе, вызванных осадкой грунта. Так максимальная осевая сила в одиночной свае при действии поверхностной нагрузки  $q=45$ кПа составила 850 кН, а в свае, окруженной восемью щебеночными – 650 кН, т. е. на 24% меньше. Изменилась и нормализованная глубина расположения нейтральной точки. При 90% консолидации она составила 0,6, а в случае неэкранированной сваи – 0,73.

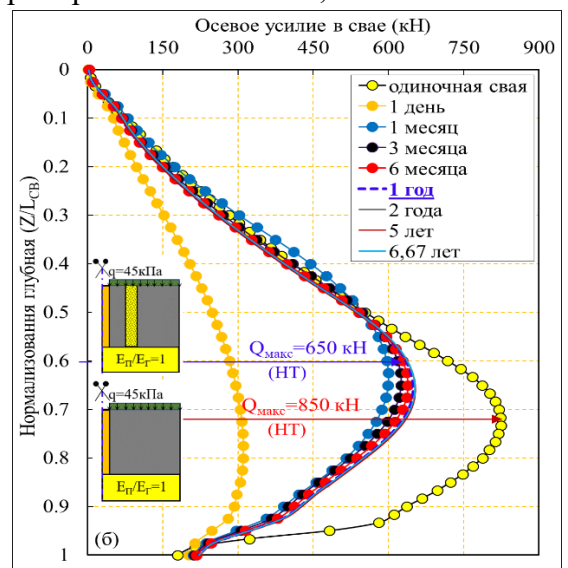
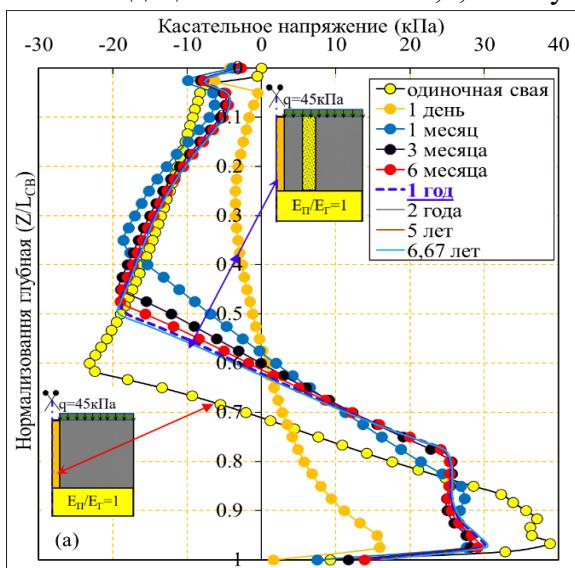


Рисунок 11 - Распределение касательных напряжений (а) и осевых усилий (б) по длине сваи

На Рисунке 12 представлены зависимости глубины расположения нулевой точки на свае и смещений грунта на ее боковой поверхности в зависимости от расстояния до щебеночных свай-дрен ( $a/D=1,25, 2,5, 3,75$  и  $5$ ) после окончания процесса консолидации. Графики показывают, что

максимальное смещение окружающего сваю грунта растет по мере увеличения расстояния до щебеночных свай, что приводит к повышению действующих на нее отрицательных сил трения и, как результат, увеличению максимального осевого усилия в ее сечении. Эффективность применения щебеночных свай для снижения сил отрицательного трения, создающих дополнительную нагрузку на сваи фундамента в уплотняющемся грунте, снижается с увеличением расстояния между рабочей и щебеночными сваями и становится практически ничтожной при достижении отношения  $(a/D) \approx 5$ .

