

На правах рукописи



БОКОВ ИГОРЬ АЛЕКСЕЕВИЧ

**РАСЧЕТ ОСАДОК СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ
СО СВАЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИНЫ**

Специальность: 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство» – Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова (АО «НИЦ «Строительство» – НИИОСП им. Н.М. Герсеванова)

Научный руководитель: Кандидат технических наук,

Федоровский Виктор Григорьевич

Официальные оппоненты: **Власов Александр Николаевич**

доктор технических наук, профессор,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт прикладной механики Российской академии наук» (ФГБУН «ИПРИМ РАН»), директор

Шашкин Константин Георгиевич

кандидат технических наук,

Общество с ограниченной ответственностью «Институт архитектурно-строительного проектирования, геотехники и реконструкции» (ООО «ПИ Геореконструкция»), зам. генерального директора

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Фундаментпроект» (ОАО «Фундаментпроект»)

Защита состоится «10» февраля 2021 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Шулятьев Станислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время, в промышленном и гражданском строительстве наблюдается постоянный рост доли свайных фундаментов (СФ). Указанная тенденция объясняется постоянным ростом нагрузок на основание, застройкой территорий ранее считавшихся малопригодными для строительства, ростом масштабности и сложности строительства в целом.

Для повышения эффективности применения свайных фундаментов разрабатываются новые направления свайных фундаментов и комбинации с известными, новые виды свай и способы их устройства, строительная техника для их изготовления. Постоянно совершенствуются методы расчета свайных фундаментов.

Одним их наиболее новых и перспективных видов свайных фундаментов являются фундаменты со сваями различной длины. Целью их применения является улучшение технических и экономических показателей, заключающееся в снижении относительной неравномерности деформаций фундамента и в снижении материалоемкости соответственно относительно варианта с постоянной длиной свай.

Указанные эффекты достигаются путем локального изменения (регулировки) жесткости (податливости) отдельных свай в составе группы свай, за счет уменьшения или увеличения длины индивидуальных свай.

Задача применения свай различной длины в составе одной группы приобретает актуальность с ростом числа задач повторного использования свайных фундаментов при реконструкции в условиях мегаполисов, когда в существующий свайный фундамент добавляются новые сваи, длина которых может отличаться от выполненных ранее.

Не менее актуальна рассматриваемая проблема при анализе свайных оснований, где различная длина свай обусловлена невозможностью погружения сваи заводского изготовления до требуемой отметки или низким качеством производства работ.

Рассматривая многообразие свайных фундаментов, можно отметить, что проектирование свайных фундаментов со сваями различной длины характеризуется

весьма высокой степенью сложности расчетов, что является одним из главных факторов, ограничивающих применение таких фундаментов.

В настоящее время, за исключением численных методов, методы расчета осадок свайных фундаментов со сваями различной длины отсутствуют. Более того, даже для фундаментов со сваями равной длины, большинство широко применяемых методов расчета осадок рассматривают свайный фундамент как некоторое, весьма существенное геометрическое упрощение (условный фундамент, условная свая), что не позволяет рассматривать жесткости отдельных свай в составе свайного фундамента и учитывать такие базовые параметры как шаг и положение свай.

Тем не менее, объемы применения фундаментов со сваями различной длины растут. С каждым годом сфера применения технологии выходит за рамки области фундаментостроения высотных зданий, где впервые были применены такие фундаменты, и распространяется на обыкновенные жилые здания, производственные объекты и даже объекты дорожного строительства.

Степень разработанности темы

На настоящий момент практика проектирования свайных фундаментов со сваями различной длины характеризуется отсутствием простых методов расчета. Расчёты, как правило, выполняются по методу конечных элементов или с применением программного обеспечения, использующего основные принципы механики грунтов и теории упругости с существенными допущениями. При этом грубость расчетных допущений существенно влияет на точность расчёта.

Цель исследования

Целью исследования является разработка способа расчета осадок свайных фундаментов со сваями различной длины.

Задачи исследования

- Выполнить обзор и анализ теоретических и экспериментальных исследований влияния наличия свай различной длины на осадку фундамента по публикациям отечественных и зарубежных авторов.
- Провести исследование зависимости осадки сваи и окружающего ее грунта от схемы грунтового основания для условий однородного упругого

полупространства, двухслойного упругого полупространства и упругого слоя конечной толщины подстилаемого несжимаемым основанием.

- Разработать методику моделирования пространственной задачи об определении осадки ненагруженной сваи в составе группы из двух свай, одна из которых нагружена, на основе численного решения задачи об осадке одиночной сваи и окружающего ее грунта в осесимметричной постановке.
- Определение допустимости подхода о распространении результатов решения задачи об осадке ненагруженной сваи в составе группы из двух свай, одна из которых нагружена, на группу большого размера.
- Провести исследование по определению осадки ненагруженной сваи в составе группы из двух свай разной длины, одна из которых нагружена.
- Разработать эффективный с точки зрения вычислительных затрат способ расчета свайного фундамента со сваями различной длины, обладающий удовлетворительной точностью и учитывающий нелинейный характер работы грунта вблизи свай.
- Определение достоверности предлагаемого метода путем сопоставления результатов расчетов по предлагаемому способу с результатами расчетов по наиболее точному известному методу (численный метод) и с опубликованными результатами расчетов другими методами, с опубликованными результатами экспериментов и результатами натурных наблюдений за осадками существующих зданий и сооружений.

Научную новизну диссертационной работы составляют

- На основе исследований взаимодействия сваи с грунтом, проведенных численными методами, выявлены характерные особенности осадки сваи и окружающего ее грунта для расчетных схем грунтового основания в виде однородного упругого полупространства, двухслойного упругого полупространства и упругого слоя конечной толщины подстилаемого несжимаемым слоем.
- Разработана новая методика расчета осадки свайной группы, в отличие от существующих, позволяющая учитывать большее количество свай в группе и различные расчетные схемы грунтовых условий.

- На основе результатов теоретических исследований разработана новая методика расчета осадки ненагруженной сваи в составе группы из двух свай различной длины, одна из которых нагружена.

Теоретическая значимость работы

- Выявлены и численно описаны зависимости осадки сваи и окружающего грунта для расчетных схем грунтового основания в виде однородного упругого полупространства, двухслойного упругого полупространства и упругого слоя конечной толщины подстилаемого несжимаемым слоем.
- Определен радиус распространения осадки и характер изменения ее величины для рассмотренных расчетных схем грунтового основания.
- Выявлена зависимость осадки ненагруженной сваи в группе из двух свай одна из которых нагружена от осадки грунта, возникающая в результате вдавливания одиночной сваи.
- Проведена количественная оценка зависимости осадки нагружаемой сваи в составе группы в зависимости от шага и количества ненагруженных свай.
- Получены зависимости осадки и радиуса влияния одиночной сваи расположенной в упругом слое конечной толщины от его относительной толщины.

Практическая значимость работы

- Разработан способ расчета свайных фундаментов со сваями различной длины обладающий удовлетворительной точностью.
- Разработаны инженерные методы расчета осадки ненагруженной сваи в составе группы из двух свай одна из которых нагружена для условий однородного упругого полупространства, двухслойного упругого полупространства и упругого слоя конечной толщины подстилаемого несжимаемым слоем.
- Произведена оценка точности и определены границы применения формулы 7.4.2 СП 24.13330.2011.
- Разработан инженерный метод расчета осадки грунта вокруг сваи для одиночной сваи расположенной в упругом слое конечной толщины подстилаемым несжимаемым основанием.

- Предложен поправочный коэффициент к величине осадки свайного фундамента рассчитанной по методике 7.4 СП 24.13330.2011 учитывающий разницу характера работы группы из двух свай и большой группы свай.
- Разработана методика расчета осадки ненагруженной сваи в составе группы из двух свай, одна из которых нагружена, на основе результатов численного решения задачи об осадке одиночной сваи и окружающего ее грунта. В отличии от существующих, предлагаемая методика не требует выполнения пространственного расчета.
- Разработан алгоритм расчета свайных фундаментов со сваями различной длины с учетом нелинейного характера работы индивидуальных свай для компьютерных расчетов .

Методология и методы исследований

Работа выполнена на основе расчетно-теоретических исследований апробированных на опубликованных результатах экспериментов и наблюдений за осадками зданий и сооружений. Расчетно-теоретические исследования работы одиночной сваи, пары свай, свай разной длины и вмещающего их массива грунта проведены путем численного моделирования. Расчеты проведены в осесимметричной и пространственной постановках в сертифицированных расчетных комплексах Plaxis 2D 2018 и Plaxis 3D 2018 .

