

На правах рукописи



Сайед Диааелдин Ахмед Котп

**Исследование работы фундаментов на щебеночных сваях на вертикальную
нагрузку в слабых глинистых грунтах**

2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат

Диссертация 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: **Болдырев Геннадий Григорьевич**
Доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства», кафедра «Геотехника и
дорожное строительство», главный научный
сотрудник.

Рытов Сергей Александрович
Кандидат технических наук,
акционерное общество «НИЦ «Строительство», центр
исследования свайных фундаментов (ЦИСФ) научно-
исследовательского, проектно-изыскательского и
конструкторско-технологического института
оснований и подземных сооружений, имени Н. М.
Герсеванова, руководитель центра.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

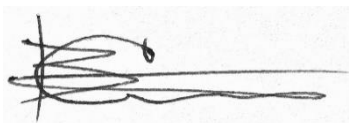
Защита состоится «14» июня 2023г. в 15:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05 (Д 212.138.14), созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Зал 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. За последние десятилетия во всем мире неуклонно увеличивается объем строительства на слабых грунтах, характеризующихся повышенной сжимаемостью и малой прочностью. В Египте такие грунты широко распространены в средней и северной частях дельты реки Нил, где их мощность достигает 15 м. Строительство на таких грунтах современных зданий и сооружений, передающих на основание значительные нагрузки, практически невозможно без их предварительного улучшения, замены или применения специальных типов фундаментов, в том числе свайных. Современное состояние строительной науки, конструкторской и технологической базы дают широкий набор средств для строительства в таких условиях. Одним из конструктивных методов, все чаще используемых на практике и позволяющим в определенных случаях отказаться от применения сложных и дорогостоящих конструкций фундаментов, являются щебеночные сваи. В основном щебеночные сваи использовались и используются как средство улучшения строительных свойств грунтов для создания в основании фундамента геокомпозита, обладающего повышенными механическими характеристиками и ускоряющего консолидацию грунтов. В связи с этим подавляющее большинство исследований щебеночных свай было направлено на изучение именно этого аспекта их применения. Исследованию работы щебеночных свай как несущих элементов, передающих на основание вертикальные нагрузки, уделялось существенно меньше внимания, в результате чего многие вопросы взаимодействия щебеночных свай с грунтовым основанием остались не исследованными, что снижает возможность их более широкого внедрения в практику свайного фундаментного строения, как одного из методов возведения сооружений, конструкции которых могут выдерживать относительно большие осадки.

На основании изложенного тему диссертационной работы, посвященной исследованию работы фундаментов на щебеночных сваях на вертикальную нагрузку в слабых глинистых грунтах следует считать актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Изучению различных аспектов устройства и работы щебеночных свай полевыми, лабораторными и численными методами, а также методам их расчета посвящены многие работы отечественных и зарубежных ученых и специалистов – М.Ю. Абелев, З.Г. Тер-Мартirosян, Р. А. Усманов, Л. Р. Ставницер, В. Ф. Бай, А. Б. Пономарев, В. В. Знаменский, Т.В. Мальцева и А.В. Черных, Н. J. Priebe, N. P. Ballam и J. R. Booker, J. Castro, D. A. Greenwood, J. M. O. Hughes и др., J. Han и S.L Ye, A. P. Ambily & S. R. Gandhi, D. J.White и др., J. T. Shahu и Y. R. Reddy, M. Y. Fattah и др., H. A. Elshazly и др., Ramadan и др., D. Muir Wood и др., B. A McCabe и др., K. S. Watts и др., J. Black и др., A. W.

Stuedlein и R. D. Holtz, A. M. Hanna и др., S. A. Tan и др., M. Bouassida и др. и J. Nazari Afshar и M. Ghazavi.

В основном исследовалась деформируемость слабых водонасыщенных грунтов, усиленных щебеночными сваями. В результате этих исследований была показана эффективность применения щебеночных свай для усиления слабых глинистых грунтов, описано напряженно-деформированное состояние усиленного ими массива, даны рекомендации по определению значения его эффективного модуля деформации.

Работа фундаментов на щебеночных сваях, где свая работает как силовой элемент, передающий нагрузку на грунт, исследована значительно меньше, тем не менее на частных примерах была показана перспективность развития этого направления в поиске экономически эффективных и наименее трудозатратных в изготовлении типов фундаментов, позволяющих осуществлять массовую застройку с использованием относительно простой техники, что важно для Египта. Однако в проведенных исследованиях щебеночная свая рассматривалась, как одиночная, включенная в сетку бесконечного свайного поля (концепция элементарной ячейки). Работа же небольших групп щебеночных свай с учетом их взаимного влияния практически не исследовалась, в результате к их проектированию подходят эмпирически, что сдерживает более широкое внедрение этого типа фундаментов в практику современного строительства и объясняет необходимость продолжения исследований по этой тематике для дальнейшего совершенствования методики расчета и проектирования фундаментов на щебеночных сваях с целью повышения их экономической эффективности и эксплуатационной надежности.

Цель диссертационной работы – целью диссертационной работы является исследование работы отдельных фундамента на щебеночных сваях в слабых глинистых грунтах и разработка инженерной методики расчета их осадок.

Задачи исследования:

1. Изучение и анализ отечественных и зарубежных публикаций о применении щебеночных свай в строительстве, результатах исследований их работы в составе фундаментов и методов расчета. Разработка методологии выполнения и программы экспериментальных исследований диссертационной работы.

2. Разработка трехмерной численной модели с использованием ПК FLAC3D для изучения взаимодействия отдельных фундаментов на щебеночных сваях с массивом водонасыщенных глинистых грунтов. Верификация разработанной численной модели.

3. Исследование численным методом работы отдельных фундаментов на щебеночных сваях с установлением зависимости их осадок от длины и диаметра щебеночных свай, коэффициента замещения площади, определяемого как отношение суммы площадей сечений

всех свай к площади ростверка, осевого расстояния между сваями, модулей деформации и параметров прочности грунта и щебеночных свай и вертикальной нагрузки на фундамент.

4. Сравнение результатов выполненных численных исследований с результатами экспериментальных и численных исследований, опубликованных в технической литературе.

5. Анализ результатов выполненных численных исследований, определение коэффициента снижения осадки свайного фундамента β , развитие боковой деформации щебеночной свай и распределения контактных напряжений под ростверком.

6. Разработка методики статистического моделирования, регрессионный анализ, прогнозирование осадки фундаментов на щебеночных сваях в слабом глинистом грунте.

7. Разработка инженерной методики расчета осадок свайных фундаментов на щебеночных сваях.

8. Сравнение результатов расчета осадок свайного фундамента на щебеночных сваях по разработанной методике с данными мониторинга осадок реального объекта.

Объект исследования – отдельный фундамент на щебеночных сваях в слабом глинистом грунте.

Предмет исследования – количественная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов системы «щебеночная свая – окружающий грунт – ростверк».

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлены закономерности влияния геометрических размеров и характеристик материала щебеночных свай, характеристик слабого глинистого грунта и приложенной нагрузки на осадки свайных групп, состоящих из щебеночных свай.

2. Дана количественная оценка НДС системы «щебеночная свая – окружающий грунт – ростверк» с учетом взаимного влияния свай и нелинейных свойств грунтов.

3. Разработаны новые модели мульти-линейной и мульти-нелинейной регрессии, позволившие получить аналитические решения для определения осадки отдельных фундаментов на щебеночных сваях

4. Установлено влияние боковой деформации щебеночных свай на осадки фундамента, определена критическая длина щебеночных свай, увеличение которой не приводит к дальнейшему снижению осадки фундамента.

