

На правах рукописи



ХАРИЧКИН АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАБИВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙ В
СОСТАВЕ СВАЙНОГО ПОЛЯ МЕЖДУ СОБОЙ И С ГРУНТОМ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной 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. Герсевича» (АО «НИЦ Строительство» – НИИОСП им. Н.М. Герсевича).

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Шулятьев Олег Александрович

Официальные оппоненты:

Знаменский Владимир Валерианович,

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), профессор кафедры «Механика грунтов».

Нуждин Леонид Викторович,

кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет» (НГАСУ (Сибстрин)), профессор кафедры «инженерная геология, основания и фундаменты».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (ЮРГПУ (НПИ)).

Защита состоится «10» февраля 2021 года в 11:00 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 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

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 во многих областях современного фундаментостроения накоплен большой материал для понимания процессов, происходящих в конструкциях, однако в области свайных фундаментов многие аспекты изучены недостаточно. К ним относятся процессы, протекающие в свайных группах при приложении к ним нагрузок. Относительно мало материала накоплено по результатам натурных наблюдений за перераспределением усилий в сваях, взаимодействующих с грунтом в составе группы.

Степень разработанности темы. Изучением работы свайных фундаментов занимались многие известные учёные. Одними из первых, обративших внимание на различия в работе одиночных свай и свай в группе, являются G.G. Meyerhof, A. Vesic. Одну из первых значимых экспериментальных работ по теме исследования групповой работы свай выполнил Т. Whitaker, показав на примере модельного эксперимента, что осадки свай в группе неодинаковы и перераспределяются с ростом приложения нагрузки. Позже Н. Poulos обобщил эти наблюдения и, основываясь на решениях D. Mindlin, предложил выражение для определения осадки свайной группы. Н.А. Цытович указывал, что при значениях шага свай $3d$ свайный фундамент можно рассматривать как массивный фундамент глубокого заложения. Б.Н. Жемочкин разработал аналитический метод расчёта балки на упругом основании путём введения реактивных усилий на отдельных участках балки, что впоследствии стало широко применяться для расчёта, в том числе свайных фундаментов. Значимые результаты, в том числе в экспериментальных работах, посвящённых работе свай в группах, получили А.А. Бартоломей, Б.В. Бахолдин, В.В. Знаменский, Е.Э. Девальтовский, Большой вклад в совершенствование методов расчёта свайных фундаментов внесли R. Katzenbach, H.G. Pulos, А.Л. Готман, Н.З. Готман, А.А. Григорян, С.В. Курилло, З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, В.Г. Федоровский, О.А. Шулятьев, А.Б. Пономарев, Р.А. Мангушев, В.М. Улицкий. Большую работу по систематизации имеющихся экспериментальных данных по распределению осадок и усилий свай в группах провели A. Mandolini, G. Russo, C. Viggiani, Van Impe.

Вместе с тем вопросам распределения усилий в сваях, расположенных в различных частях свайного фундамента, в зависимости от различной геометрии фундамента и нагрузки на него уделено мало внимания.

Цель диссертационной работы – совершенствование существующих методик расчета группы забивных свай.

Задачи исследования:

1. Обобщить и проанализировать доступное множество литературных источников, производственных и экспериментальных данных по расчету и мониторингу взаимодействия свай с грунтом и между собой при работе их в составе группы свай.
2. Разработать программу и провести экспериментальные работы по исследованию взаимодействия свай с грунтом и между собой при работе их в составе группы свай.

3. Выполнить верификацию принятой расчетной модели на основе проведенных экспериментальных работ.

4. С применением полученной верифицированной расчетной модели провести параметрическое исследование процесса взаимодействия свай с грунтом и между собой при работе их в составе группы свай.

Объектом исследования, отраженного в диссертации, являются свайные фундаменты, состоящие из группы или поля свай.

Предмет исследования – выявление особенностей взаимодействия и расчета свайных фундаментов, состоящих из группы или поля свай.

Научная новизна проведенных исследований состоит в следующем.

1. Определена зависимость влияния прочностных характеристик грунта на распределение усилий в сваях свайного поля.

2. Установлено, что в зависимости от расстояния между сваями в свайном поле при росте нагрузки отношение между усилиями в сваях, находящихся в разных частях свайного поля, могут как оставаться постоянными, так и меняться.

3. Подтверждено, что при расчете осадок соседних ненагруженных свай в группе величина их осадки снижается за счет экранирования. При этом установлено наличие зависимости экранирующей способности соседними сваями от формы свайной группы в плане и от ее размеров, выраженных числом свай.

Новизна диссертационных исследований удостоверена двумя патентами.