Обработка результатов, разработка алгоритма и вычисления по программе расчетов по методу коэффициентов взаимного влияния (МКВВ) производились с применением системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

Разработка аналитических аппроксимаций численных решений производилась путем сопоставления функций полученных численным расчетом с набором заранее определенных известных математических функций с различным количеством коэффициентов. Результаты сопоставления были проранжированы по методу наименьших квадратов с точки зрения соответствия вида функции теоретическим представлениям и обеспечению требуемой точности в заданном диапазоне.

Расчеты по предлагаемому методу показали удовлетворительную сходимость с результатами расчетов по наиболее точному из известных методов, опубликованными

результатами решения модельных задач и с результатами экспериментов и натурных наблюдениях за осадками зданий и сооружений на свайных фундаментах.

Личный вклад автора

- Проведении обзора и анализа теоретических и экспериментальных исследований влияния наличия свай различной длины на осадку фундамента по публикациям отечественных и зарубежных авторов.
- Разработка методики моделирования пространственной задачи об определении осадки ненагруженной сваи в составе группы из двух свай, одна из которых нагружена, на основе численного решения задачи об осадке одиночной сваи и окружающего ее грунта в осесимметричной постановке.
- Исследование зависимости осадки сваи и окружающего ее грунта от схемы грунтового основания для условий однородного упругого полупространства, двухслойного упругого полупространства и упругого слоя конечной толщины подстилаемого несжимаемым основанием.
- Исследование по определению осадки ненагруженной сваи в составе группы из двух свай разной длины, одна из которых нагружена.
- Определение допустимости подхода о распространении результатов решения задачи об осадке ненагруженной сваи в составе группы из двух свай, одна из которых нагружена, на группу большого размера.
- Разработка эффективный с точки зрения вычислительных затрат способ расчета свайного фундамента со сваями различной длины, обладающий удовлетворительной точностью и учитывающий нелинейный характер работы грунта вблизи свай.
- Определение достоверности предлагаемого метода путем сопоставления результатов расчетов по предлагаемому способу с результатами расчетов по наиболее точному известному методу (численный метод) и с опубликованными результатами расчетов другими методами, с опубликованными результатами экспериментов и результатами натурных наблюдений за осадками существующих зданий и сооружений.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся результаты разработки метода расчета осадок свайных фундаментов со сваями различной длины включающие:

- Инженерные методы расчета осадки ненагруженной сваи в составе группы из двух свай одна из которых нагружена для условий однородного упругого полупространства, двухслойного упругого полупространства и упругого слоя конечной толщины подстилаемого несжимаемым слоем.
- Методика получения приближенного решения пространственной задачи об осадке ненагруженной сваи в составе группы из двух свай, одна из которых нагружена, на основе результатов численного решения задачи об осадке одиночной сваи и окружающего ее грунта.
- Алгоритм расчета СФРД с учетом нелинейного характера работы индивидуальных свай для компьютерных расчетов.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов исследований обеспечена:

- Учетом при выполнении численных расчетов положений действующих нормативных документов;
- Использованием численных методов расчетов в сертифицированных геотехнических программных комплексах;
- Применению апробированных статистических методов при разработке аналитических аппроксимаций
- Хорошей сходимостью результатов расчетно-теоретических исследований и разработанной методики с опубликованными данными экспериментальных исследований и натуральных наблюдений отечественных и зарубежных авторов.

Апробация работы

- XVII Европейская конференция по механике грунтов и геотехнике г. Рейкьявик - 2019 г;
- XVIII Международная конференция по механике грунтов и геотехнике г. Париж - 2013 г;

- Международный форум высотного и уникального строительства 100+ г. Екатеринбург, 2016 г., 2015 г.;
- XIII Международный семинар по реологии грунтов и Международное совещание заведующих кафедр механики грунтов, оснований и фундаментов, подземного строительства и гидротехнических работ, инженерной геологии и геоэкологии строительных вузов и факультетов г. Казань, 2012 г.;

Внедрение результатов исследования осуществлено при выполнении расчётов и проектировании фундаментов на следующих объектах: Стадион Чемпионата мира ФИФА в Калининграде, Центральный стадион «Динамо» ВТБ Арена имени Льва Яшина, благодаря чему был достигнут значительный экономический эффект.

Публикации

По материалам исследований опубликовано 23 работы, в том числе 6 патентов, 17 научных работ по теме диссертации, из них 5 статей в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий по списку ВАК РФ (3,10 печатных листов, из них 1,55 выполнены автором) и 4 публикации в сборниках трудов конференций. Общий объем публикаций составляет 19,37 печатных листов, из них лично автором 4,64 печатных листа.

Структура и объем

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 213 наименований, в том числе 150 на иностранном языке. Полный объем диссертации - 150 страниц, включая 134 рисунка и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, описаны методология и методы проведения исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы.

В первой главе проведен анализ технической литературы и обзор работ отечественных и зарубежных авторов по исследованиям вопросов применения свайных фундаментов со сваями различной длины, описаны области применения. Достоинством рассматриваемых фундаментов является возможность менять распределения жесткости свай в плане, за счет локального изменения длины свай, что позволяет получить более экономичное решение фундамента без снижения надежности. К недостатком можно отнести необходимость выполнения большого количества сложных численных расчетов и отсутствие простых методик расчета.

В второй главе проанализированы работы отечественных и зарубежных авторов в части исследования вопросов расчета свайных фундаментов с постоянной и различной длиной свай по деформациям. Расчет свайных фундаментов по деформациям является одной из важнейших задач механики грунтов и фундаментостроения.

В разное время указанной проблемой занимались и внесли большой вклад отечественные ученые, такие как Барвашов В.А., Бартоломей А.А., Бахолдин Б.В., Безволев С.Г., Власов А.Н., Готман А.Л., Готман Н.З., Григорян А.А., Дзагов А.М., Джантемиров Х.А., Зерцалов М.Г., Знаменский В.В., Колыбин И.В., Курилло, С.В., Мангушев Р.А., Мирсаяпов И.Т., Петрухин В.П., Разводовский Д.Е., Ставницер Л.Р., Тер-Мартirosян А.З, Тер-Мартirosян З.Г., Улицкий В.М., Федоровский В.Г., Чунюк, Д.Ю., Шашкин А.Г., Шулятьев О.А, Ястребов П.И, а также зарубежные ученые Banerjee, P. K, Basile, F, Briaud, J.-L, Burland, J. B, Butterfield, ,Cairo, R, Caputo, V, Chow, H. S., Chow Y.K, Clancy, P, Cooke, R. W, Fleming, W. G. K, Guo, W.D, Jardine, R. J, Katzenbach, R., Lehane B., Mandolini, A., Mylonakis, G, O'Neill, M. W, Poulos, H. G, Randolph, M., Russo, G, Sheil, B, Tejchman, A, Tomlinson, M. J, van Impe, W. F, Viggiani, C, Whitaker и другие ученые.

По результатам анализа показано, что простые методы типа условного фундамента или условной сваи не подходят для расчета в силу того, что не дают информации по относительной разности осадки, не позволяют рассматривать отдельные сваи, не учитывают влияние таких основных параметров как шаг свай и его неравномерность и др. Показано, что имеющиеся методы расчета, основаны на решениях задач теории упругости с различными упрощениями геометрической модели фундамента или без них.

Для подробного расчета осадки свайного фундамента (расчета коэффициентов жесткости отдельных свай) и его деформаций требуется применение численных методов с рассмотрением каждой сваи индивидуально. Решение таких задач ограничено возможностями ЭВМ и расчетных комплексов.

Отмечено, что для расчета свайных фундаментов со сваями различной длины необходимо применять численные методы в пространственной постановке, что в свою очередь требует применение дорогостоящих расчетных комплексов, наличия квалифицированных и имеющих практический опыт применения МКЭ сотрудников в штате проектной организации. Большая продолжительность единичного расчёта, свойственная численным методам в упруго-пластической постановке, а также большое количество расчетов, требуемое для решения задачи оптимизации, ставит под сомнение применение фундаментов со сваями различной длины на рядовых строительных объектах, даже для специализированной организации.

Для разработки методики расчета свайных фундаментов со сваями различной длины выделен метод коэффициентов взаимного влияния (МКВВ) представляющийся перспективным с точки зрения его развития. Представлены основные положения МКВВ.

В третьей главе Отмечены достоинства и недостатки известных решений (СП24, Poulos (1968), Randolph (1979) и др.) для вычисления расчетной осадки одиночной сваи и зависимости осадки ненагруженной сваи от расстояния до нагруженной – функции влияния (основных параметров необходимых для расчета по МКВВ). Предложены направления и пути совершенствования методик определения указанных параметров.