Теоретическая значимость работы: заключаются в следующем:

- выполнена оценка аналитических методов расчета отдельных фундаментов на щебеночных сваях в слабом глинистом грунте;

- предложен и разработан метод, адекватно отражающую фактическую работу кустов из щебеночных свай с учетом, в отличие от существующих методов, их взаимного влияния;

- разработанные новые модели мульти-линейной и мульти-нелинейной регрессии позволяют рассчитать осадку фундамента на щебеночных сваях со средней абсолютной ошибкой (ААЕ) и средним значением (М) меньшими, чем при расчете по известным методам.

Практическая значимость работы заключается:

- в возможности определения осадки отдельного фундамента на щебеночных сваях с учетом их взаимного влияния, что соответствует их фактической работе во взаимодействии с грунтовым массивом и повышает точность расчета по сравнению с расчетом, выполненным с использованием концепции элементарной ячейки или гомогенизированного материала;

- в возможности назначать длину свай не более ее критического значения, превышение которого не приводит к снижению осадки отдельного фундамента, что существенно влияет на экономическую составляющую проектного решения;

- в возможности использовать результаты проведенных исследований и разработанных методик расчета для актуализации нормативных документов в области геотехники.

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

- анализ литературных источников по тематике диссертационной работы;

- численный метод моделирования эксперимента по изучению работы отдельного фундамента на щебеночных сваях в слабом глинистом грунте;

- статистическое моделирование для прогнозирования осадки фундамента на щебеночных сваях в слабых глинистых грунтах;

- сравнение результатов численного моделирования с результатами аналитических решений, полученных с использованием статистического моделирования, а также с результатами аналитических решений, полученных из литературных источников.

Положения, выносимые на защиту:

- методика и результаты моделирования численным методом напряженно-деформированного состояния системы «щебеночная свая – окружающий грунт – ростверк»;

- результаты численных расчетов зависимости осадки фундамента на щебеночных сваях от геометрических размеров свай, осевого расстояния между сваями, характеристик слабого глинистого грунта и материала щебеночных свай и вертикальной нагрузки на фундамент;

- результаты анализа выполненных численных исследований, методика определения коэффициента снижения осадки, установленные закономерности развития боковых деформации щебеночных свай и распределения контактных напряжений под ростверком;

- результаты использования статистического моделирования и регрессионного анализа для прогнозирования осадки фундаментов на щебеночных сваях.

Достоверность результатов, полученных в рамках проведенных исследований и сделанных выводов обеспечивается применением основных гипотез и моделей поведения материалов, применяемых в механике грунтов, использованием классических решений теории упругости и теории пластичности, современных комплексов и методик обработки экспериментальных данных, использованием современных программных комплексов, непротиворечием полученных результатов имеющимся опытным данным.

Личный вклад автора диссертации заключается в следующем:

- в выполнении анализа литературных источников по различным аспектам рассматриваемой в диссертационной работе тематики, что позволило обосновать актуальность и определить цель и задачи диссертационной работы;

- в анализе аналитических решений по расчету фундаментов на щебеночных сваях в слабом глинистом грунте;

- в разработке методики и выполнении численных исследований работы отдельных фундамента на щебеночных сваях в слабых глинистых грунтах с учетом взаимного влияния свай;

- в разработке новой модели мульти-линейной и мульти-нелинейной регрессии для расчета осадки фундамента на щебеночных сваях в слабом глинистом грунте;

- в проведении регрессионного анализа с использованием данных, полученных в результате численных исследований закономерности осадки отдельных фундаментов на щебеночных сваях;

- в разработке инженерной методики расчета осадок отдельных фундаментов на щебеночных сваях с учетом их взаимного влияния и определением рациональной длины свай;

- в подготовке материалов для публикации результатов выполненных исследований в научных изданиях.

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

- 1) XVIII Russian-Polish-Slovak Seminar Theoretical Foundation of Civil Engineering. 9-13 сентября 2019 г., г. Жилина, Словакия;
- 2) Modelling and Methods of Structural Analysis. 13–15 ноября 2019 г., г. Москва, Российская Федерация;
- 3) International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering (CONMECHYDRO – 2020). 23-25 апреля 2020 г., г. Ташкент, Узбекистан;

- 4) VII International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" (IPICSE 2020). 11-14 ноября 2020 г., г. Ташкент, Узбекистан;
- 5) Deep Foundations and geotechnical problems of territories (DFGC 2021). 26-28 мая 2021 г., г. Пермь, Российская Федерация;
- 6) Китайско-Российский форум молодых ученых в области геотехники и подземного строительства. 14–15 сентября 2022 г., г. Москва, Российская Федерация.

Публикации. По теме диссертации опубликовано (6) научных работ, в том числе (3) статьи в журналах, из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», и (3) работы опубликованы в журналах, индексируемых в международной реферативной базе Scopus.

В диссертации использованы результаты научных работ, выполненных автором – соискателем ученой степени кандидата технических наук – лично и в соавторстве.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет (110) страниц, (63) рисунка, (5) таблиц.

Автор считает приятным долгом поблагодарить своего научного руководителя д.т.н., профессора Знаменского Владимира Валериановича за помощь и проявленное терпение и всех сотрудников кафедры за доброжелательное отношение и поддержку.

От всего сердца благодарю Российскую Федерацию и ее народ за незабываемые дни учебы в вашей прекрасной стране.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы исследований, степень ее разработанности, цель работы, задачи исследования, объект и предмет исследования, научная новизна работы, ее практическая и теоретическая значимость, методология и методы исследований, выносимые на защиту положения, степень достоверности результатов исследования, сведения об апробации работы и публикациях, информация об объеме и структуре выполненной диссертационной работы.

В первой главе приведены данные об устройстве и применении щебеночных свай в строительстве, выполнен анализ результатов исследований их работы в слабых глинистых грунтах полевыми, лабораторными и численными методами, рассмотрены методы их расчета. Отмечено, что большинство исследований работы и методов расчета щебеночных свай основаны на концепциях элементарной ячейки или гомогенизированного материала, которые

пренебрегают эффектом взаимодействия щебеночных свай, что существенно сказывается на точности определения их осадок. Обоснована необходимость проведения дальнейших более детальных исследований работы отдельных фундаментов на щебеночных сваях с целью установления зависимости их осадок от различных факторов и разработки инженерной методики расчета, свободной от концепции элементарной ячейки. В заключение главы приведена в виде блок-схемы методология проведения намеченных в диссертационной работе исследований (Рисунок 1).