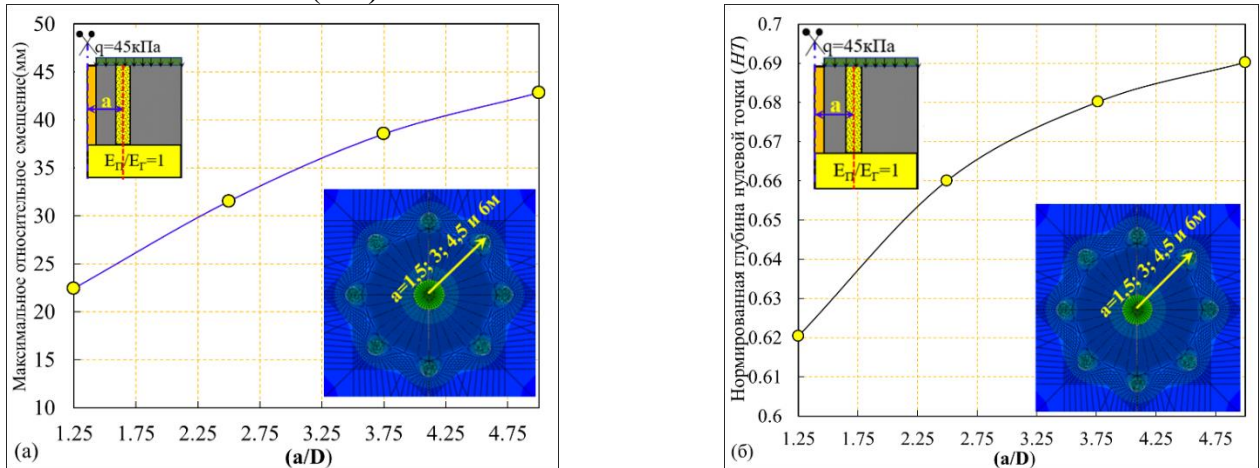


Рисунок 12 - Влияние расстояния  $(a/D)$  на: (а) относительное смещение, (б) глубину расположения нулевой точки при  $U=90\%$

**Третья глава** посвящена разработке инженерного метода расчета глубины расположения нулевой точки для расчета несущей способности сваи при оседании окружающего грунта с учетом отрицательного трения на ее поверхности. В главе рассмотрены три методики определения глубины нулевой точки  $Z_0$  - на основе эмпирического решения, регрессионного анализа и использования искусственных нейронных сетей.

#### Первый метод - Эмпирический

Расчет по этому методу выполняется в следующей последовательности.

1. По графику на Рисунке 13 определяется значение коэффициента  $\Omega$ , который корректирует глубину нейтральной точки  $Z_0$  в зависимости от модульного соотношения  $(E_n/E_r)$ . На рисунке сплошной линией показаны значения  $\Omega$ , полученные в результате численного анализа, а пунктирной линией - средние значения численных результатов, которые можно вычислить по уравнению 1.

$$\Omega = 0,1408 \ln(E_n/E_r) + 0,9812 \quad (1)$$

где  $1 \leq E_n/E_r \leq 10$ ; если  $E_n/E_r > 10$ , взять  $\Omega = 1,40$

2. При наличии нагрузки  $N$  на голову сваи с помощью графиков на Рисунке 14 определяется значение поправочного коэффициента,  $\xi$  для нулевой точки в зависимости от отношения  $(L_{CB}/D)$  и нагрузки на сваю ( $N$ ).

3. Глубина расположения нейтральной точки  $Z_0$  вычисляется по уравнению 2 с использованием ранее определенных коэффициентов  $\Omega$  и  $\xi$ .

$$Z_0 = \xi \cdot \left( \frac{-\left(\frac{2 \cdot q \cdot \Omega}{\gamma'}\right) + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot q \cdot \Omega}{\gamma'}\right)^2 + (2 \cdot \Omega^2 \cdot L_{CB}^2) + \left(\frac{4 L_{CB} \cdot \Omega^2 \cdot q}{\gamma'}\right)}}{2} \right) \quad (2)$$

где  $q$  - равномерно распределенная нагрузка на поверхности слоя глины (кПа);  $L_{CB}$  - длина сваи (м);  $\gamma'$  - удельный вес грунта ( $\gamma' = (\gamma_s - \gamma_w)$ , (кН/м<sup>3</sup>).

4. После определения  $Z_0$  по предыдущему уравнению можно вычислить значение максимального усилия в свае (догружающая сила трения)  $Q_{\text{макс}}$ , которое может развиваться в стволе сваи на заданной глубинном:

$$Q_{\text{макс}} = \beta \pi D \left( q \cdot Z_0 + \frac{\gamma' Z_0^2}{2} \right) + N \quad (3)$$

Где  $\beta$  - коэффициент, используемый для определения отрицательного бокового трения на поверхности сваи ( $f_{\text{отрз}} = \beta \cdot \sigma'_V$ ). Величина  $\beta$  меняется в зависимости от типа грунта: от 0,2 до 0,25 для глины [Matyas E. L. и Santamarina J. C. 1994].