На основании расчетов выявлено, что осадка ненагруженной сваи соответствует осадке грунта на глубине $z/l \approx 0,75$ и существенно отличается от общепринятой ранее (Randolph 1979, Gazetas 1998 и др.) величины $z/l=0,5$ (рис. 1 и 2). Схожие результаты описаны в экспериментальных данных ENDO (1969) и Ющубе (1986), где рассматривается поведение сваи в условиях осадки окружающего грунта.

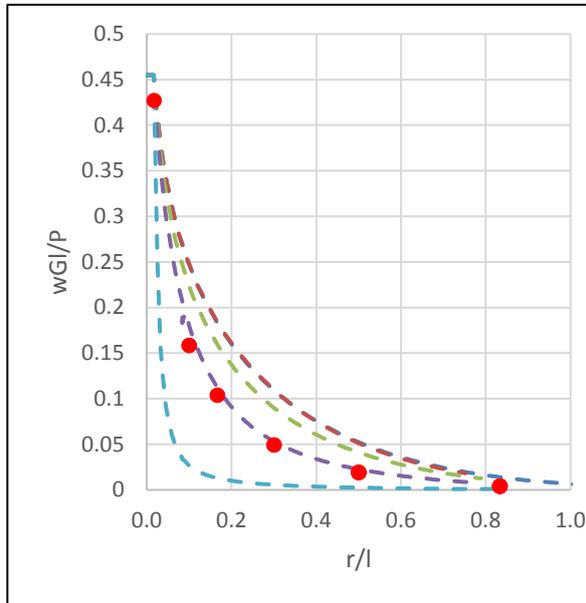


Рисунок 1.

Сопоставление нормализованных осадок свай (точки) с грунтом на глубинах (сверху-вниз) $z/l=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$. Толщина сжимаемого слоя под пятой сваи $h/l=0.03$

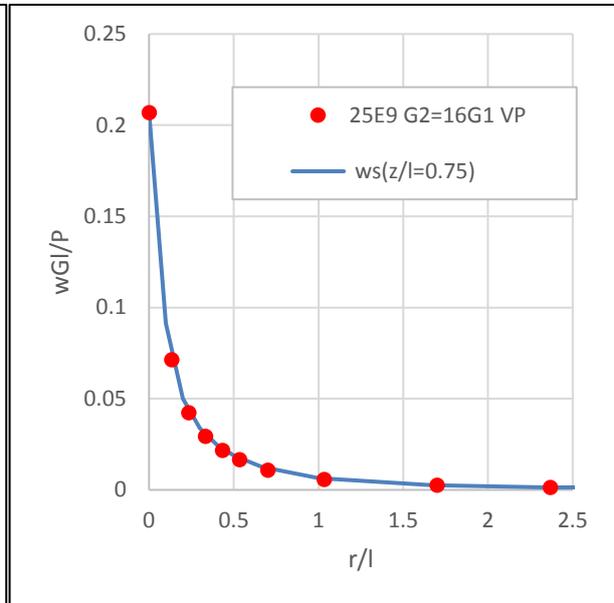


Рисунок 2

Сопоставление нормализованных осадок свай (точки) с грунтом на глубине $z/l=0.75$. Жесткая свая $l/d=25, G_2/G_1=16$

Выявленная особенность позволяеткратно сократить трудоемкость расчетов для разработки функций влияния и расчетов по МКВВ с применением МКЭ.

С учетом полученных результатов была произведена разработка усовершенствованных функций влияния для следующих расчетных схем фундаментов (рис. 5):

1. Функция влияния для однородного полупространства
2. Функция влияния для двухслойного полупространства
3. Функция влияния для основания с несжимаемым подстилающим слоем
4. Функция влияния для расчета свай неодинаковой длины

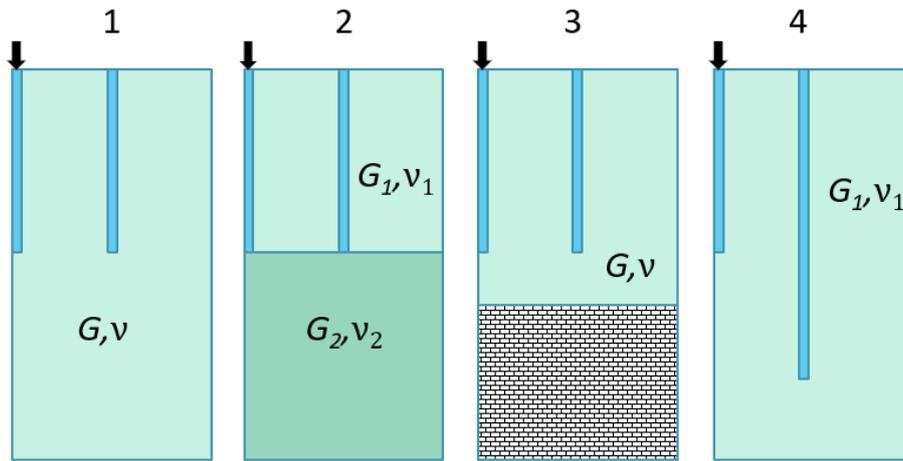


Рисунок 3. Схемы грунтовых оснований принятые для разработки усовершенствованных функций влияния

Усовершенствованная функция для условий однородного полупространства.

Известные логарифмические функции влияния обращаются в 0 на расстояниях 1...2 длины свай, в то время как согласно решению Буссинеска и принципу Сен-Венана должны монотонно затухать, что приводит к занижению осадки при расчете большеразмерных групп свай.

Расчеты по МКЭ показали, что значение дополнительной осадки свай на расстоянии до $0,5l$ соответствует известным логарифмическим функциям, а на расстоянии более $1l$ сильно отличается и имеет промежуточный характер между решением Буссинеска и логарифмическими функциями, а на расстояниях более $2l$ соответствует решению Буссинеска (рис. 4).

На основе результатов численных расчетов для свай длиной 10...100 м, для $\nu=0.1...0.49$ была разработана аналитическая аппроксимация численного решения ф.3. Для вычисления дополнительной осадки предлагается к-т δ ф. 7.38 СП 24.133330.20011 (ф. 4 и 5) вычислять по ф.3, что обеспечит более точное соответствие МКЭ расчету на расстояниях более $1l$.

$$\delta = \frac{a}{\left(b + \frac{r}{l}\right)} \quad (1)$$

$$a = \frac{(1-\nu)}{2\pi} \quad (2)$$

$$b = (0.34 - 0.29\nu) \left(\frac{1}{d}\right)^{-0.163} \quad (3)$$

$$s_{ad} = \delta \frac{N}{G_1 l}, \quad (4),$$

$$\text{где } \delta = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 r} & \text{если } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 r} > 1; \\ 0 & \text{если } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 r} \leq 1. \end{cases} \quad (5)$$

В результате сопоставление результатов расчета по ф. 1 с известными решениями (рис 4) отмечается хорошее совпадение расчета по ф. 3 с МКЭ расчетом.

Усовершенствованная функция для условий двухслойного полупространства

Результаты расчета осадки сваи при работе сваи в условиях двухслойного полупространства при различных жесткостях нижнего слоя показан на рис. 5.

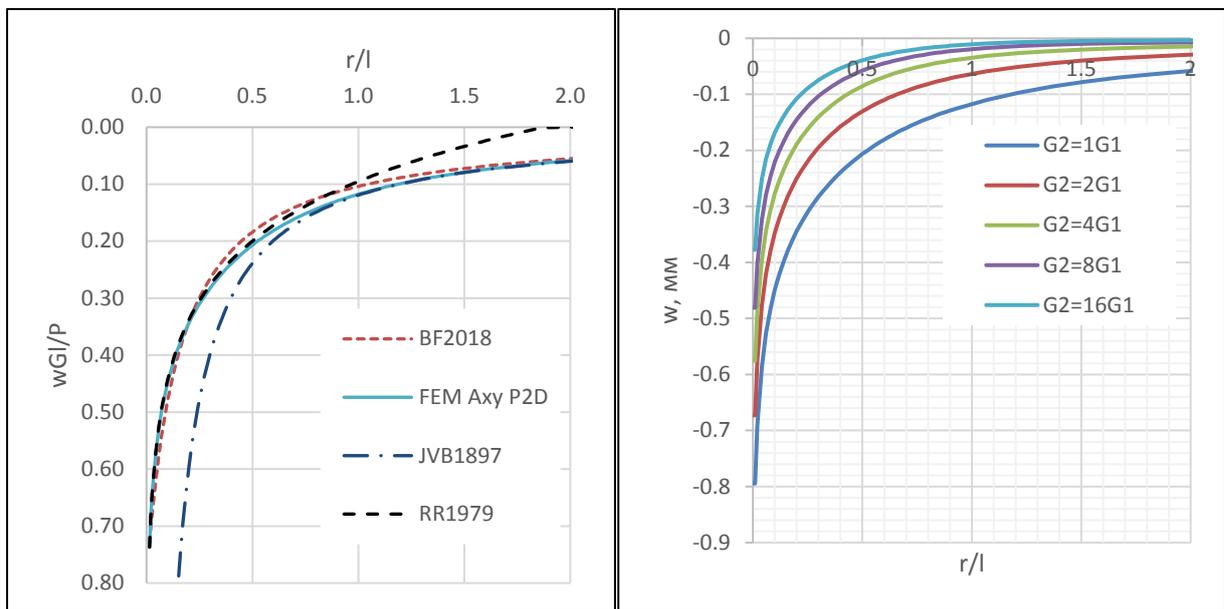


Рисунок 4. Нормализованная осадка ненагруженной сваи в зависимости от относительного расстояния (r/l) от нагруженной (BF18 – расчет по ф.1; FEM – численное решение; JVB1897 решение Буссинеска о приложении сосредоточенной силы; RR1979 – решение Randolph&Wroth 1979)

Рисунок 5. Осадки сваи в двухслойном полупространстве по результатам численного решения $G_2/G_1=1\dots 16$

Сравнение рис. 4 и 5 показывает, что отличается не только величина осадки сваи но и характер изменения функции влияния. Для $G_2/G_1=16$ затухание функции наиболее быстрое, а для $G_2/G_1=2$ отличие от $G_2/G_1=1$ незначительное.