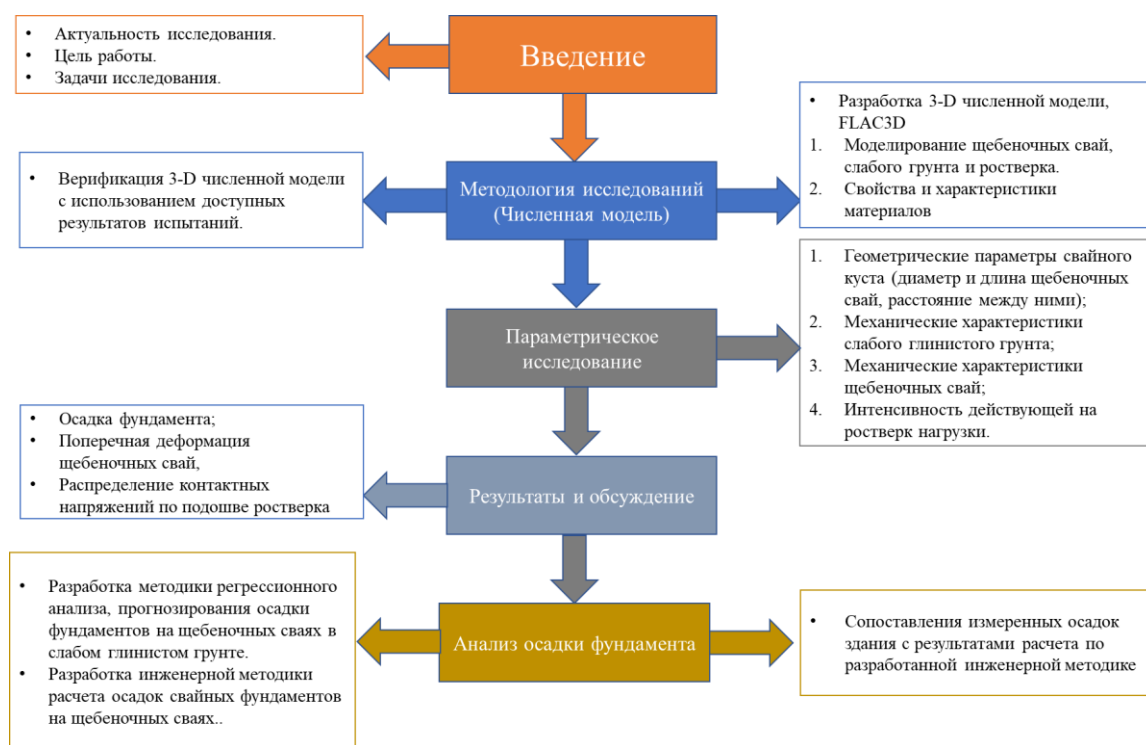


Рисунок 1- Блок-схема методологии исследования

Вторая глава посвящена численным исследованиям работы отдельных фундаментов на щебеночных сваях в слабом глинистом грунте. Исследование проводилось методом конечных элементов с использованием трехмерной конечно-разностной численной модели FLAC3D. Слабый грунт и щебеночные сваи моделировались по упругопластической модели, основанной на критерии разрушения Мора-Кулона, ростверк - по упругой модели.

Фундамент состоял из 4-х щебеночных свай и жесткого ростверка, нагруженного равномерно-распределенная нагрузка на ростверк (Рисунок 2-а).

Трехмерная четверть осесимметричной модели фундамента показана на Рисунке 2-б. Размеры модели были выбраны таким образом, чтобы ее границы находились достаточно далеко и не создавали какие-либо ограничения или локализацию деформаций. Исходя из этих условий ширина и длина модели грунта составляла $10B$, где B - ширина ростверка. Сетка модели была сгущена под ростверком и рядом с его краями в зоне развития наиболее высоких напряжений и деформаций.

Вертикальные границы модели принимались свободными по вертикали и ограничены от смещений по горизонтали ($u_x = 0$; $u_y = 0$ и $u_z = \text{свободно}$), нижняя граница модели ограничивалась от смещения как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях ($U_x=U_y=U_z=0$).

За исходное напряженно-деформированное состояния (НДС) грунтового массива принималось окончание бурения полости под сваю. Начальные напряжения определялись с использованием коэффициента бокового давления грунта (k_0). Для слабого глинистого грунта $k_0 = 0,7$, для щебеночной сваи $k_0 = 1 - \sin(\phi)$.

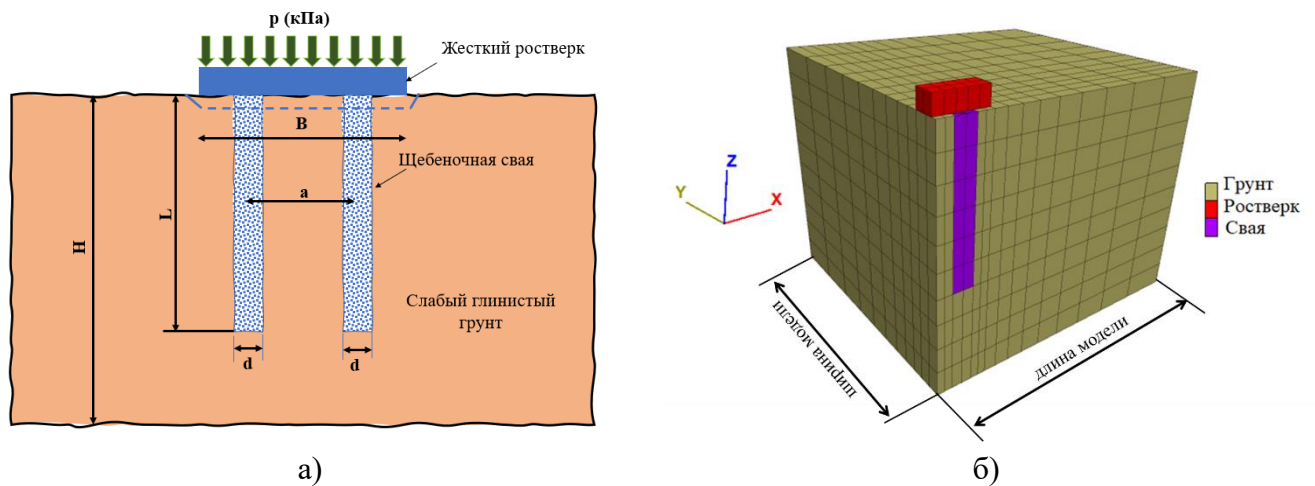


Рисунок 2- а) Расчетная схема, б) FLAC3D модель

Для верификации разработанной модели были использованы результаты лабораторных испытаний щебеночной сваи Murugesan и Rajagopal, 2010 г. Сравнение результатов расчетов с результатами испытаний показало их хорошее совпадение (Рисунок 3), что позволяет использовать разработанную модель для проведения намеченных в диссертационной работе исследований, программа которых представлена в Таблице 1.

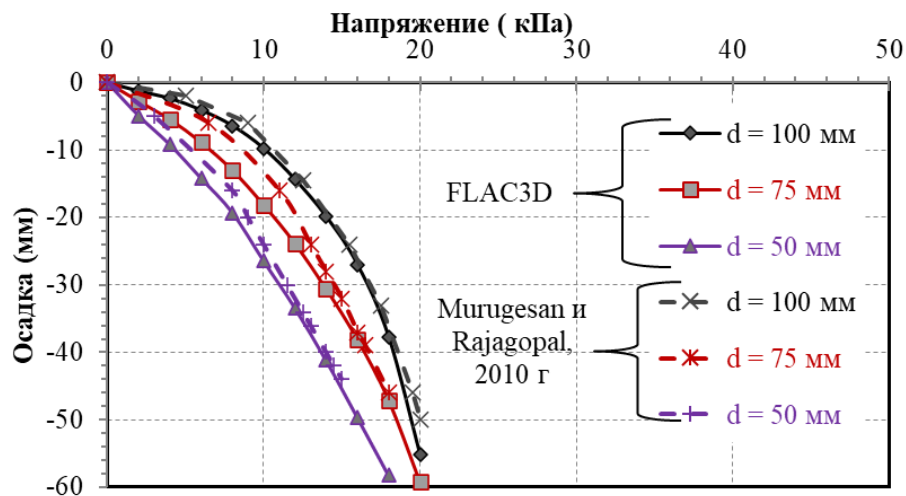


Рисунок 3 - Сравнение результатов FLAC3D с результатами лабораторной модели Murugesan и Rajagopal, 2010 г.