Теоретическая значимость проведенных исследований состоит в следующем:

1. Установлено, что при изменении расстояния между нагруженными сваями в группе отношение усилий крайних (угловых) свай к центральным изменяется нелинейно. При этом в определенных условиях значения этих отношений могут снижаться менее 1.

2. Доказано, что при увеличении прочностных характеристик грунта разница между усилиями в крайних (угловых) и центральных сваях увеличивается, а при уменьшении прочностных характеристик – уменьшается.

3. Выявлено, что при определении влияния свай друг на друга при расчете осадки свайного фундамента аналитическим методом необходимо учитывать форму и размеры свайного поля.

Практическая значимость проведенных исследований состоит в следующем:

1. Даны рекомендации по расчету свайных фундаментов, работающих в составе свайного поля, в части необходимости выполнения их с введением коэффициентов надежности по грунту как в сторону повышения, так и в сторону снижения механических характеристик грунта, а подбор сечения и армирование следует выполнять по самому неблагоприятному варианту.

2. На основе выявленной зависимости возникает возможность регулировать распределение усилий в свайном поле для свай, расположенных в разных частях. При этом форма деформации плитного ростверка может изменяться от прогиба к выгибу. В этом случае предлагается выполнять расчеты свайного

фундамента для различных стадий приложения нагрузки, а для конструирования принимать наихудший вариант.

3. Определена область применения расчета осадки свайного фундамента аналитическим методом.

4. Разработан свайный динамометр (патент RU 69241 U1), который показал надежную работу в течение трех лет экспериментальных исследований.

Методология и методы исследований

Для решения поставленных задач использовались методы теорий упругости и пластичности, теория прочности Кулона – Мора и др.

В испытаниях использовались как натурные свайные фундаменты, так и отдельные сваи, высокотехнологичные средства измерения и автоматического сбора и обработки информации. Для расчетов, теоретического и графического анализа результатов использовалось сертифицированное ПО: пакеты стандартных отечественных и зарубежных компьютерных программ.

Личный вклад автора

Автором самостоятельно выполнен патентно-информационный поиск и обобщение и анализ научной литературы, экспериментальных данных по расчету и мониторингу взаимодействий свай с грунтом и между собой в составе группы. При консультациях научного руководителя сформулированы цели и задачи исследования. Автором предложена программа проведения экспериментальных исследований и апробирована экспериментальная работа на основе метода измерения усилий в сваях в процессе строительства и последующей эксплуатации высотного жилого здания. В процессе диссертационного исследования запатентован динамометр оригинальной конструкции. Автором выполнена верификация принятой расчетной модели на основе результатов проведенных экспериментов.

Лично автором с применением верифицированной расчетной модели проведено численное параметрическое исследование процесса взаимодействия свай с грунтом и между собой в составе группы свай. Полученные результаты обобщены и развиты в соответствующих главах диссертации.

Автором самостоятельно написаны все разделы диссертационной работы. Материалы и результаты проведенных исследований неоднократно докладывались автором на конференциях и семинарах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика измерения усилий в сваях на этапе строительства и эксплуатации с использованием свайного динамометра оригинальной конструкции.

2. Установленная на основе проведения опытной работы зависимость распределения усилий в сваях от различных характеристик свайной группы, влияющих на распределение усилий между сваями в поле из забивных свай в процессе приложения к ним нагрузки;

3. Рекомендации по расчету свайных фундаментов, работающих в составе свайного поля, в части необходимости выполнения их с введением коэффициентов надежности по грунту как в сторону повышения, так и в сторону снижения механических характеристик грунта;

4. Результаты параметрических численных исследований по расчету дополнительных осадок свай в группе от взаимовлияния. Рекомендации по учету данных результатов в нормативной литературе.

Степень достоверности результатов проведенных исследований predetermined использованием в работе классических методов расчета, принятых в механике грунтов и в строительной механике. Достоверность результатов исследований обеспечена также применением апробированных методов математического и численного моделирования геотехнических задач; сопоставлением результатов аналитических и численных расчетов НДС грунтового основания и исследуемых свайных фундаментов с результатами экспериментальных исследований; использованием апробированных приборов и оборудования, подвергаемых систематической поверке.