Для учета описанных особенностей к ф.1 добавлен модифицирующий член G_2/G_1 к относительному расстоянию r/l , что дает функцию влияния следующего вида:

$$\delta = \frac{a}{\left(b + \frac{G_2 r}{G_1 l}\right)} \quad (6)$$

Сопоставления расчета по ф. 6 с расчетом по МКЭ (рис. 8 и 9) показывает достаточно хорошую сходимость.

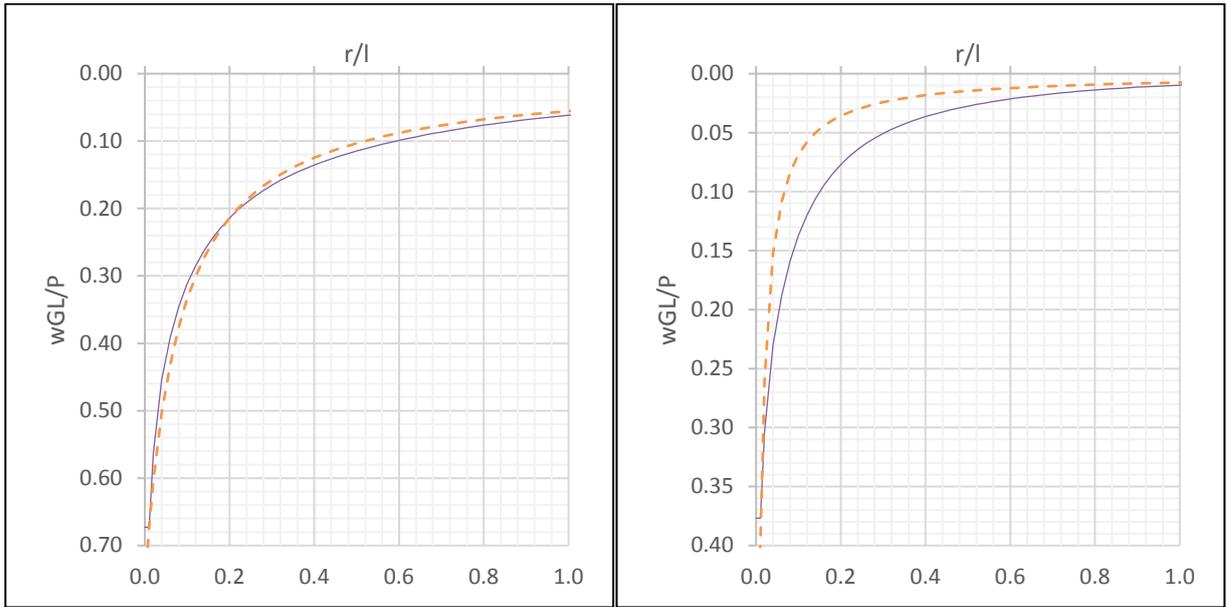


Рисунок 6. Сопоставление результатов расчетов по МКЭ и ф. 4
 $G_2/G_1=2$ (слева) и $G_2/G_1=16$ (справа)

Функция влияния для условий сжимаемого слоя конечной толщины.

Большой интерес представляет расчет осадки свайных групп в условиях подстилающего сжимаемого слоя конечной толщины h . Были проведены параметрические численные расчеты свай в которых варьировались l , ν , $h/l=0,02\dots 20$. Анализ результатов показал, что от h/l существенно зависит как осадка одиночной сваи (рис. 11), так и скорость затухания деформаций (рис. 1). Для описания зависимости осадки сваи от h/l предложена ф.7. Кроме этого была выявлено, что в условиях подстилающего слоя конечной толщины, радиус влияния сваи конечен и пропорционален h/l (рис. 12), что описано ф. 8.

$$\frac{w_{fl}}{w_{inf}} = 0.064Ln\left(\frac{h}{l}\right) + 0.883 \quad (7)$$

$$\frac{r_B}{l} = 1.28\left(\frac{h}{l}\right) + 1.36 \quad (8)$$

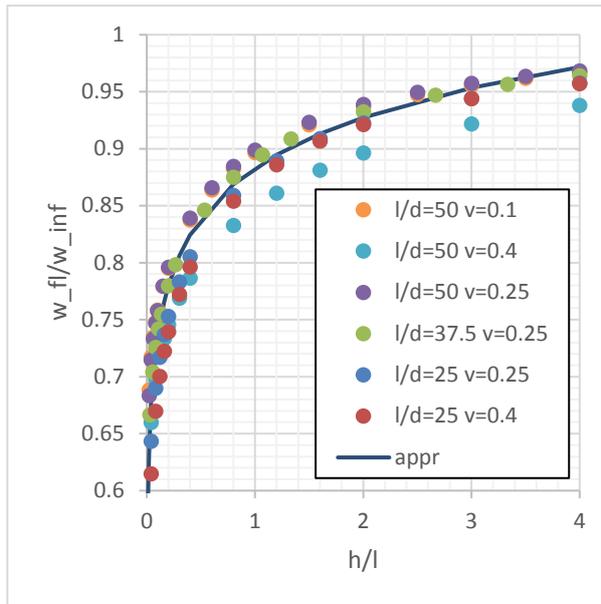


Рисунок 7. Зависимость осадки одиночной сваи от h/l

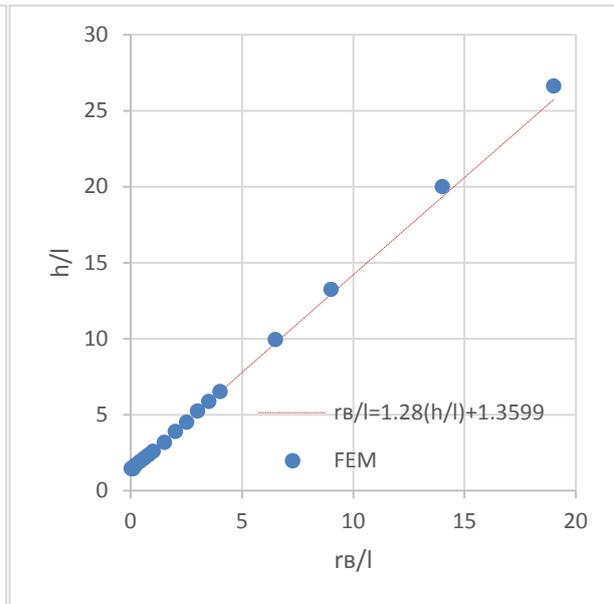


Рисунок 8. Зависимость $\frac{r_B}{l}$ от $\frac{h}{l}$.