Таблица 1 - Программа параметрических исследований

Параметр	Значение параметра	Единица изм.
Геометрия щебеночной сваи		
Диаметр щебеночной сваи (d)	0,6; 0,8; 1,0; 1,2	м
Коэффициент замещения площади (A_r)	7; 12,6; 19,6; 28,3	%
Расстояние между щебеночными сваями (a)	1,5; 2,0; 2,5	м
Длина щебеночной сваи (L)	4,0; 6,0; 8,0; 10,0	м
Свойства слабого глинистого грунта		
Модуль деформации слабого глинистого грунта (E_s)	1000; 3000; 5000	кПа
Угол трения слабого глинистого грунта (ϕ_s)	20; 25; 30	°
Коэффициент сцепления слабого грунта (c_s)	0,1; 2,5; 5,0	кПа
Свойства щебеночной сваи		
Угол трения материала щебеночной сваи (ϕ_c)	35; 40; 45	°
Коэффициент бокового давления грунта (K)	0,7; 1,0; 1,5; 2,0	--

Всего в рамках данного анализа было рассмотрено 276 случаев. Основными исследованными взаимосвязями являлись:

- осадка отдельных фундаментов (кустов свай) на щебеночных сваях;
- поперечная (боковая) деформация щебеночных свай;
- распределение контактных напряжений по подошве ростверка.

Осадка отдельных фундаментов на щебеночны сваях

По результатам расчетов были построены графики зависимости осадки от нагрузки $s = f(p)$ для фундаментов на сваях различного диаметра (d) при различных значениях a, L, E_s , ϕ_s , c_s , ϕ_c и K.

Анализ указанных графиков показал следующее.

Осадка отдельного фундамента на щебеночных сваях уменьшается с увеличением диаметра свай и, следовательно, коэффициента замещения площади (A_r), с увеличением длины свай до глубины порядка 6,0 м, а затем остается практически без изменения, с увеличением модуля деформации глинистого грунта (E_s) и его прочностных характеристик ϕ_s и c_s , при увеличении угла внутреннего трения материала сваи (ϕ_c) и коэффициента бокового давления грунта (K) и увеличивается с увеличением осевого расстояния между сваями (a).

Наибольшее влияние на уменьшение осадки куста щебеночных свай оказывает коэффициент замещения площади (A_r), модуль деформации глинистого грунта (E_s), угол

внутреннего трения слабого глинистого грунта (ϕ_s) и угол внутреннего трения материала свай (ϕ_c).

В качестве примера на Рисунке 4 показаны полученные графики зависимости $s = f(p)$ для кустов щебеночных свай различного диаметра. Для сравнения на том же рисунке показан аналогичный график для фундамента без свай.

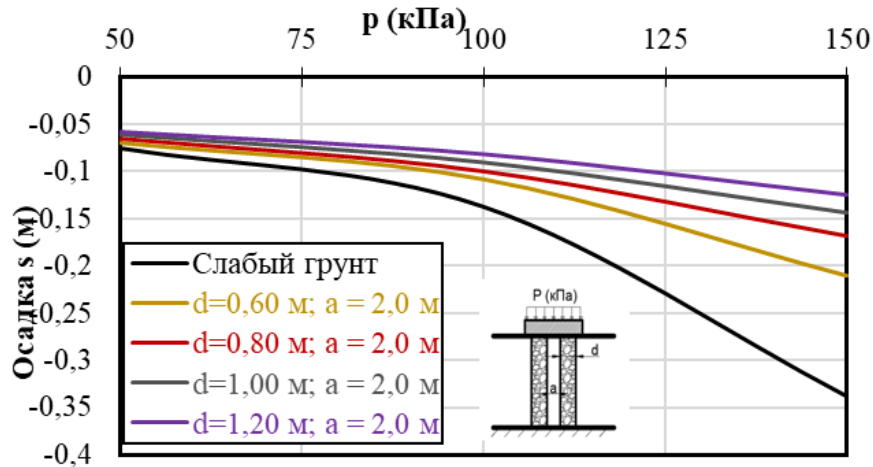


Рисунок 4 - Диаграммы зависимости $s = f(p)$ для кустов на щебеночных сваях различного диаметра при осевом расстоянии между ними $a = 2,0$ м

Для оценки влияния рассмотренных факторов на снижение осадки куста щебеночных свай был использован безразмерный коэффициент снижения осадки фундамента (β), равный отношению осадки фундамента на щебеночных сваях к осадке фундамента без свай.

На Рисунке 5 приведены диаграммы, показывающие соотношение между β и A_r для различных значений нагрузки на ростверк (p) и осевого расстояния между сваями (a). Диаграммы показывают, что коэффициент β уменьшается с увеличением p и уменьшением a . При увеличении A_r коэффициент β плавно уменьшается практически независимо от осевого расстояния между сваями (a).

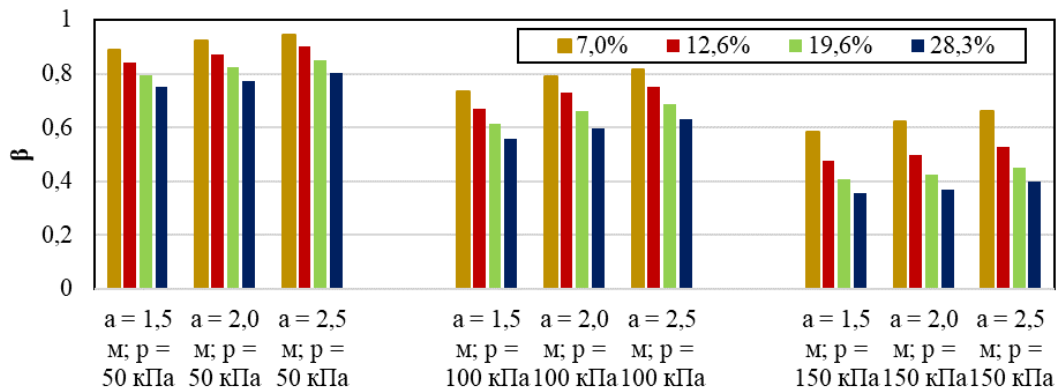


Рисунок 5 - Диаграммы, отражающие зависимость коэффициента β от A_r для различных значений нагрузки на ростверк (p) и осевого расстояния между сваями (a)

Аналогичные диаграммы, отражающие зависимость коэффициента β от A_r при различных значениях E_s , ϕ_s , c_s , ϕ_c и K . показали, что эффективность применения щебеночных свай повышается с уменьшением угла внутреннего трения грунта (ϕ_s), коэффициента сцепления грунта (c_s), увеличением угла трения материала сваи (ϕ_c), коэффициента бокового давления грунта (K) и повышением коэффициента замещения площади (A_r). Изменению модуля деформации грунта (E_s) мало влияет на изменение коэффициента β .

На Рисунке 6 приведены графики $\beta = f(L/B)$, которые показывают, что коэффициент β быстро уменьшается с увеличением длины свай пока она не достигнет значения, равного ширине ростверка (B), затем медленно уменьшается до длины сваи L , составляющей $1,5 B$, а затем остается практически постоянной. Можно считать, что $L = 1,5 B$ является критической длиной щебеночной сваи, дальнейшее увеличение которой не оказывает существенного влияния на осадку фундамента.

Этот результат имеет важное значение, поскольку позволяет установить рациональную длину щебеночных свай при их использовании для передачи нагрузки на основание отдельными фундаментами (кустами свай).