Апробация работы

Основные положения работы в законченном виде обсуждались на ежегодной научно-технической конференции «Вопросы проектирования и устройства надземных и подземных конструкций зданий и сооружений» (Санкт-Петербург, 2018 [47]). Отдельные положения работы обсуждались на различных геотехнических конференциях, включая международные: на международной конференции ТС-18 «Pile Foundation meeting» (г. Франкфурт-на-Майне, Германия, 14 мая 2009 г.), на международной научно-технической конференции «Численные методы расчетов в практической геотехнике» в СПбГАСУ, Санкт-Петербург, 2012 г [52]. Внедрение результатов диссертационной работы осуществлено

Результаты проведенных исследований внедрены при разработке нескольких нормативно технических документов:

1. СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» автор принимал участие в составе коллектива в разработке раздела 10 «Особенности проектирования оснований высотных зданий», раздела 12 «Геотехнический мониторинг», приложение М «Контролируемые параметры при геотехническом мониторинге»

2. ГОСТ 24846-2012 «Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений» автором в составе коллектива были разработаны и актуализированы разделы 1-11 и приложения А-Г.

Кроме того основные результаты работы использовались при проектировании объектов ГорнолыжноТуристского Центра ПАО «ГАЗПРОМ», с. Эсто-Садок и с. Красная Поляна, Краснодарского края.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе две из них в материалах международных конференций, 2 работы опубликованы в изданиях перечня ВАК РФ. Получено 2 патентных свидетельства. Общий объем всех публикаций в печатных листах- 8,0п.л., объем выполненный лично автором – 3,2п.л. Общий объем публикаций в перечне ВАК в печатных листах- 2,1п.л., объем выполненный лично автором – 0,7п.л.

Специальность, которой соответствует диссертация

Согласно сформулированной цели диссертационной работы, ее научной новизне и установленной практической значимости диссертация соответствует

паспорту специальности 05.23.02 Основания и фундаменты, подземные сооружения по следующим пункту: «Разработка новых методов расчета, конструирования и устройства фундаментов на естественном основании, глубокого заложения и свайных фундаментов с учетом взаимодействия их с надфундаментными конструкциями, фундаментами расположенных поблизости зданий и сооружений и с конструкциями подземных сооружений».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 88 наименований. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, иллюстрирована 89 рисунками, 21 таблицей, имеет одно приложение.

Автор искренне благодарит своего научного руководителя, заместителя директора НИИОСП им. Н.М. Герсевича, кандидата технических наук О.А. Шулятьева, а также выражает признательность всем сотрудникам НИИОСП им. Н.М. Герсевича за постоянное внимание и помощь при выполнении диссертационной работы.

Специальность, которой соответствует диссертация. Согласно сформулированной цели диссертационной работы, её научной новизне и установленной практической значимости диссертация соответствует паспорту специальности 05.23.02 Основания и фундаменты, подземные сооружения по следующим пункту: «Разработка новых методов расчёта, конструирования и устройства фундаментов на естественном основании, глубокого заложения и свайных фундаментов с учётом взаимодействия их с надфундаментными конструкциями, фундаментами расположенных поблизости зданий и сооружений и с конструкциями подземных сооружений».

Автор искренне благодарит своего научного руководителя, заместителя директора НИИОСП им. Н.М. Герсевича, кандидата технических наук О.А. Шулятьева, а также выражает признательность всем сотрудникам НИИОСП им. Н.М. Герсевича за постоянное внимание и помощь при выполнении диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, отмечена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приводятся обзор и анализ состояния изученного вопроса. Представлена классификация методов расчёта взаимодействия свай и грунта (рисунок 1).