На основе проведенных расчетов была разработана функция влияния ф. 9. Сравнение результатов по МКЭ с расчетами по ф. 9 показано на рис. 10 и 11 для $h/l=0.02$ и 4 соответственно.

$$\delta = \frac{1}{a \ln\left(\frac{h}{l}\right)} + b \quad (9)$$

$$a = \frac{(0,042\nu^5 + 0,004) \cdot \ln(h/l)}{e^{\left(\frac{h}{l}\right)}} - 0,01\nu + 1,12 \quad (10)$$

$$b = \frac{(0,09 - 0,1\nu^3) \cdot \text{ATan}(h/l) - 0,15\nu^{1,5} - 1}{e^{\left(\frac{h}{l}\right)}} \quad (11)$$

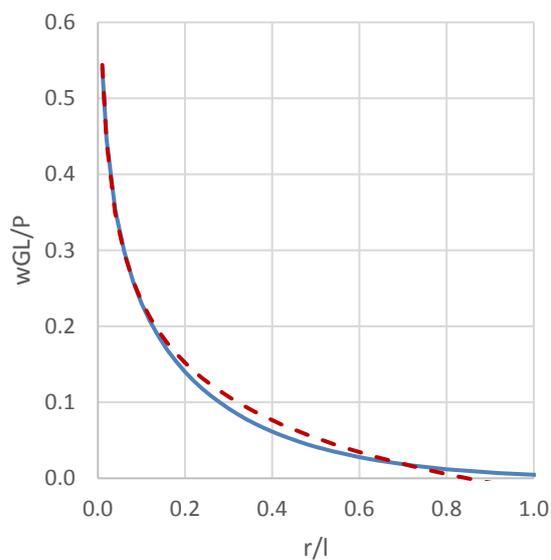


Рисунок 9. Сопоставление расчета по ф. 9 с МКЭ расчетом. $h/l=0.02$

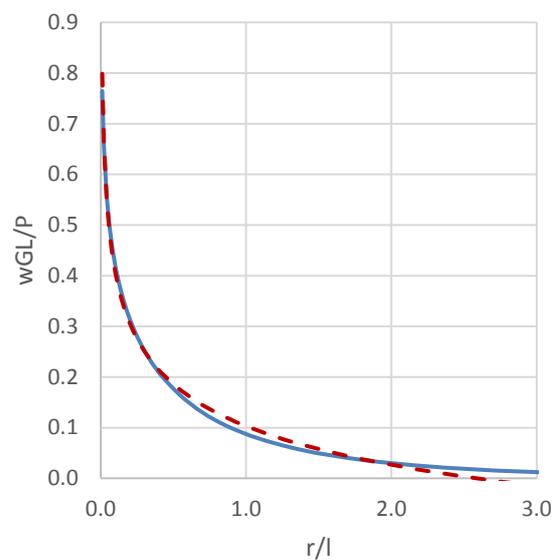


Рисунок 10. Сопоставление расчета по ф. 9 с МКЭ расчетом. $h/l=4$

Допустимость распространения решения задачи о паре свай на большую группу свай.

В ряде публикаций к существенным недостаткам МКВВ относят то, что в его основе распространение решения задачи о паре свай на группу свай, что, предположительно, для больших групп, завышает расчетную осадку на 3...5% для однородного и до 50% для двухслойного основания.

Для проверки указанного предположения были проведены пространственные МКЭ расчеты. В первой серии расчетов рассмотрено 10 свай в ряд с шагом $2d$. Осадка сваи, в присутствии 10 ненагруженных (рис. 15) уменьшилась на $\approx 5\%$, а осадки ненагруженных свай совпадают с осадками грунта. По второй серии расчетов рассматривалась нагруженная свая в двухслойном основании в окружении 1...100 шт. ненагруженных. В этом случае осадка снижается всего на 7,5 и 16,5% для случаев $G_2=G_1$ и $G_2=16G_1$ соответственно.

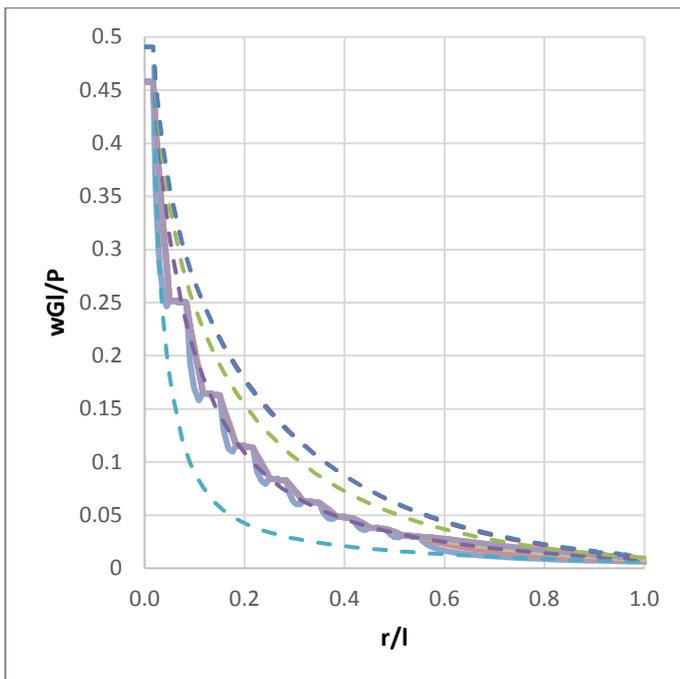


Рисунок 11. Сопоставление относительных осадок грунта по линии проведенной через ненагруженные сваи (сплошные линии) с осадками грунта на тех же глубинах (пунктирные линии, сверху вниз $z/l=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$). Двухслойное основание $G_2=16G_1, l/d=100, \nu=0.25$

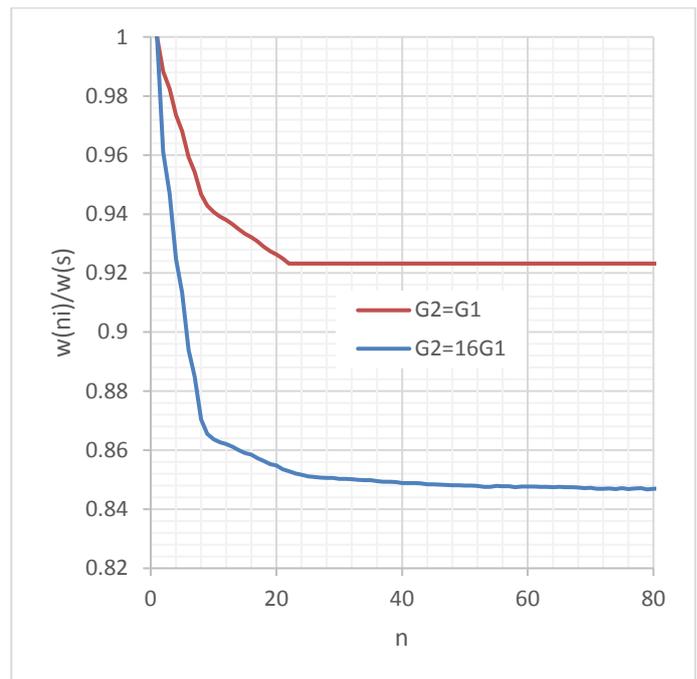


Рисунок 12. Отношение осадки одиночной сваи в армированном массиве (в условиях наличия 1...99 «армирующих» свай) к осадке в неармированном массиве

Четвертая глава посвящена исследованию возможности применения функций влияния для свай различной длины.

Теоретическим посылом для разработки функции влияния для свай разной длины является теорема Максвелла-Бетти, гласящая о том, что для упругого твердого тела, работа сил Q_1 приложенных в точке P_2 эквивалентна работе сил P_1 приложенных в точке Q_2 . Проведя аналогию к рассматриваемой задаче, можно показать, что работа сил P_2 приложенных к свае Q_1 произведет такую же работу, что и работа сил Q_1 приложенных к свае P_2 .

Указанная гипотеза была исследована путем выполнения численных расчетов в пространственной постановке (240 шт.). Было рассчитано влияние свай $l/d=20\dots60$ на $10\dots70$ и наоборот $l/d=10\dots70$ на $20\dots60$ для расстояний $2\dots70d$ (рис. 14). Анализ результатов показал, что влияние свай различной длины может быть описано разработанными функциями влияния, при этом длину сваи li при расчете по гиперболическим функциям следует принимать как l ср. ар. $= \sqrt{(l_1^2 + l_2^2)}$. Сравнив результаты МКЭ расчетов с расчетами по МКВВ отмечается хорошая сопоставимость (рис. 15).

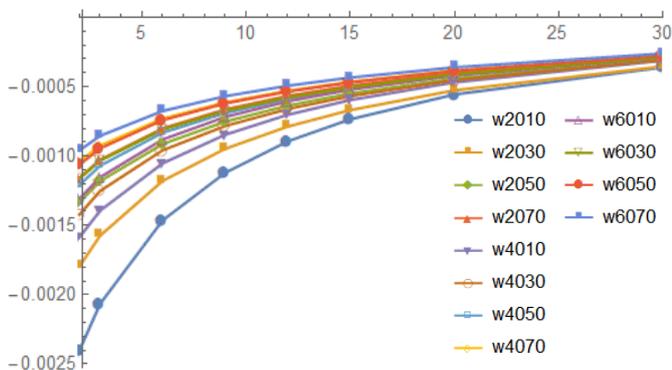


Рисунок 13. Расчетные дополнительные осадки ненагруженной сваи (w , мм) в зависимости от расстояния между сваями (d) для свай длиной 10...70м

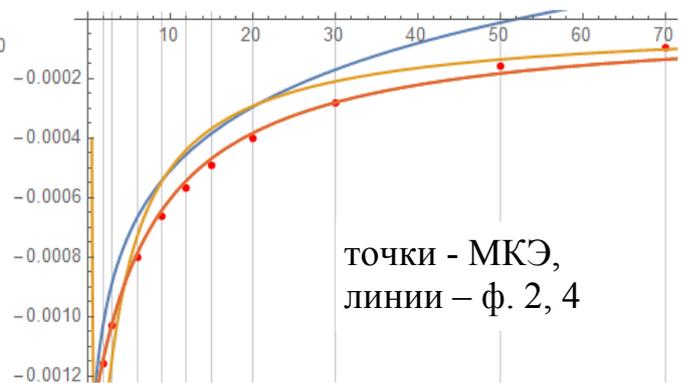


Рисунок 14. Сопоставление результатов МКЭ расчета с предлагаемой методикой для свай разной длины длиной 20 и 70м.