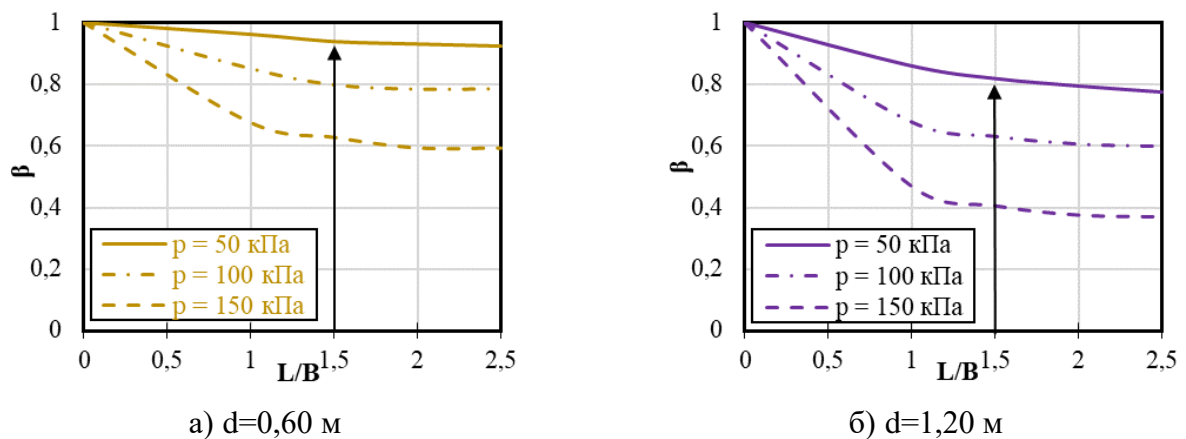


Рисунок 6 – Графики зависимости $\beta = f(L/B)$

Поперечная деформация щебеночных свай

На Рисунке 7 показаны графики изменения с глубиной отношения горизонтального смещения боковой поверхности сваи (поперечной деформации) к ее диаметру U_x/d для разных диаметров щебеночной сваи, разных значений относительного расстояния между сваями (a) и интенсивности нагрузки на фундамент (p). Графики показывают, что поперечная деформация сваи уменьшается с увеличением ее диаметра (d), уменьшением нагрузки (p) и относительного расстояния (a). Поперечная деформация щебеночной сваи изменяется от очень малого значения в ее верхней части и увеличивается до пикового значения на глубине $(1,0-2,0) d$ от поверхности грунта, а затем резко уменьшается и становится незначительной на глубине, зависящей от

нагрузки (p): при $p = 50$ кПа на глубине, равной 0,5 В, при $p = 100$ кПа на глубине, равной 1,0 В, и при $p = 150$ кПа на глубине, равной 1,5 В.

Что касается щебеночных свай большого диаметра, их способность увеличиваться в поперечном размере по сравнению со сваями малого диаметра невелика.

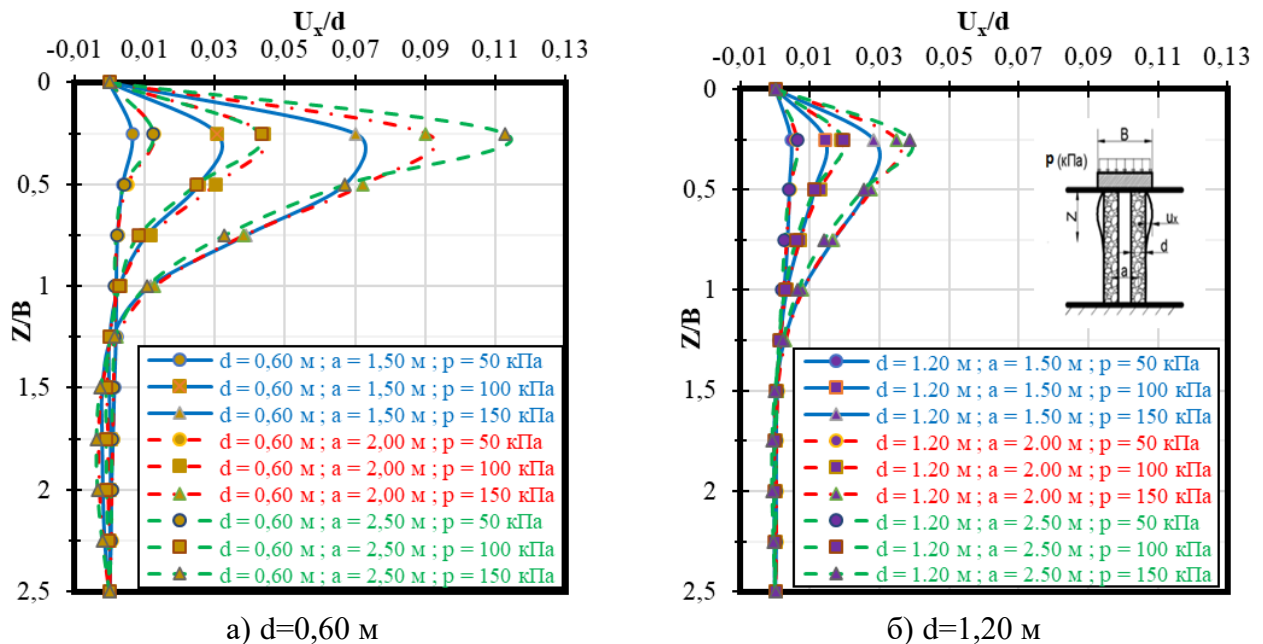


Рисунок 7 - Графики изменения поперечной деформации сваи с глубиной при различных значениях a и нагрузки p для: а) $d=0,60$ м и б) $d=1,20$ м

Аналогичные графики были получены для всех размеров свай, характеристик материалов и нагрузок на фундамент, предусмотренных программой параметрических исследований (Таблица 1). Анализ полученных результатов показал следующее:

- основной причиной осадки отдельного фундамента на щебеночных сваях является их поперечная деформация;

- поперечная деформация сваи уменьшается с увеличением ее длины (L), диаметра (d) и уменьшением нагрузки (p);

- максимальная поперечная деформация сваи увеличивается с уменьшением модуля деформации грунта (E_s), угла трения слабого глинистого грунта (ϕ_s) и его коэффициента сцепления (c_s). Следовательно, чем меньше значения E_s , ϕ_s и c_s , тем больше поперечная деформация сваи и осадка фундамента;

- поперечная деформация сваи значительно уменьшается при увеличении угла трения материала сваи (ϕ_c) и коэффициента бокового давления грунта (K). Уменьшается и осадка фундамента.

Распределение контактных напряжений по подошве ростверка

На Рисунке 8 показаны эпюры нормализованного контактного напряжения под ростверком (σ'/p) в точках, определяемых отношением ($2r/B$), где r - расстояние от центра

ростверка. Из рисунков видно, что для каждого случая существует три зоны: первая зона расположена между щебеночными сваями (зона А), вторая зона - на щебеночной свае (зона В) и третья зона - внешняя зона (зона С). Нормализованное напряжение в зоне (А) увеличивается с уменьшением расстояния между щебеночными сваями, в зоне (В) максимальное значение нормализованного напряжения расположено в центре щебеночной сваи и уменьшается с увеличением ее диаметра, в зоне (С) нормализованные напряжения уменьшаются с уменьшением диаметра сваи.

Эпюры нормализованных контактных напряжений в указанных зонах имеют разную форму. В зоне (В) эпюра имеет форму колокола при $d=0,60$ м и выполаживается по мере увеличения диаметра сваи. В зоне (С) форма эпюры и значения реактивных давлений мало зависят от диаметра сваи и могут приниматься одинаковыми для всех рассмотренных случаев.