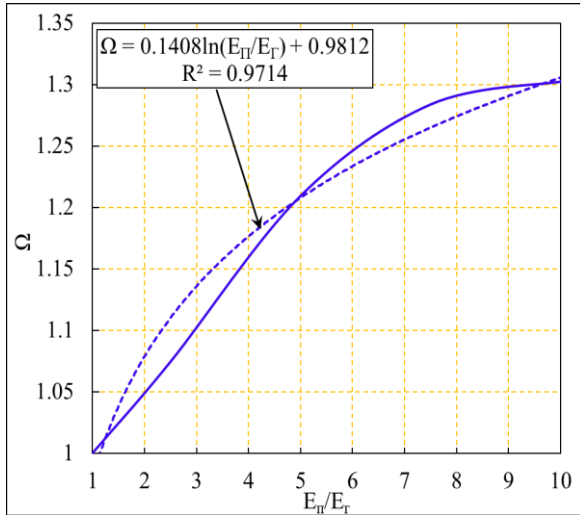


Рисунок 13- Графики зависимости  $\Omega = f(E_{II}/E_I)$

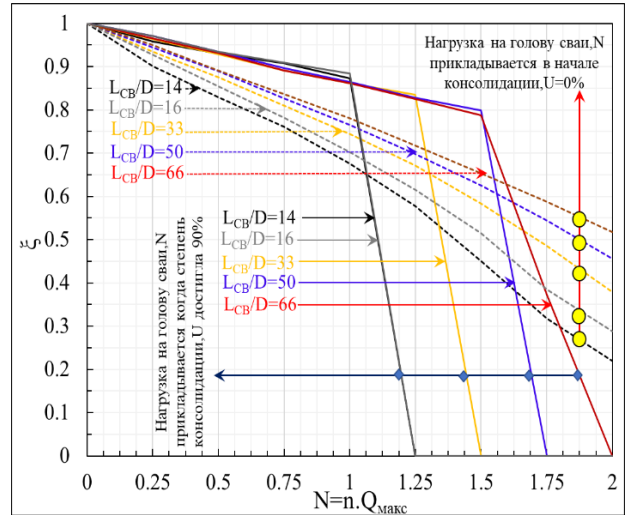


Рисунок 14- Графики для определения поправочного коэффициента  $\xi$ , учитывающего наличие нагрузки на голову сваи

*Второй метод - Модель мультилинейной регрессии с помощью SPSS*

Для разработки модели на основе численного анализа выбран множественный регрессионный анализ, в котором нормализованная нормированная глубина нулевой точки ( $\frac{Z_0}{L_{CB}}$ ) и нормированное максимальное осевое усилие на сваю ( $\frac{Q_{\text{макс}}}{q \times L_{CB} \times D}$ ) принимаются в качестве зависимых переменных, а геометрические параметры сваи, такие как ( $L_{CB}$ ), ( $D$ ), ( $E$ ) и механические параметры грунта и нагрузка, такие как, ( $E_{II}/E_I$ ) ( $\mu$ ), ( $\kappa/\lambda$ ), ( $M$ ), ( $q$ ), рассматриваются как независимые переменные. Проведено два анализа SPSS - для ( $\frac{Z_0}{L_{CB}}$ ) и ( $\frac{Q_{\text{макс}}}{q \times L_{CB} \times D}$ ). Анализ SPSS проводился со всеми десятью независимыми переменными, ( $L_{CB}/D$ ); ( $E_{II}/E_I$ ); ( $E/q$ ); ( $\mu$ ), ( $q$ ); ( $\kappa/\lambda$ ); ( $M$ ) По его результатам ( $\frac{Z_0}{L_{CB}}$ ) и  $Q_{\text{макс}}$  определяются по уравнениям 4 и 5 соответственно.

$$\frac{Z_0}{L_{CB}} = 0,701 - \frac{0,013L_{CB}}{D} + \frac{0,026E_{II}}{E_I} + \frac{1,552 \times 10^{-8}E}{q} - 0,15\mu + \frac{0,100k}{\lambda} + 0,013M \quad (4)$$

$$\frac{Q_{\text{макс}}}{q \times L_{CB} \times D} = 0,45 + \frac{0,134L_{CB}}{D} + \frac{0,03E_{II}}{E_I} - \frac{1,289 \times 10^{-7}E}{q} + 1,145\mu + \frac{0,417k}{\lambda} + 0,028M \quad (5)$$