Пятая глава посвящена разработке метода расчета осадок свайных фундаментов со сваями различной длины обобщающего результаты полученные в ходе усовершенствования функций влияния (третья глава) и разработанной методики расчета функции влияния для свай различной длины (четвертая глава).

В общем случае расчет предлагается выполнять по блок-схеме на рис. 22.

Рассмотрены вопросы учета нелинейности в работе свайного фундамента. При приближении одиночной сваи к предельному состоянию в ходе нагружения, грунт сцепленный ранее со свайей, перестает следовать за ней, происходит проскальзывание сваи относительно грунта. Проведенным МКЭ расчетом Указанным расчетом и опубликованными экспериментами факт приводит к тому, что нелинейность работы грунта, по крайней мере, до перехода существенной части основания в предельное состояние, допустимо моделировать локализовано, вблизи сваи, по заданной характеристике нагрузка-осадка. Указанный факт подтверждается выполненным расчетом по МКЭ. Показано, что величины сдвиговой деформации затухают очень быстро с удалением от сваи и на расстоянии $0,9d$ от сваи меньше 1% (указанная величина соответствует упругой работе грунтов средней прочности и деформативности). Рекомендовано расчеты по МКВВ выполнять на начальное значение модуля сдвига грунта.

Пятая глава посвящена сопоставлению результатов расчетов осадок по предлагаемому методу с опубликованными и выполненным автором, с опубликованными результатами экспериментов и наблюдений за осадками зданий и сооружений.

Сопоставление опубликованных результатов расчетов и выполненных автором по МКЭ с расчетами по предлагаемому методу частично представлено на рис. 24 и 25.

Сопоставление результатов расчета по МКЭ и МКВВ для фундамента со сваями различной длины показано на рис. 18.

Отдельные сопоставления результатов расчетов по МКВВ с результатами полевых экспериментов (Голубков, 1968) и натурных наблюдений (Кук, 1981) показаны на рис. 19, 20 и на 21, 22 соответственно.

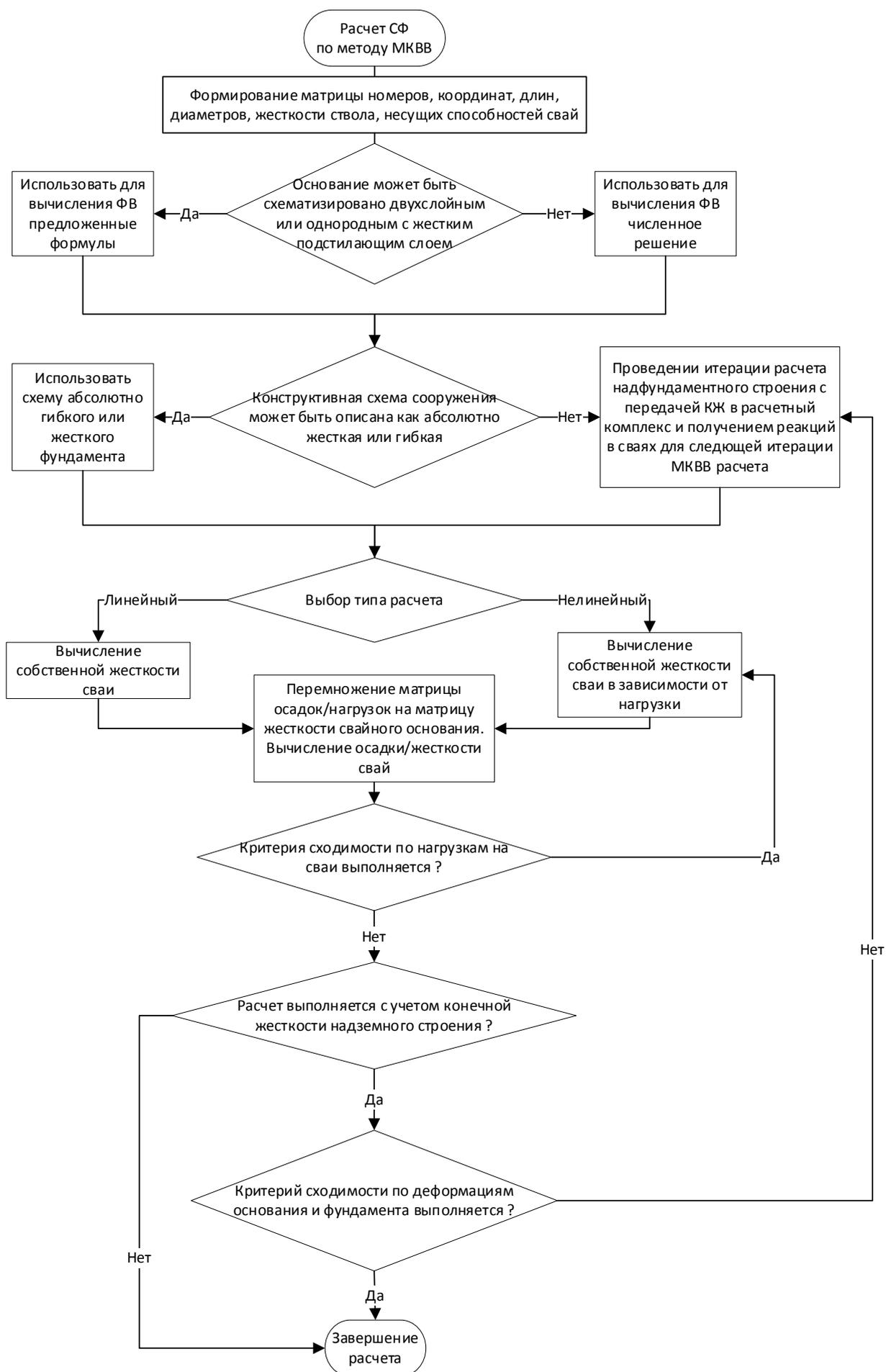


Рисунок 15. Блок-схема предлагаемого метода расчета

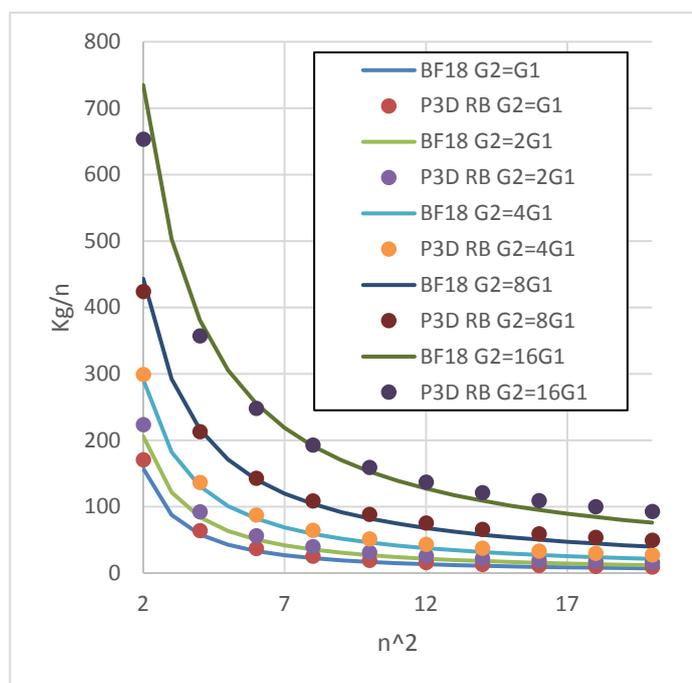


Рисунок 16. Сопоставление результатов пространственного МКЭ расчета свайных групп 4...400 свай и расчета по ф.3. Снизу вверх $G_2=2G_1$, $G_2=4G_1$, $G_2=8G_1$, $G_2=16G_1$