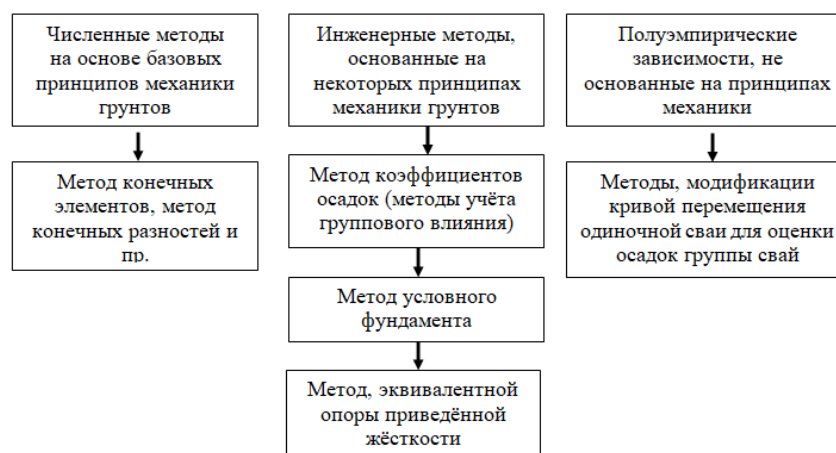


Рисунок 1 – Классификация методов исследования взаимодействия свай и грунта

В результате обзора состояния вопроса исследования можно отметить, что осадки свайных фундаментов в виде свайных полей при рабочих нагрузках обычно в несколько раз превышают осадки одиночных свай, что зависит от параметров свайных фундаментов и от грунтовых условий. При нагрузках, близких к предельным, картина меняется, и значительные по величине осадки одиночных свай начинают превосходить осадки свайных фундаментов. Предельная несущая способность сваи в составе свайного фундамента превышает несущую способность одиночной сваи. Изменяется характер передачи усилий при взаимодействии с грунтом кустовой сваи по сравнению с одиночной: снижается нагрузка, передаваемая по стволу сваи, и увеличивается доля в нижней части ствола сваи. Наблюдается неравномерность распределения нагрузки между сваями в кусте. Наиболее нагружена угловая свая, наименее – центральная. Рядом исследователей отмечено явление блокирования или омоноличивание межсвайного грунта при расстоянии между сваями до 3 диаметров сваи, заключающееся в совместном перемещении свай и межсвайного грунта. Проявление вскрытых особенностей взаимодействия с грунтом свайных фундаментов зависит от одного из следующих параметров: геометрические характеристики свай, геометрические характеристики свайного фундамента, грунтовые условия и степень нагружения.

На основе выполненного обзора и анализа сформулированы цели и задачи проведения исследований. При этом основной целью диссертационного исследования является разработка метода количественного и качественного учёта работы каждой сваи в составе свайного поля с учётом её местоположения в группе на основе сопоставления результатов расчётов с результатами натурных наблюдений.

Во второй главе диссертации представлены результаты планирования и последующего проведения многолетнего эксперимента по исследованию взаимодействия грунта с железобетонными сваями забивного типа, входящими в состав фундамента многоэтажного здания, расположенного в Московской области. Рассматриваемое здание разноэтажное, двухсекционное. Секция 1 прямоугольная в плане, насчитывает 30 этажей, высота секции 90 м. Секция 2 в плане Г-образной формы, насчитывает 22 этажа, общая высота 70 м. Инженерно-геологические

разрезы площадки строительства в месте исследования работы свай представлены на рисунке 2.

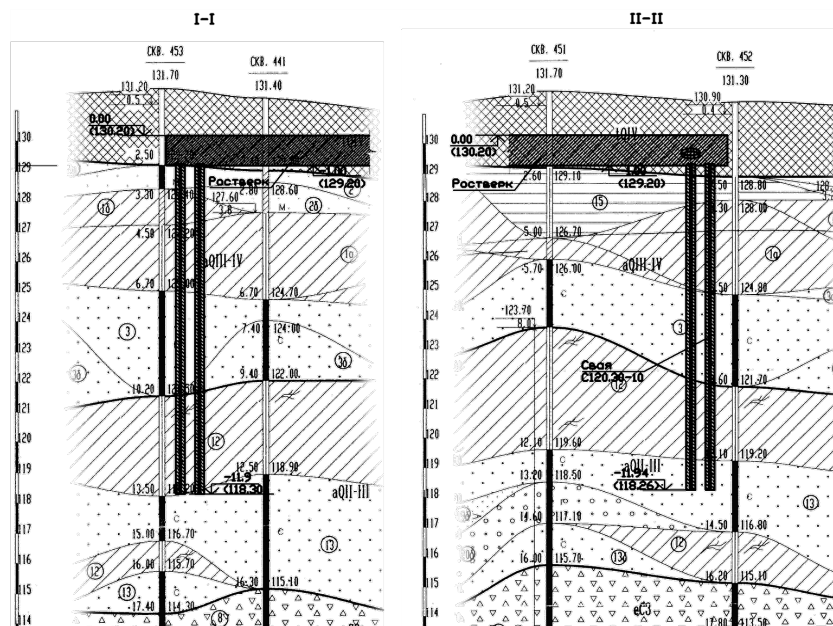


Рисунок 2 – Инженерно-геологические условия на участке исследования взаимодействия свай (секция 2 корпуса №19)

Для измерений усилий в сваях был разработан свайный динамометр СвД-100 (рисунок 3).