Пределы использования уравнений (4), (5) следующие:  $L_{CB} \in [16-80]$  м;  $D \in [0,6-1,20]$  м;  $E_{II}/E_I \in [1-10,00]$ ;  $E \in [14500000 - 84500000]$  кПа;  $\mu \in [0,06-0,32]$ ;  $q \in [40 - 80]$  кПа;  $\lambda \in [0,05-0,25]$ ;  $\kappa/\lambda \in [0,085414285-0,80]$ ;  $M \in [0,98-2,80]$ .

Третий метод - Регрессионная нейронная сеть

При разработке этого метода, позволяющего определять нормализованную глубину нулевой точки ( $Z_0/L_{CB}$ ) и нормализованную величину максимального осевого усилия на сваю ( $\frac{Q_{МАКС}}{q \times D \times L_{CB}}$ ) с учетом влияния десяти параметров ( $\frac{L_{CB}}{D}$ ;  $\frac{E_{П}}{E_{Г}}$ ;  $\frac{E}{q}$ ;  $\mu$ ;  $\frac{k}{\lambda}$ ;  $M$ ) на основе данных проведенных численных расчетов было выполнено моделирование двух искусственных нейронных сетей с помощью программы MATLAB (Рисунки 15 и 16).

Отношение между целевым и выходным параметрами, а также коэффициенты корреляции (R), полученные при обучении, тестировании и проверке разработанных искусственных нейронных сетей, показаны на Рисунках 17, 18.

Используя веса связей обученной искусственной нейронной сети, необходимо выполнить следующие шаги для прогнозирования нормированной глубины нулевой точки:

1. Определить значения скрытого слоя ( $V_1-V_{13}$ ) в нейронной сети с помощью уравнений (6-18) где  $I_1=L_{CB}/D$ ;  $I_2= E_{П}/E_{Г}$ ;  $I_3=E/q$ ;  $I_4= \mu$ ;  $I_5=k/\lambda$ ;  $I_6=M$  (см. Рисунок 15).

$$V_1=v_{11}I_1+v_{12}I_2+v_{13}I_3+v_{14}I_4+v_{15}I_5+v_{16}I_6+b_1 \quad (6)$$

$$V_2=v_{21}I_1+v_{22}I_2+v_{23}I_3+v_{24}I_4+v_{25}I_5+v_{26}I_6+b_2 \quad (7)$$

$$V_3=v_{31}I_1+v_{32}I_2+v_{33}I_3+v_{34}I_4+v_{35}I_5+v_{36}I_6+b_3 \quad (8)$$

$$V_4=v_{41}I_1+v_{42}I_2+v_{43}I_3+v_{44}I_4+v_{45}I_5+v_{46}I_6+b_4 \quad (9)$$

$$V_5=v_{51}I_1+v_{52}I_2+v_{53}I_3+v_{54}I_4+v_{55}I_5+v_{56}I_6+b_5 \quad (10)$$

$$V_6=v_{61}I_1+v_{62}I_2+v_{63}I_3+v_{64}I_4+v_{65}I_5+v_{66}I_6+b_6 \quad (11)$$

$$V_7=v_{71}I_1+v_{72}I_2+v_{73}I_3+v_{74}I_4+v_{75}I_5+v_{76}I_6+b_7 \quad (12)$$

$$V_8=v_{81}I_1+v_{82}I_2+v_{83}I_3+v_{84}I_4+v_{85}I_5+v_{86}I_6+b_8 \quad (13)$$