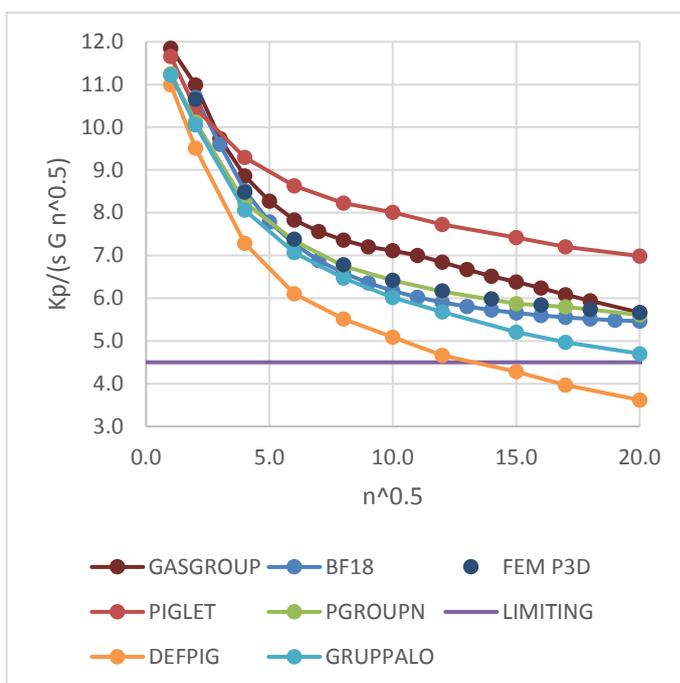


Рисунок 17. Сопоставление результатов расчетов выполненных для теоретического фундамента. Шаг свай 2.5d. PIGLET - (Рэндолф, 2004); DEFPIG (Пулос, 1990); PILEGROUPN (Бэйзил, 1999); GASGROUP (Гуо, 1999); GRUPPALO (Руссо, 1998); LIMITING – значение жесткости соответствующее плитному фундаменту)

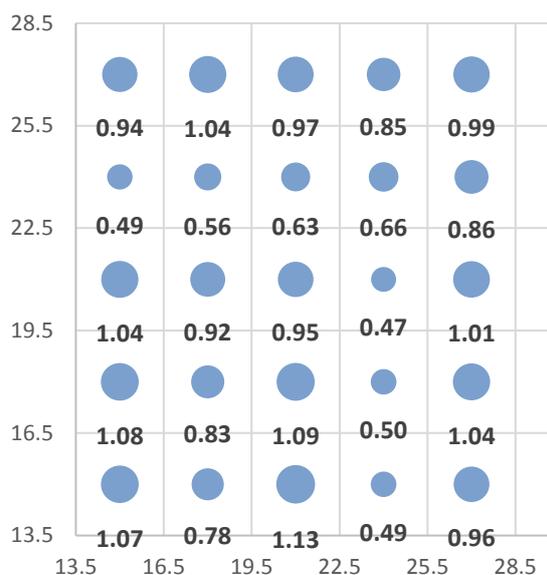
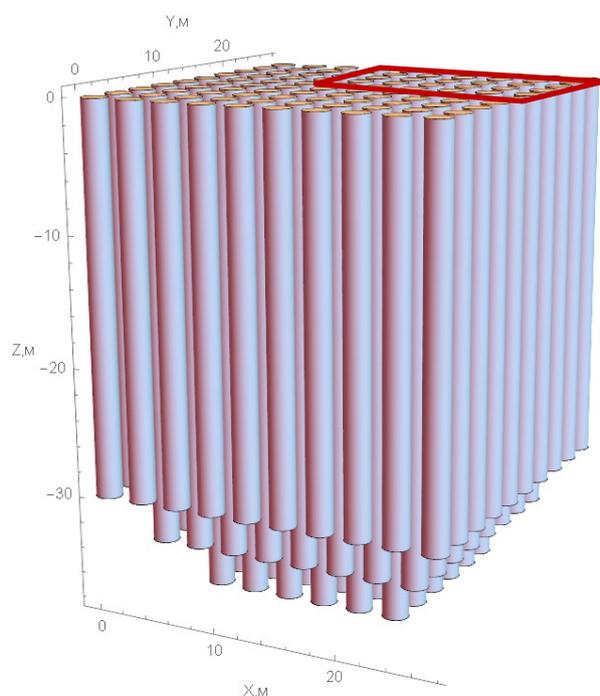


Рисунок 18. Вид расчетной модели фундамента. Отношения значений коэффициентов жесткости свай рассчитанных МКЭВВ к МКЭ (для четверти фундамента)

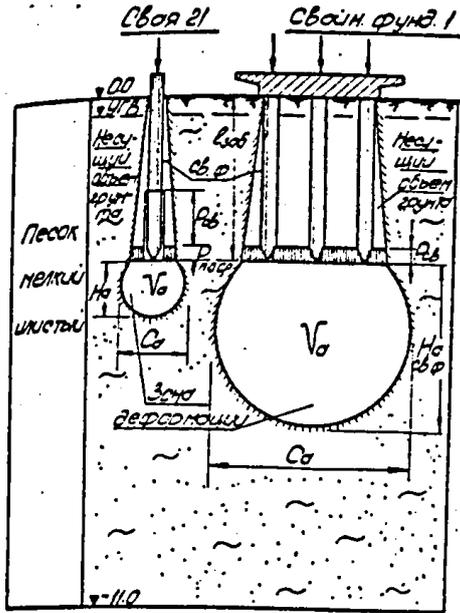


Рисунок 19 Схема экспериментальных опытного фундамента и одиночной сваи совмещенная с инженерно-геологическими условиями площадки. Свая №21, СФ №1 (Голубков, 1968)

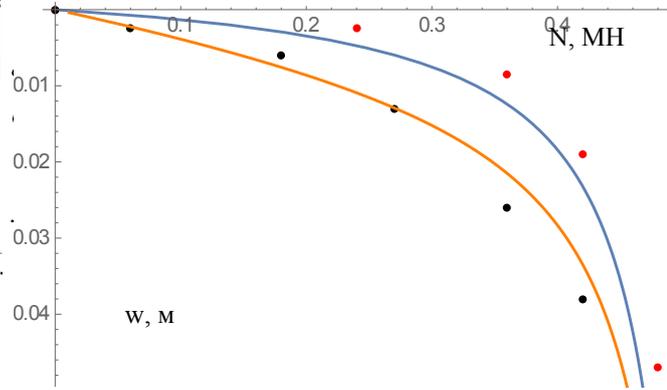


Рисунок 20 Сопоставление результатов опыта Свая №21, СФ №1 и расчетов по МКВВ. Сверху вниз – одиночная сваи и группа свай. Линии – расчет, точки – опытные данные

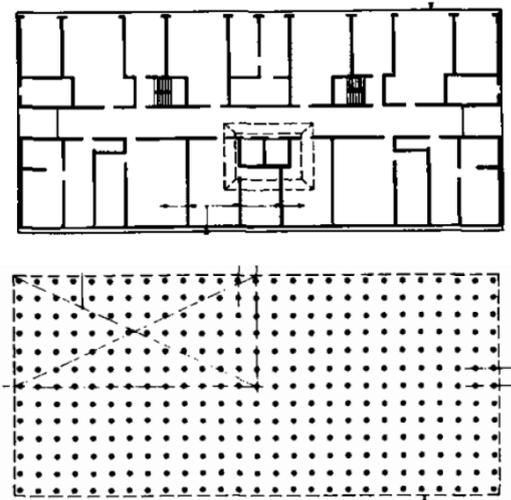


Рисунок 21. Схема свайного фундамента 16-ти этажного здания (Кук, 1981)