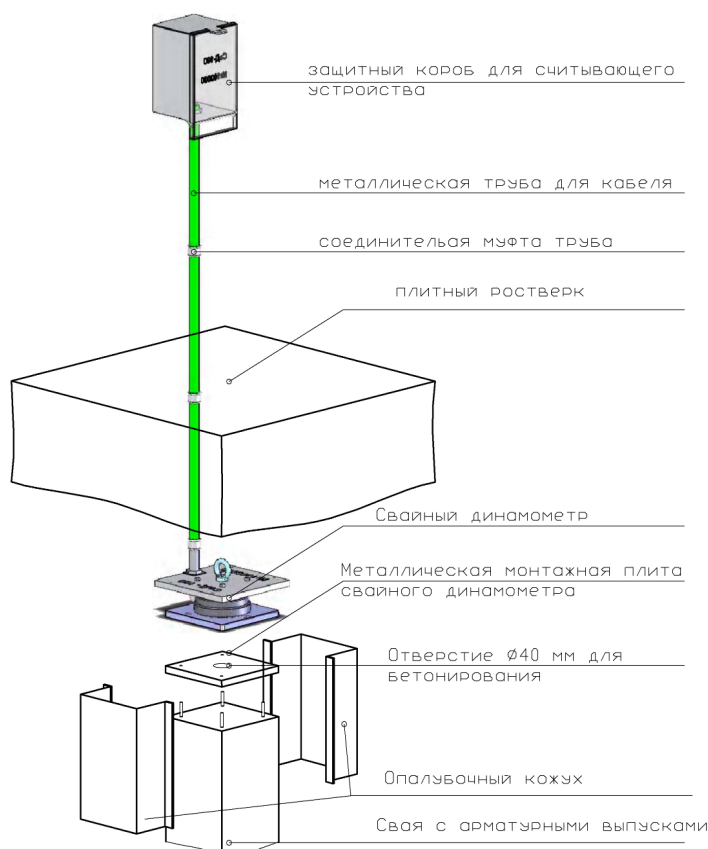


Рисунок 3 – Общая схема крепления и основные узлы свайного динамометра СвД-100

Были установлены две группы датчиков. В каждую группу входили три динамометра, размещённые в угловой, краевой и внутренней зонах свайного поля. Две группы были выбраны для контроля снятия показаний.

В результате проведено 8 циклов измерений усилий в сваях: измерения выполнены после возведения 1-, 2-, 3-, 4-, 5-, 10-, 18- и последнего, 22-го этажей. Результаты измерения усилий в сваях представлены в виде графика на рисунке 4.

На момент последнего цикла измерений превышение усилия в краевой свае над внутренними сваями достигло 1,3-кратного. Усилия в угловых сваях с самого начала измерений были больше усилий, измеренных в остальных сваях. К концу строительства здания разница достигла 1,9-кратной по сравнению с краевой и 2,3-кратной по сравнению с усилиями во внутренних сваях.

Среднее значение измеренной осадки на момент окончания монтажа всех 22 надземных этажей секции 2 составляет 22,5 мм.