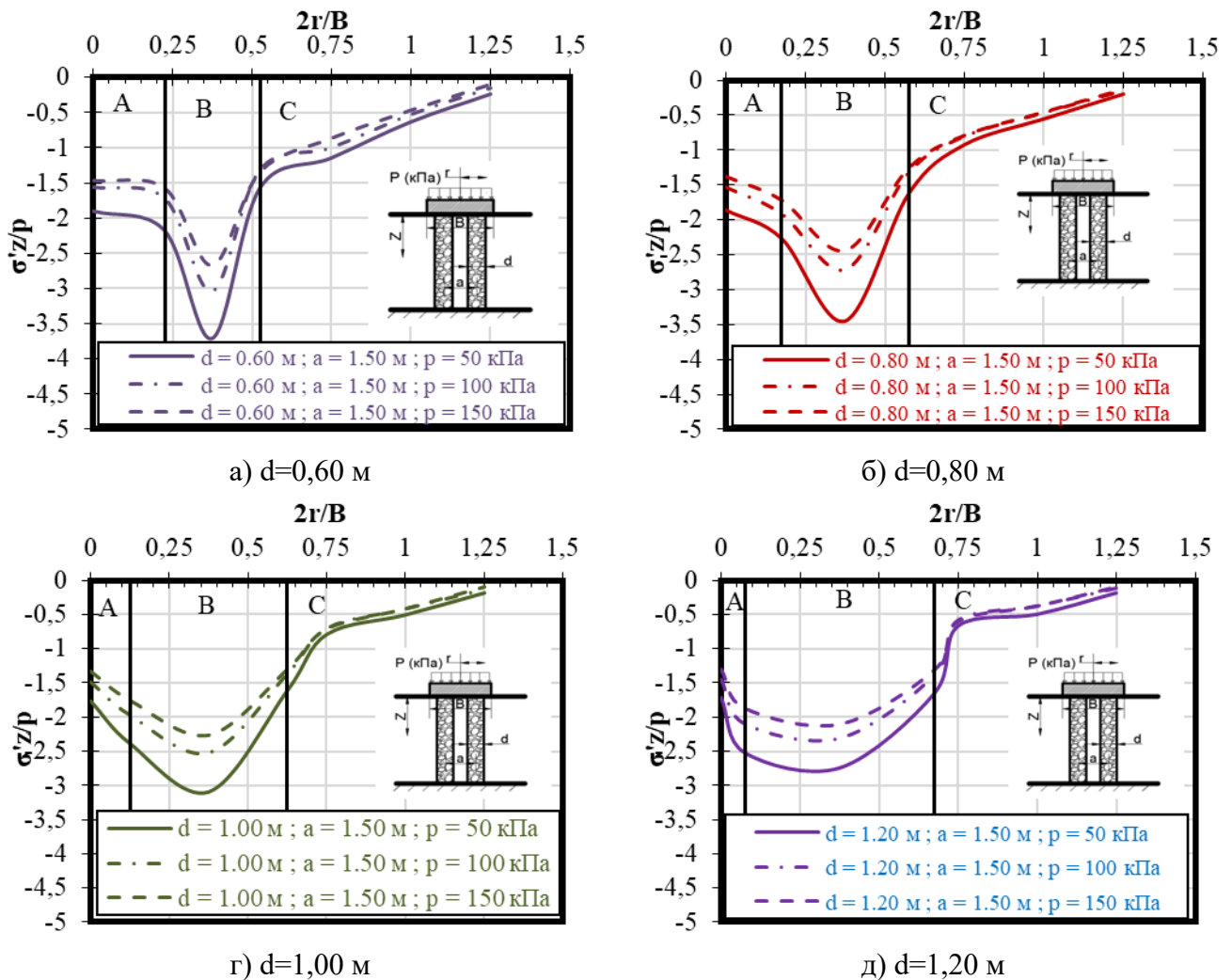


Рисунок 8 - Распределение контактных напряжений при $a = 1,50$ м

В третьей главе дана оценка рассмотренным в Главе 1 диссертации аналитическим методам расчета с точки зрения точности определения по ним осадок отдельных фундаментов на щебеночных сваях в слабом глинистом грунте и разработана модель, адекватно

отражающую фактическую работу кустов из щебеночных свай с учетом, в отличие от существующих моделей, их взаимного влияния.

Собранная по результатам проведенных численных исследований база данных, необходимых для установления зависимости осадки фундамента (s) от исследованных факторов, содержит 178 записей.

Описательная статистика собранной базы данных приведена в Таблице 2.

Таблица 2 - Описательная статистика собранной базы данных

Параметр	Минимум	Максимум	Среднее значение	Стандартное отклонение	Единица изм.
d	0,6	1,2	0,90	0,218	м
a	1,5	2,5	2	0,184	м
Ar	7	28,3	16,9	7,774	%
L	4	10	9,2	1,772	м
Es	1000	5000	3000	736,460	кПа
ϕ_s	20	30	25	1,762	°
cs	0,1	5	0,60	1,332	кПа
ϕ_c	35	45	40	1,841	°
p	50	150	99,4	40,821	кПа
s	-0,700	-0,034	-0,118	0,093	м

Параметр K, отражающий влияние устройства щебеночных свай на их осадку, из-за трудности определения был принят постоянным и равным 0,7 во всех 178 случаях.

Собранная база данных была использована для оценки существующих аналитических методов расчета, точность которых определялась путем вычисления средней абсолютной ошибки (AAE), среднего значения (M), стандартного отклонения отношения статистического к полученному численному значению (CoV) и стандартное отклонение (CD). Указанные статистические показатели эффективности были рассчитаны с использованием коэффициентов (1–3):

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{s_{\text{прог } i} - s_{\text{ожд } i}}{s_{\text{ожд } i}} \right|}{n} \quad (1)$$

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{s_{\text{прог } i}}{s_{\text{ожд } i}}}{n} \quad (2)$$

$$CoV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{s_{\text{прог } i}}{s_{\text{ожд } i}} - M \right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

В приведенных формулах $s_{\text{прог}}$ - прогнозируемое значение осадки, полученное аналитическим методом; $s_{\text{ожд}}$ - ожидаемое значение осадки, определенное численным расчетом; n - количество расчетов.

Результаты выполненного сравнения представлены на Рисунках 9, 10.

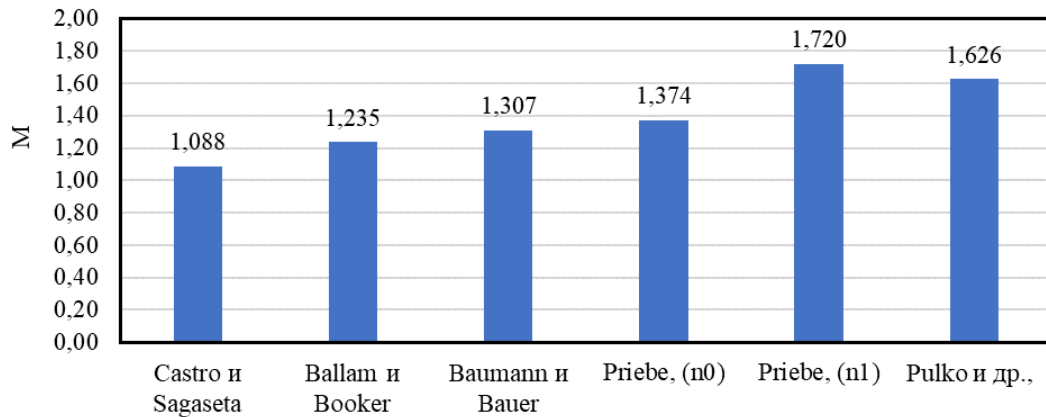


Рисунок 9 - Средние соотношения между теоретическим и численным анализом (M).