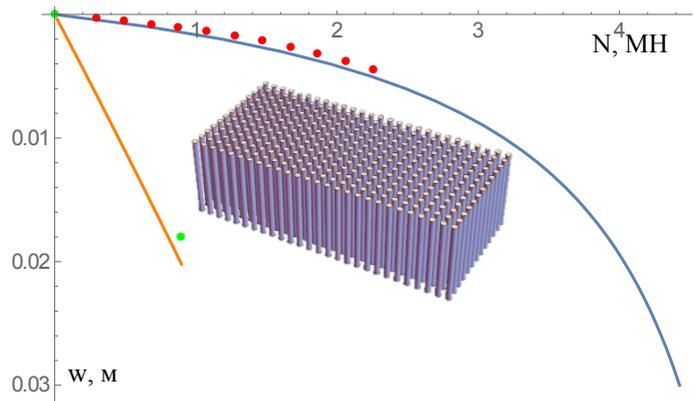


Рисунок 22. Сопоставление результатов наблюдений за фундаментом 16-ти этажного здания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе выполненного обзора и анализа теоретических и экспериментальных исследований посвященных вопросам расчета осадки свайных фундаментов и влияния наличия свай различной длины на осадку фундамента определены параметры определяющие величину осадки свайной группы. Наибольшее влияние на величину осадки имеют длина и диаметр свай, количество свай в группе и их шаг, расположение свай различной длины в плане и разница в длине свай, деформационные характеристики прорезаемого сваями слоя грунта, толщина и деформационные характеристики слоя под нижними концами свай.
2. На основе теоретических и численных исследований предложена методика моделирования пространственной задачи об определении осадки ненагруженной сваи в составе группы из двух свай, одна из которых нагружена, на основе численного решения задачи об осадке одиночной сваи и окружающего ее грунта в осесимметричной постановке.
3. По результатам численных исследований определены зависимости осадки сваи и окружающего ее грунта от схемы и параметров грунтового основания для условий однородного упругого полупространства, двухслойного упругого полупространства и упругого слоя конечной толщины подстилаемого несжимаемым основанием. Предложены инженерные методы для расчета осадки сваи и близрасположенных ненагруженных свай в рассмотренных условиях. Показаны зависимости осадки сваи от толщины сжимаемого слоя. Предложена методика расчета осадки одиночной сваи имеющей частичную заделку во второй слой двухслойного основания.
4. На основе теоретических и численных исследований определена зависимость осадки ненагруженной сваи от длины нагруженной сваи в составе группы из двух свай различной длины, предложена методика расчета.
5. На основе численных исследований показано, что подход о распространении результатов решения задачи об осадке ненагруженной сваи в составе группы из двух свай, одна из которых нагружена, на группу большого размера приводит завышению расчетной величины осадки группы свай на величину до 12%.

6. Разработан эффективный с точки зрения вычислительных затрат способ расчета свайного фундамента со сваями различной длины, обладающий удовлетворительной точностью и учитывающий нелинейный характер работы грунта вблизи свай.
7. Сопоставление результатов расчетов полученных по предлагаемым методикам с результатами полевых натурных экспериментов и результатами наблюдений за осадками зданий и сооружений подтверждают достоверность предлагаемого способа расчета.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Разработка функций влияния для охвата большего количества возможных схем грунтовых условий (для двухслойного основания, где низ сваи располагается в первом слое на некотором расстоянии от второго; для оснований жесткость которых линейно увеличивается с глубиной);
2. Разработка механизмов автоматической оптимизации расположения свай в плане и их длины (как детерминированных, так и стохастических, в том числе с использованием эвристических алгоритмов поиска);
3. Детальным исследованием вопроса работы одиночной сваи и свай в группе по отношению к несущей способности группы свай;
4. Выполнение большего количества сопоставлений с результатами экспериментов и альтернативными методами расчета.
5. Разработка методики учета эффекта снижения осадки свайной группы в условиях наличия ненагруженных свай.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Боков, И.А. Прогноз осадок свайных фундаментов многоэтажных зданий при застройке Павшинской поймы и сравнение их с результатами мониторинга. / И.А. Боков, С.О. Шулятьев // Жилищное строительство. – 2010. – №5. – С.2–6.
2. Боков, И.А. Разработка методики расчёта и проектирования свайных оснований, в составе которых применены сваи разной длины и диаметра / И.А. Боков, В.Г. Федоровский // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – №4. – С.121–128.
3. Боков, И.А. Взаимовлияние свай через грунт: сравнение аналитических и численных оценок / И.А. Боков, В.Г. Федоровский // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №10. – С.19–23.
4. Боков, И.А. О применимости функции влияния, полученной по результатам расчетов одиночной сваи для расчета свайных групп / И.А. Боков, В.Г. Федоровский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2018. – №6. – С.2–7.
5. Боков, И.А. О расчете осадки группы свай с использованием коэффициентов взаимного влияния по модели упругого полупространства / И.А. Боков, В.Г. Федоровский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – №6. – С.2–8.

Публикации в других изданиях:

1. Геотехнические аспекты проекта башни ОДЦ Охта / В.П. Петрухин, О.А. Шулятьев, И.А. Боков, С.О. Шулятьев // Высотные здания: журнал высотных технологий. – 2010. – №6. – С.82–91.
2. Особенности испытания свай для высотных зданий на примере башни ОДЦ «Охта» / В.П. Петрухин, О.А. Шулятьев, И.А. Боков, С.О. Шулятьев // Высотные здания: журнал высотных технологий. – 2011. – №11-12. – С.96–107.
3. Исаев О.Н., Петрухин В.П., Колыбин И.В., Буданов В.Г., Боков И.А. Проектирование олимпийских объектов сочи: геотехнические особенности / Мир строительства и недвижимости. 2013. № 47. С. 21-25.
4. О. А. Шулятьев, И. А. Боков / Особенности взаимодействия свай с грунтом и между собой в условиях свайного поля / Вестник НИЦ «Строительство». НИИОСП им. Н. М. Герсеванова. Геотехника и подземное строительство. — 2014. — № 10. — С. 166–176.

5. Петрухин, В.П. Обзор методов преднапряжения и цементации основания пяты сваи и анализ возможности их применения / В.П. Петрухин, О.А. Шулятьев, И.А. Боков // Юбилейный сборник научных трудов (к 80-летию НИИОСП) / ред. В. П. Петрухин, И. В. Колыбин, В. Г. Федоровский. – Москва: АО "НИЦ "Строительство", 2011. – С.278–300.40.
6. С опорой на толщу надежных известняков. Расчёты основания и фундаментов высотной башни на участке № 2-3 ММДЦ Москва-Сити / В.П. Петрухин, О.А. Шулятьев, С.Г. Безволев, И.А. Боков // Высотные здания: журнал высотных технологий. – 2011. – №1. – С.104–113.
7. Федоровский В.Г., Бобырь Г.А., Боков И.А., Ильин С.В. Применение метода конечных элементов в геотехнических расчетах по первому предельному состоянию / Вестник НИЦ Строительство. 2019. № 20. С. 102-112.
8. Боков И.А. О применимости метода коэффициентов взаимного влияния к расчету свайных фундаментов. Сравнение с результатами натуральных экспериментов и наблюдений / Вестник НИЦ Строительство. 2019. № 20. С. 14-24.
9. Bokov, I Correction of Soil Design Parameters for the Calculation of the Foundation Based on the Results of Barrettes Static Load Test / O. Shuljatjev, A. Dzagov, I. Bokov, S. Shuljatjev / Proc. of the 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — Paris. — 2013. — P. 615–618.
10. Geotechnical Features of Sochi Olympic Facilities Project Designs / Petrukhin V.P., Kolybin I.V., Budanov V.G., Isaev O.N., Kisin B.F., bokov I.A. / Proc. of the 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — Paris. — 2013. — P. 3119–3124.
11. Боков И.А. Натурные исследования влияния реологического фактора при высотном строительстве на твёрдых глинах. Достижения, проблемы и перспективные направления развития для теории и практики механики грунтов и фундаментостроения / О. А. Шулятьев, С. Г. Безволев, И. А. Боков, С. О. Шулятьев / Матер. XIII Междун. симп. по реологии грунтов и Междун. совещания зав. кафедрами механики грунтов, оснований и фундаментов, подземного строительства и гидротехнических работ, инженерной геологии и геоэкологии строительных вузов и факультетов. — Казань, 2012. — С. 33–36.
12. Bokov, I.A. Calculation of the settlement of pile foundations containing piles of various lengths and diameters by the interaction factors method / I.A. Bokov, V.G. Fedorovsky: Proceedings of The XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Reykjavik, Iceland: ISSMGE, 2019.

Патенты:

1. Патент РФ №1386667 на полезную модель. Сейсмостойкий свайный фундамент. Авторы: Шулятьев О. А., Боков И. А. // Бюл. изобр., 2013. — №8.
2. Патент РФ на полезную модель № 141161. Свайно-плитный фундамент высотного здания. Авторы: Шулятьев О. А., Боков И. А. // Бюл. изобр., 2014. — №15.
3. Патент РФ на полезную модель № 141158. Свайно-плитный фундамент высотного здания. Авторы: Шулятьев О. А., Боков И. А. //Бюл. изобр., 2014. — №15.
4. Патент РФ на изобретение №2549632. Способ сооружения свайно-плитного фундамента высотного здания. Авторы: Шулятьев О. А., Боков И. А. // Бюл. изобр., 2015. — № 12.
5. Патент РФ на изобретение №2549633. Способ сооружения свайно-плитного фундамента высотного здания. Авторы: Шулятьев О. А., Боков И. А. // Бюл. изобр., 2015. — № 12.
6. Патент РФ на изобретение №2549635. Способ сооружения свайно-плитного фундамента высотного здания. Авторы: Шулятьев О. А., Боков И. А. // Бюл. изобр., 2015. — № 12.