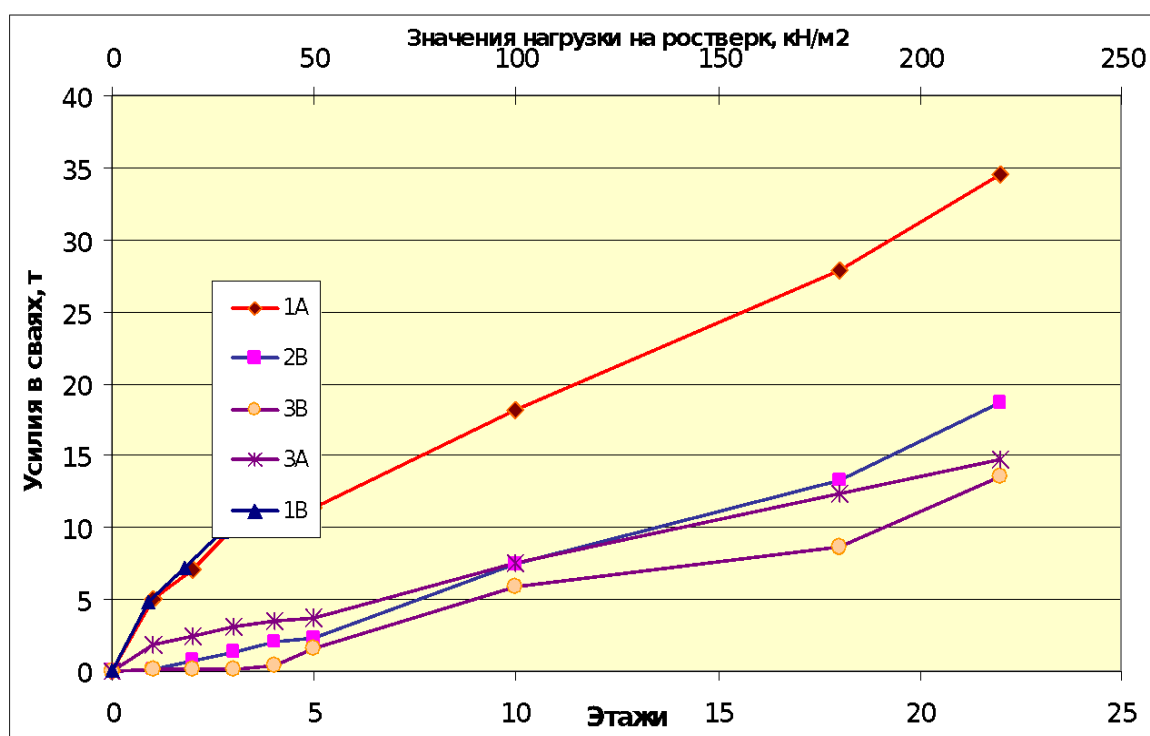


Рисунок 4 – Значения измеренных усилий в сваях в процессе строительства здания

В главе 2 также приводятся результаты испытания грунтов основания путём приложения к одиночной свае статической вдавливающей нагрузки в 82,5 т. Осадка при указанной нагрузке составила 3,24 мм.

Третья глава посвящена созданию численной расчётной модели и апробации её по результатам экспериментальных исследований.

Все этапы расчётного моделирования взаимодействия свай с грунтовым массивом выполнялись с помощью геотехнического комплекса программ *PLAXIS 3D Foundation*. Использовалась упруго-пластическая «модель Мора – Кулона», основные прочностные и деформационные параметры грунтов (угол внутреннего трения, удельное сцепление, модуль деформаций и коэффициент Пуассона)

Принципиальная расчётная схема представлена на рисунке 5, где S_p – расстояние между осями свай, которое составляло около 1,05 м, что соответствовало $3,5d$ свай сечением $0,3 \times 0,3$ м.

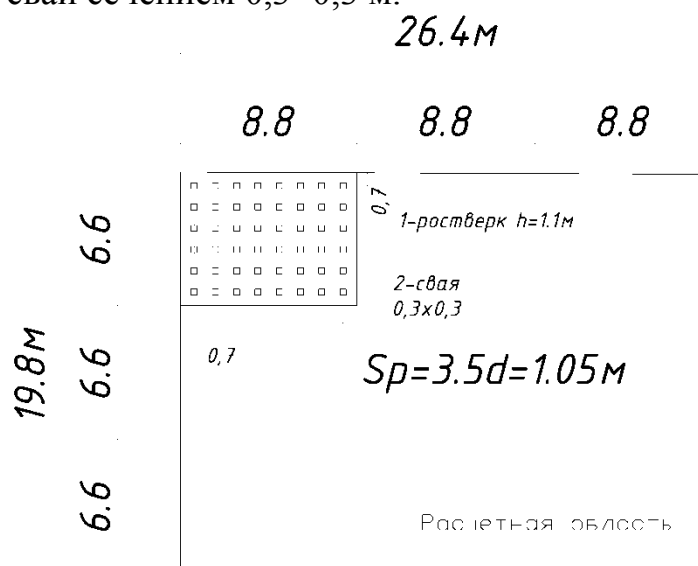


Рисунок 5 – Принципиальная расчётная схема для математического моделирования

Расчётные исследования состояли в первоначальном моделировании процесса испытания одиночной сваи, затем моделировалась работа свайной группы в целом. По завершении каждого этапа проводилось сопоставление результатов расчёта с натурными данными (рисунок 6).

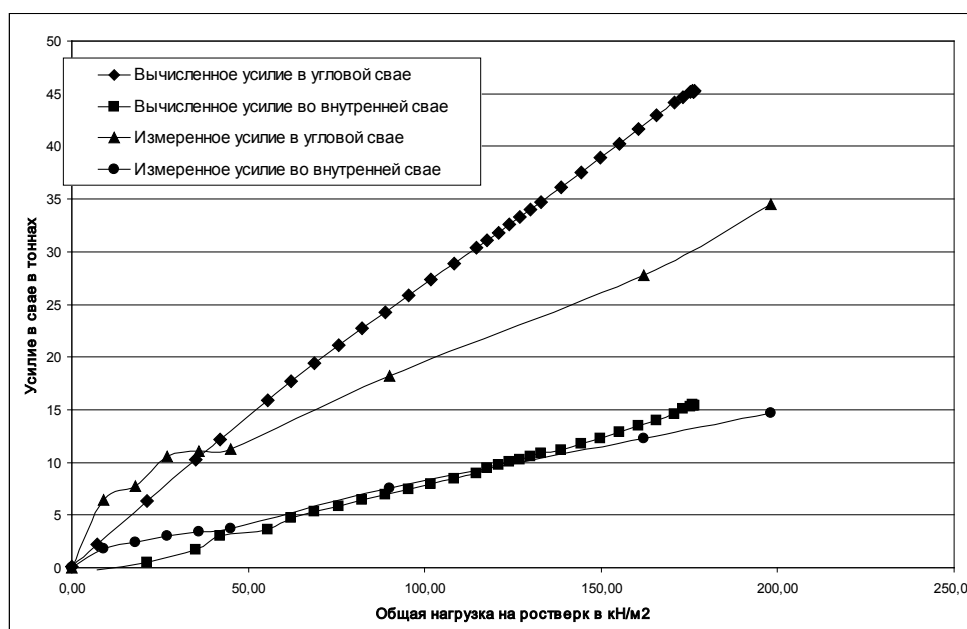


Рисунок 6 – Результаты сравнения усилий в свае, вычисленных в итоге численного моделирования измеренных в ходе эксперимента в течение всего срока нагружения