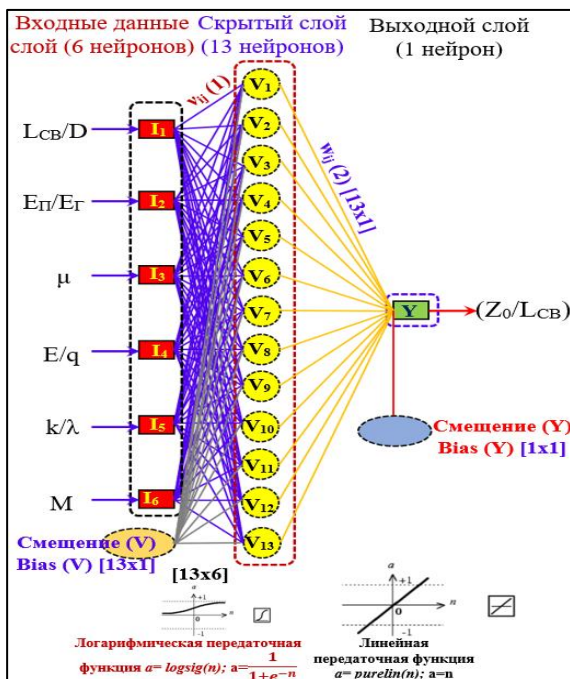
$$V_9=v_{91}I_1+v_{92}I_2+v_{93}I_3+v_{94}I_4+v_{95}I_5+v_{96}I_6+b_9 \quad (14)$$

$$V_{10}=v_{10\ 1} I_1+v_{10\ 2} I_2+v_{10\ 3} I_3+v_{10\ 4} I_4+v_{10\ 5} I_5+v_{10\ 6} I_6+b_{10} \quad (15)$$

$$V_{11}=v_{11\ 1} I_1+v_{11\ 2} I_2+v_{11\ 3} I_3+v_{11\ 4} I_4+v_{11\ 5} I_5+v_{11\ 6} I_6+b_{11} \quad (16)$$

$$V_{12}=v_{12\ 1} I_1+v_{12\ 2} I_2+v_{12\ 3} I_3+v_{12\ 4} I_4+v_{12\ 5} I_5+v_{12\ 6} I_6+b_{12} \quad (17)$$

$$V_{13}=v_{13\ 1} I_1+v_{13\ 2} I_2+v_{13\ 3} I_3+v_{13\ 4} I_4+v_{13\ 5} I_5+v_{13\ 6} I_6+b_{13} \quad (18)$$



Рисунка 15- Архитектура модели (ИНС) для прогнозирования нормализованной глубины нулевой точки ( $Z_0/L_{CB}$ )  $I_1=L_{CB}/D$ ;  $I_2= E_{П}/E_{Г}$ ;  $I_3=E/q$ ;  $I_4= \mu$ ;  $I_5=k/\lambda$ ;  $I_6=M$ ;  $V_1-13$ - нейроны скрытого слоя;  $I_1-6$ - нейроны параметров входов

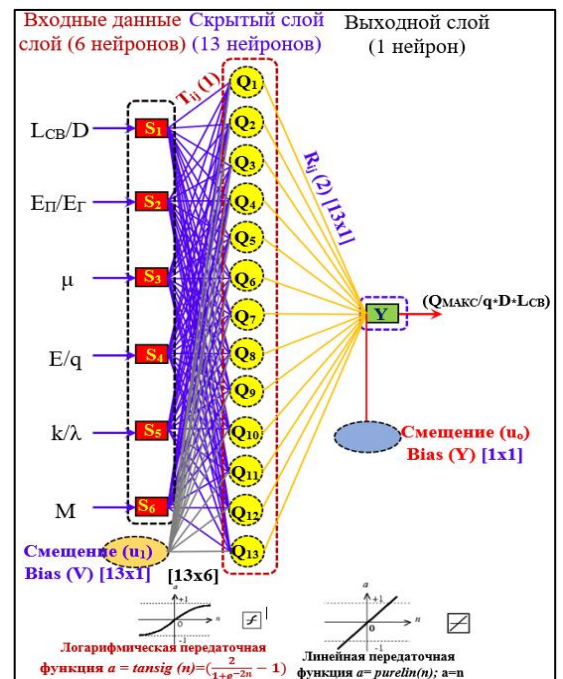


Рисунок 16- Структура и детали предложенной искусственной нейронной сети (ИНС) для прогнозирования максимального осевого усилия на сваю,  $Q_1-13$ - нейроны скрытого слоя;  $S_1-6$ - нейроны параметров входов