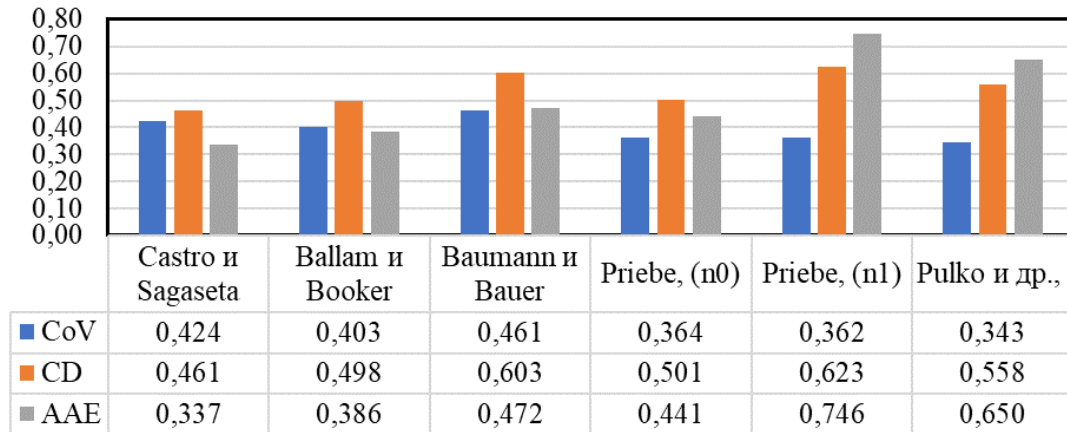


Рисунок 10 - CoV, CD и AAE между теоретическим и численным анализом

Существует несколько способов использования данных, приведенных в Таблице 2, для прогнозирования осадки отдельных фундаментов (кустов свай) на щебеночных сваях в слабых глинистых грунтах, одним из которых является метод регрессионного анализа.

Регрессионная модель получена с помощью программы SPSS.

Результаты регрессионного анализа показали, что существует существенная взаимосвязь между s и независимыми переменными. На рисунке 11-а приведен график зависимости прогнозируемых и ожидаемых значений осадки фундаментов на щебеночных сваях в слабых глинистых грунтах, с помощью мульти-линейной регрессии. Точки на графике достаточно плотно группируются вокруг диагональной линии, т. е. полученная модель хорошо согласуется с результатами базы данных. Уравнение (4) принимает вид:

$$\frac{s}{H} = 0,00324 - 0,00877 Ar + 0,00134 \frac{a}{d} - 0,00041 \frac{L}{B} - 3,1772 \frac{cs}{E_s} + 0,00235 \frac{1-\sin(\phi_s)}{1-\sin(\phi_c)} + 0,2934 \frac{P}{E_s} \quad (4)$$

Более того, на рисунке 11-б приведен график зависимости прогнозируемых и ожидаемых значений осадки фундаментов на щебеночных сваях в слабых глинистых грунтах, с помощью

нелинейной регрессии. Точки на графике достаточно плотно группируются вокруг диагональной линии. Уравнение (5) принимает вид:

$$s = (\beta) \frac{P \times H}{E_s} = \left(0,052 \times \frac{\frac{a^{0,22} \times \frac{1 - \sin(\phi_s)^{0,32}}{1 - \sin(\phi_c)}}{Ar^{0,16} \times \frac{L^{0,03}}{B} \times \frac{cs^{0,115}}{E_s}}}{E_s} \right) \frac{P \times H}{E_s} \quad (5)$$

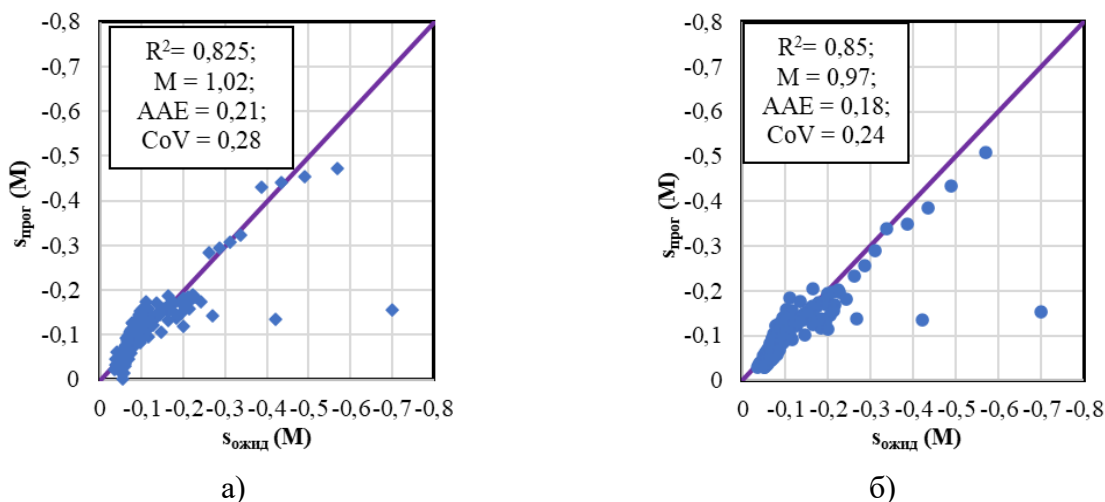


Рисунок 11 - Зависимости между прогнозируемыми и ожидаемыми значениями (s), полученные по: а) - модели мульти-линейной регрессии; б) - модели нелинейной регрессии

Разработанные модели можно рассматривать как инженерное решение задачи определения осадки отдельного фундамента на щебеночных сваях с учетом их взаимного влияния. Расчет и проектирование ведутся в последовательности, показанной на рисунке 12.

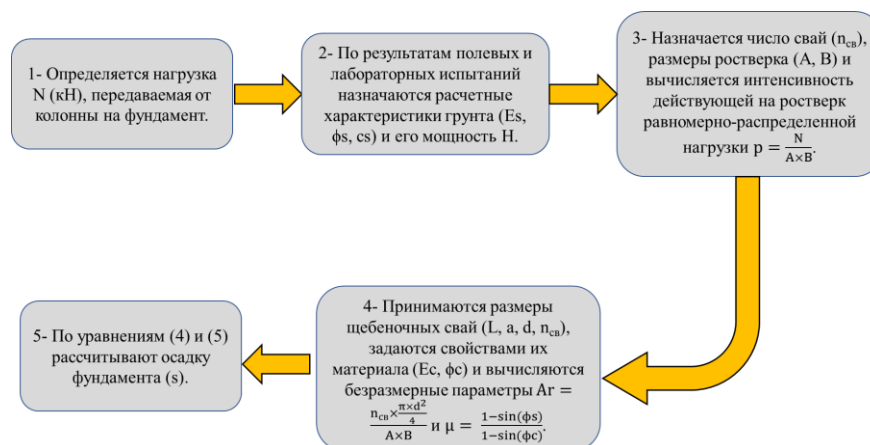


Рисунок 12 - Последовательность расчета

Одним из примеров применения щебеночных свай для устройства отдельных фундаментов под колонны каркасных зданий является строительство состоящего из 80-ти шестиэтажных зданий жилого комплекса в городе Порт Фуад (Египет) со средней нагрузкой на основание порядка 100 кПа.