В результате сравнения расчётных и измеренных величин (см. рисунок 6) осевых усилий в сваях следует отметить хорошую сходимость усилий в краевых и

внутренних сваях. Максимальные различия в усилиях не превышают 10% для краевых свай и 12% для внутренних. Максимальные различия в угловых сваях не превышают 20 т. Такую сходимость результатов можно признать в целом как удовлетворительную.

Для подтверждения полученных результатов были описаны результаты моделирования эксперимента по нагружению группы свай Девальтовского. Величины расчётных усилий показали хорошую сходимость с усилиями, измеренными в ходе проведения эксперимента, во всём диапазоне нагружения (таблица 1).

Таблица 1 – Сопоставление измеренных и вычисленных усилий в сваях

Место расположения свай в свайном поле		Усилия в сваях, кН/м							
		Нагрузка на ростверк, кН/м ²							
		100		200		300		400	
Краевое	Измерен.	–	–	–	–	–	–	–	–
	Вычислен.	30	–	70	–	100	–	140	–
Центральное	Измерен.	37	15%	50	10%	80	5%	110	10%
	Вычислен.	20		40		70		120	
Угловое	Измерен.	30	20%	70	5%	120	2%	160	5%
	Вычислен.	55		135		140		180	

Примечание – В столбце после значений измеренных и вычисленных усилий указаны процентные значения разницы между измеренными и вычисленными усилиями.

В существующих в настоящее время различных методиках расчёта осадок, как нормативных, так и ненормируемых, учёт увеличения модуля деформации при росте напряжений в массиве встречается крайне редко. В соответствии с результатам трёхосных испытаний, модули деформации песка (начальный E_0 и упругий E_e) могут быть описаны линейными зависимостями:

$$E_0 = A\sigma_h + B; \quad (1)$$

$$E_e = C\sigma_h + D, \quad (2)$$

где σ_h – горизонтальное напряжение в массиве грунта;

A, B, C, D – эмпирические коэффициенты для расчётов модулей деформации, полученные в результате стабилметрических испытаний.

Уровень напряжений σ_h определён на основе численного расчёта путём сопоставления результатов горизонтальных напряжений на этапах до и после приложения полезной нагрузки. Для глубины 13 м был принят средний диапазон уровней $\sigma_h = 111$ кПа без нагрузки и $\sigma_h = 133$ кПа при приложении веса каркаса здания. С учётом природного давления на указанной глубине, используя зависимости 1 и 2, в общем случае получим:

$$E_0 \text{ без нагрузки от здания} = 98 \times 0,111 + 41 = 51,9 \text{ МПа};$$

$$E_0 \text{ с учетом веса каркаса} = 98 \times 0,133 + 41 = 54,0 \text{ МПа}.$$

Обобщив результаты, можно отметить, что выбранная методика моделирования была проверена и обоснована путём сравнения результатов расчёта в программном комплексе семейства PLAXIS с использованием модели Мора –

Кулона с данными статического испытания забивной сваи и апробирована по результатам проведения одного масштабного и одного полномасштабного эксперимента. Использование методики увеличения модуля общей деформации под нижним концом сваи в зависимости от уровней объёмных напряжений σ_h позволило получить фактически ту же осадку фундамента (23 мм), что и при натурных измерениях (22,5 мм) при проведении полномасштабного эксперимента.

В четвертой главе описываются результаты дальнейшей работы с верифицированной расчётной моделью, в частности, проводятся параметрические исследования с целью выявления факторов, влияющих на процессы взаимодействия свай с грунтом при работе в составе группы. Взаимовлияние свай в группе оценивалось через коэффициент взаимодействия K_v , равный отношению усилий в краевой или угловой свае к усилиям в центральной свае.