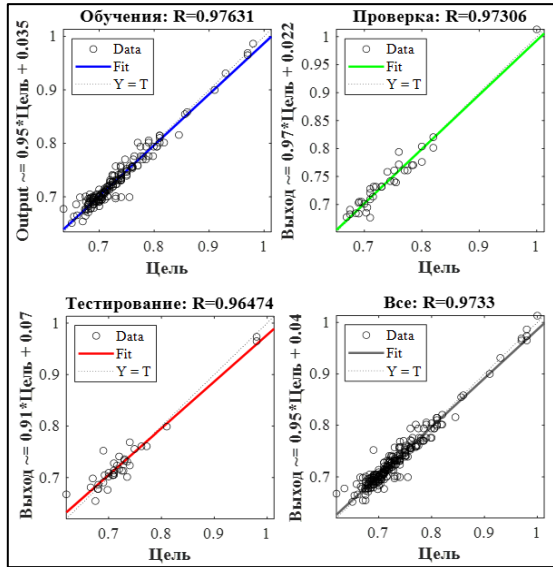


Рисунок 17 - Отношение между целевым ( $Z_0/L_{CB}$ ) и выходным параметрами ( $m$ ) для проверки данных в (ИНС)

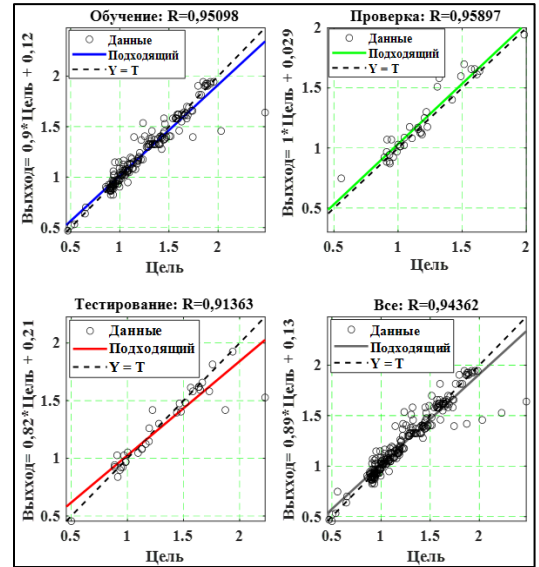


Рисунок 18 - Отношение между целевым ( $\frac{Q_{MAX}}{q \times D \times L_{CB}}$ ) и выходным параметрами для проверки данных в (ИНС)

- Затем определить влияние нейронов скрытого слоя, рассматриваемого как вход для выходного слоя, распределяя значения ( $P_1-P_{13}$ ) с помощью уравнений (19–31).

$$P_1 = W_{11} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_1}} \right) \quad (19)$$

$$P_2 = W_{21} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_2}} \right) \quad (20)$$

$$P_3 = W_{31} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_3}} \right) \quad (21)$$

$$P_4 = W_{41} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_4}} \right) \quad (22)$$

$$P_5 = W_{51} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_5}} \right) \quad (23)$$

$$P_6 = W_{61} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_6}} \right) \quad (24)$$

$$P_7 = W_{71} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_7}} \right) \quad (25)$$

$$P_8 = W_{81} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_8}} \right) \quad (26)$$

$$P_9 = W_{91} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_9}} \right) \quad (27)$$

$$P_{10} = W_{101} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_{10}}} \right) \quad (28)$$

$$P_{11} = W_{111} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_{11}}} \right) \quad (29)$$

$$P_{12} = W_{121} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_{12}}} \right) \quad (30)$$

$$P_{13} = W_{131} \left( \frac{1}{1 + e^{-V_{13}}} \right) \quad (31)$$

- Нормализованную глубины нулевой точки ( $\frac{Z_0}{L_{CB}}$ ) определить по уравнению 32, а глубина нулевой точки в ненормализованной форме ( $Z_0$ ) - по уравнению 33.

$$\left(\frac{Z_0}{L_{CB}}\right) = f\left(\frac{L_{CB}}{D}; \frac{E_{II}}{E_{II}}; \frac{E}{q}; \mu; \frac{\kappa}{\lambda}; M\right)$$

$$\left(\frac{Z_0}{L_{CB}}\right) = f\left[\frac{L_{CB}}{D}; \frac{E_{II}}{E_{II}}; \frac{E}{q}; \mu; \frac{\kappa}{\lambda}; M\right]$$

$$\left(\frac{Z_0}{L_{CB}}\right) = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{14} + b_0 \quad (32)$$

$$Z_0 = L_{CB} \left( \sum_{i=1}^{13} P_i \right) + b_0 \quad (33)$$

4. Нормализованное значение максимального осевого усилия на сваю  $\left(\frac{Q_{\text{МАКС}}}{q \times D \times L_{CB}}\right)$  определить по уравнению 34, а максимальное усилие в ненормализованной форме ( $Q_{\text{МАКС}}$ ) - по уравнению 35.