Геологический разрез строительной площадки, показанный на Рисунке 13, с поверхности до глубины 5,0 м состоит из слабой глины, подстилаемой слоем песка мощностью 6,0 м. Далее идет слой илистого песка толщиной 2,0 м, который подстилается слоем слабой глины до

разведанной глубины 20,0 м. Подземные воды находятся на глубине 1,0 м ниже поверхности грунта.

Характеристики грунтов, слагающих геологический разрез, приведены в Таблице 3.

Отдельные фундаменты под колонны каркаса здания состояли из 5-ти щебеночных свай диаметром 1,0 м, длиной 6,0 м, с осевым расстоянием $a = 2,15$ м (рисунок 14) при коэффициенте замещения площади $A_r = 24$ %.

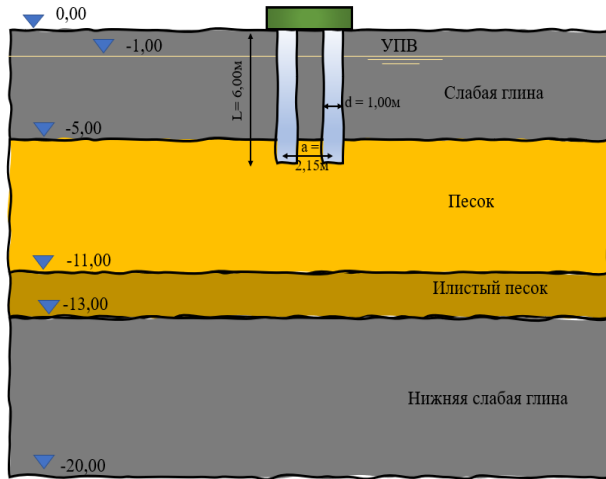


Рисунок 13 - Стратификация грунтов

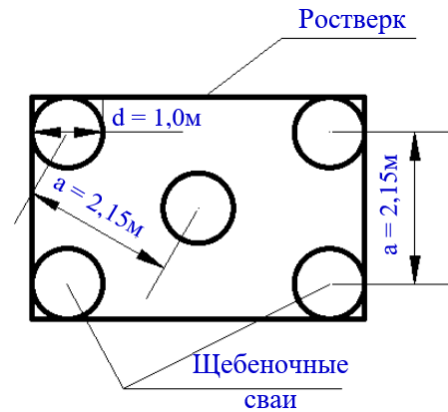


Рисунок 14 - Схема расположения щебеночных свай

Таблица 3 - Характеристики грунты на объекте строительства

Параметр	Щеб. свая	Слабая глина	Песок	Илстый песок	Нижняя слабая глина
Глубина (м)	0,0 – 6,0	0,0 – 5,0	5,0 – 11,0	11,0 – 13,0	13,0 – 20,0
γ_b (кН/м ³)	20,0	16,5	18,5	18,5	17,5
c (кПа)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
ϕ °	40	20	35	32	20
E (мПа)	100	2	50	20	5

Средняя осадка фундаментов здания, отслеживаемая в течение 508 дней, составила 129 мм, при пересчете осадки с использованием формулы (5) осадка составила 133 мм с погрешностью примерно 3%, что можно считать вполне удовлетворительным результатом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненными в диссертационной работе экспериментальными исследованиями подтверждена возможность использования щебеночных свай для передачи нагрузки от сооружения на основание и определена рациональная область их применения, ограниченная зданиями и сооружениями, конструкции которых могут выдерживать относительно большие осадки, такие, например, как малоэтажные здания, резервуары, насыпи и т.п.).

2. Численными исследованиями установлено, что осадка отдельных фундаментов на щебеночных сваях (кустов свай) зависит от различных факторов, к которым относятся длина (L) и диаметр (d) свай, коэффициент замещения площади (A_r), осевое расстояние между щебеночными сваями (a), модуль деформации грунта (E_s), угол внутреннего трения грунта (ϕ_s), коэффициент сцепления глинистого грунта (c_s), угол внутреннего трения материала щебеночной сваи (ϕ_c), коэффициент бокового давления грунта (K) и интенсивность равномерно-распределенной нагрузки на ростверк (p).

3. Осадка куста щебеночных свай уменьшается с увеличением длины и диаметра свай, коэффициента замещения площади, модуля деформации грунта, угла внутреннего трения грунта, коэффициента сцепления глинистого грунта, угла внутреннего трения материала щебеночной сваи и коэффициента бокового давления грунта и увеличивается с увеличением интенсивности равномерно-распределенной нагрузки на ростверк и увеличением осевого расстояния между щебеночными сваями.

4. Применение щебеночных свай для снижения осадки свайного фундамента целесообразно до длины свай, составляющей 1,5 ширины ростверка. Это так называемая «критическая длина», превышение которой не приводит к дальнейшему снижению осадки фундамента.

5. Осадка фундамента существенным образом зависит от горизонтальных деформаций боковой поверхности щебеночных свай, которые увеличиваются с уменьшением диаметра и длины свай, модуля деформации грунта, угла внутреннего трения грунта, коэффициента сцепления глинистого грунта, угла внутреннего трения материала щебеночной сваи и коэффициента бокового давления грунта и уменьшается с уменьшением интенсивности равномерно-распределенной нагрузки на ростверк и осевого расстояния между щебеночными сваями.

6. Нагрузка, передаваемая ростверком на щебеночные сваи, увеличивается с увеличением модуля деформации грунта и угла внутреннего трения материала щебеночной сваи и уменьшается с увеличением ее диаметра и коэффициента сцепления глинистого грунта.

7. Разработанные новые модели мульти-линейной и мульти-нелинейной регрессии позволяют рассчитать осадку фундамента на щебеночных сваях со средней абсолютной ошибкой (ААЕ) и средним значением (M) меньшими, чем при расчете по известным методам. Применение предложенной методики на объекте Порт Фуад в Египте показало удовлетворительное совпадение полученных расчетом осадок с результатами мониторинга.

8. Предложенная инженерная методика, основанная на разработанных моделях регрессии, рекомендуется для расчета осадок фундаментов на щебеночных сваях проектируемых объектов, возводимых на слабых глинистых грунтах, в частности в Египте в средней и северной частях дельты реки Нил, где распространены залегающие с поверхности слабые глинистые грунты.

Устройство экономически эффективных, экологически чистых и наименее затратных в изготовлении при помощи относительно простой техники типов фундаментов позволяет вести здесь массовую застройку.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Направлениями дальнейшей разработки темы являются:

- 1) Исследование работы фундаментов на щебеночных сваях в оболочках из геосинтетических материалов;
- 2) Разработка методики расчет отдельных фундаментов на щебеночных сваях по первому предельному состоянию;
- 3) Лабораторные и полевые модельные и натурные испытания фундаментов на щебеночных сваях для подтверждения и коррекции результатов, полученных численным моделированием.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

- 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. 2-7.
- 2) Знаменский В.В., Сайед Д.А. Результаты исследования работы фундаментов на щебеночных сваях в слабом глинистом грунте // Инновации и инвестиции. – 2022. – №8. – С. 94–99.
- 3) Знаменский В.В., Сайед Д.А. Прогнозирование осадки фундамента на щебеночных сваях в слабых глинистых грунтах // Экономика строительства. – 2022. – №9. – С. 88–95.

Печатные работы в изданиях индексируемых Scopus:

- 4) 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.
- 5) Znamenskii V. V., Sayed D. A. Comparison between analytical method and numerical model for footings on soft clay supported by stone columns //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1425. – №. 1. – С. 012075.
- 6) Znamenskii V., Sayed D. Influence of Stone Column Length on the Settlement of Soft Clayey Layer //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 661. – №. 1. – С. 012102.