$$\left(\frac{Q_{\text{МАКС}}}{q \times D \times L_{CB}}\right) = f\left(\frac{L_{CB}}{D}; \frac{E_{II}}{E_{II}}; \frac{E}{q}; \mu; \frac{\kappa}{\lambda}; M\right)$$

$$\left(\frac{Q_{\text{МАКС}}}{q \times D \times L_{CB}}\right) = f\left[\frac{L_{CB}}{D}; \frac{E_{II}}{E_{II}}; \frac{E}{q}; \mu; \frac{\kappa}{\lambda}; M\right]$$

$$\left(\frac{Q_{\text{МАКС}}}{q \times D \times L_{CB}}\right) = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + u_0 \quad (34)$$

$$Q_{\text{МАКС}} = q \times D \times L_{CB} \left[ \sum_{i=1}^{13} Q_i \right] + u_0 \quad (35)$$

### Пример применения разработанной методики

Для проверки возможности выполнения практических расчетов по разработанным в диссертационной работе методикам определения глубины нулевой точки  $Z_0$  и величины максимальной дополнительной осевой силы, возникающей в свае  $Q_{\text{МАКС}}$  в слабом глинистом грунте, был выполнен обратный расчет результатов проведенного Indraratna В. и др., 1992 испытания сваи длиной 27 м, диаметром 0,4 м, погруженной в несколько слоев бангкокской глины в Таиланде, как показано на Рисунке 19. После 265 дней измеренная глубина нулевой точки составила 21 м, а значения максимальной осевой силы в свае  $Q_{\text{МАКС}}$  - 310 кН. Данные сравнения значений глубины нулевой точки и максимального осевого усилия, рассчитанных по предложенным уравнениям и измеренными значениями, представлены в таблицах 2 и 3. Из таблиц видно, что эффективность использования метода искусственной нейронной сети для прогнозирования глубины нулевой точки и максимальной осевой силы в свае лучше, чем эмпирический метод и метод мультирегрессии.

| Глубина (м) | Описание слоев грунта   |                   |
|-------------|-------------------------|-------------------|
| ▼(+2,00)    |                         |                   |
| ▼(0,00)     | Насыпь                  |                   |
| ▼(-2,00)    | Слой (1) влажный        | Выветренная глина |
| ▼(-4,00)    | Слой (1) Сатурированный |                   |
| ▼(-10,00)   | Слой (2)                | Слабая глина      |
| ▼(-20,00)   | Слой (3)                |                   |
| ▼(-28,00)   | Слой (4)                | Твердая глина     |
| ▼(-38,00)   | Слой (5)                |                   |
|             |                         | Песок             |

Рисунок 19 - Упрощенный профиль грунта сравнительного исследования Indraratna В. и др. [1992]

Таблица 2 Сравнение между измеренной и прогнозируемой глубиной нулевой точки

| L (м) | D (м) | q (кПа) | Z <sub>0</sub> (м)  |               |                         |
|-------|-------|---------|---------------------|---------------|-------------------------|
|       |       |         | Измеренное значение | Уравнение (2) | Уравнение (33)<br>(ИНС) |
| 27    | 0,40  | 34      | 21                  | 18,19         | 20,09                   |

Таблица 3 Сравнение между измеренной и прогнозируемой максимальной осевой силой в свае

| L (м) | D (м) | q (кПа) | Q <sub>МАКС</sub> (кН) |               |                         |
|-------|-------|---------|------------------------|---------------|-------------------------|
|       |       |         | Измеренное значение    | Уравнение (3) | Уравнение (35)<br>(ИНС) |
| 27    | 0,40  | 34      | 310                    | 523           | 380                     |

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненными в диссертационной работе экспериментальными исследованиями подтверждены причины и условия возникновения отрицательных сил бокового трения, создающих дополнительную нагрузку на сваи, работающие в условиях оседающего грунта, снижая их несущую способность.

2. Степень влияния сил отрицательного трения на величину максимальной дополнительной нагрузки на сваю интегрально характеризуется глубиной положения нулевой точки (нейтральной плоскости), за которую принимается глубина, на которой относительные смещения между сваем и грунтом, а, следовательно, и напряжения сдвига на ее поверхности равны нулю.

3. Проведенными детальными исследованиями установлено, что глубина расположения нулевой точки зависит от длины и диаметра сваи, ее жесткости, интенсивности нагрузки на поверхности грунта, модулей деформации грунта вдоль боковой поверхности сваи и под ее нижним концом, нагрузки на голову сваи и момента ее приложения (до или после начала оседания окружающего сваю грунта). Наибольшему влиянию сил отрицательного трения подвержены короткие сваи и сваи-стойки.

4. Нормированная глубина нулевой точки уменьшается с увеличением длинны сваи, увеличением отношения длины сваи к ее диаметру, увеличением нагрузки на голову сваи и увеличивается с ростом интенсивности нагрузки на поверхности грунта, увеличением жесткости грунта под нижним концом сваи и коэффициента трения между стволом сваи и окружающим грунтом.

5. Распределение сил отрицательного трения на боковой поверхности наклонной сваи зависит от угла ее отклонения от вертикали. Отрицательное боковое трение в верхней части сваи уменьшается, а положительное трение в ее нижней части возрастает с увеличением угла наклона сваи. Осевые усилия и изгибающие моменты в стволе сваи увеличиваются с увеличением ее отклонения от вертикали.

6. Механизм образования сил отрицательного трения по боковым поверхностям конусных свай тот же, что и у вертикальных свай. Отрицательные силы трения по боковым поверхностям конусных свай уменьшаются по мере увеличением угла наклона их боковых граней.

7. Установленное выполненными экспериментальными исследованиями положительное влияние щебеночных свай-дрен на работу фундаментных свай заключается в ускорении стабилизации их осадки и снижении действующих на них сил отрицательного трения, что позволяет увеличить допускаемую нагрузку на сваю фундамента при проектировании.

Результаты этого исследования показывают, что на практике использование щебеночных свай является практичным и экономичным способом уменьшения осевого усилия в свае и вертикального смещения грунта вокруг свай.

8. Разработанная нейронная сеть с помощью программы MATLAB на основе численного анализа позволяет выполнить расчет глубины нулевой точки и осевых сил, возникающих в стволе свай в результате отрицательного трения.

9. Сравнение результатов определения глубины расположения нулевой точки и максимального осевого усилия в свае по разработанной методике с опытными данными показало их высокую сходимость (порядка 85%), что позволяет рекомендовать ее для практических расчетов.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:**

1. Исследование влияния горизонтальной нагрузки и изгибающего момента на развитие сил отрицательного трения на боковых поверхностях свай в оседающем грунте.
2. Изучение влияния сейсмической нагрузки на величину и распределение сил отрицательного трения на боковых поверхностях свай.
3. Проведение полевых исследований для проверки эффективности использования щебеночных свай-дрен и конусных свай для снижения воздействия сил отрицательного трения.
4. Изучение влияния угла наклона слоев глинистого грунта вокруг ствола сваи на распределения отрицательного трения на ее поверхности.
5. Расширение использования искусственных нейронных сетей в геотехнических инженерных областях, таких как расчет несущей способности грунта и свай, проектирование плотин и туннелей и др.

#### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **- Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Знаменский В. В., Хегази О. М. М., Сайед Д. А. К. Влияние устройства щебеночных свай в слабых грунтах на работу одиночной сваи // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2021. – №. 2. – С. 2–4.
2. Знаменская Е. А., Хегази О. М., Сайед Д. А. Исследование влияния щитовой проходки тоннеля на работу одиночной сваи // Инновации и инвестиции. – 2022. – №. 2. – С. 208–213.
3. Знаменский В. В., Хегази О. М. Численный анализ распределения бокового отрицательного трения на конусной свае // Экономика строительства. – 2022. – №. 12. – С. 148–156.

##### **- Публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах:**

4. Znamenskiy V., Hegazy O., Sayed D. Behavior of single pile and pile groups in consolidating clay // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 883. – №. 1. – С. 012208.
5. Znamenskii V. V., Hegazy O. M., Sayed D. A. The 3D numerical model of the stone column in soft clay soils // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1928. – №. 1. – С. 012011.
6. Znamenski V. et al. Influence of lowering groundwater level on the behavior of pile in soft soil // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1030. – №. 1. – С. 012096.