В процессе исследований подтверждена зависимость влияния прочности грунта на распределение усилий в сваях (рисунок 7). При изменении прочностных характеристик на $\pm 30\%$ было получено (при шаге свай $4d$) для угловой сваи увеличение K_v с 3,2 до 4,1, т.е. на 34%, а для краевой – с 2,3 до 2,7, т.е. на 17%. В связи с этим был сделан вывод, что при расчётах и проектировании фундаментов в виде свайных полей следует рассматривать два варианта, вводя коэффициент надёжности по грунту как в сторону повышения, так и в сторону понижения прочностных характеристик грунта, и для проектирования принимать наихудшие результаты.

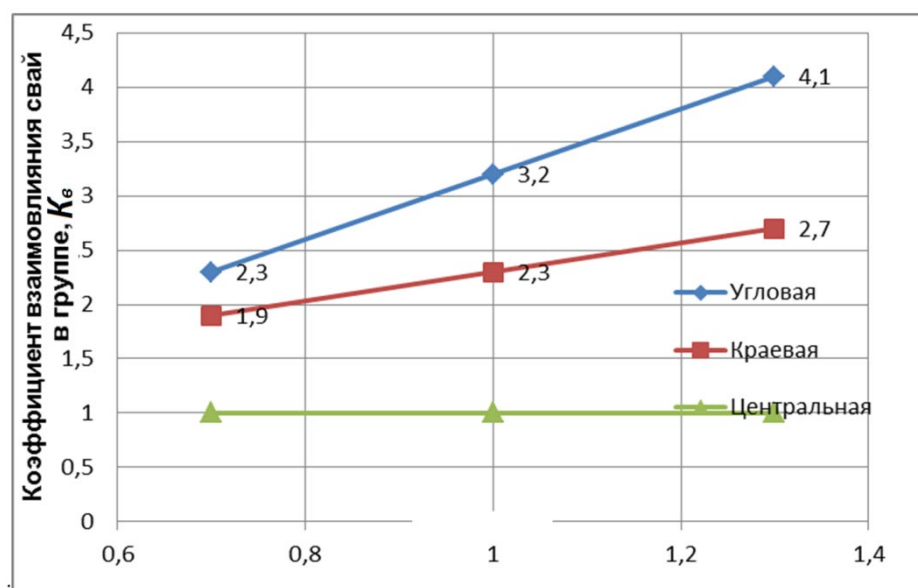


Рисунок 7 – Интенсивность изменения взаимовлияния свай в зависимости от прочностных свойств грунта

С целью исследования изменения K_v в процессе нагружения были выполнены две группы расчётов для характерных свайных групп с шагом расположения свай $3d$ (вариант 1) и $5d$ (вариант 2). Схема расчётной модели представлена на рисунке 8.

Нагружение расчётного фрагмента ростверка проводилось равномерно ступенями до тех пор, пока усилия в сваях, расположенных во внутренней зоне ростверка, превысили усилия в угловых и краевых сваях, т.е. до наступления

снижения отношений усилий в крайних сваях, что означает наступление эффекта краевой сваи.

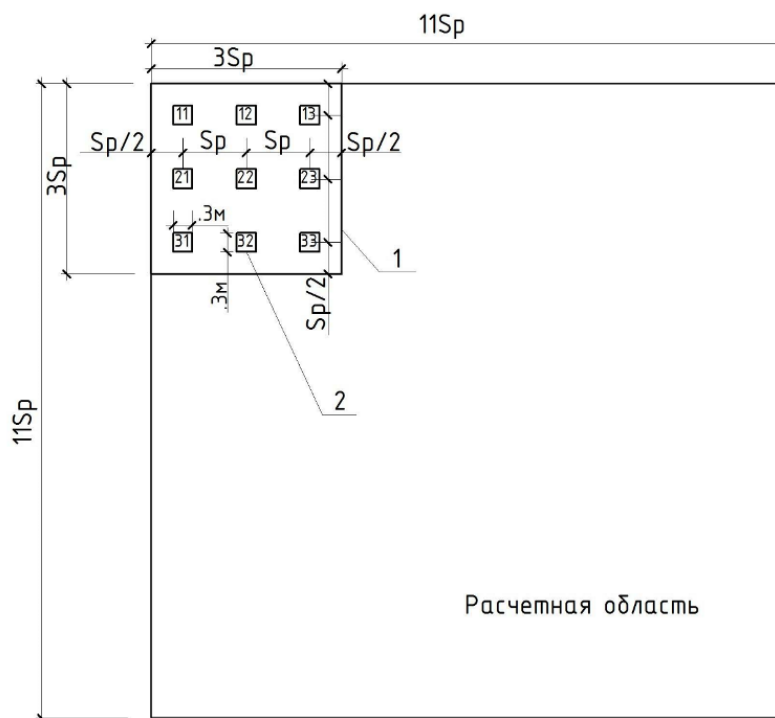


Рисунок 8 – Общий вид расчётной модели

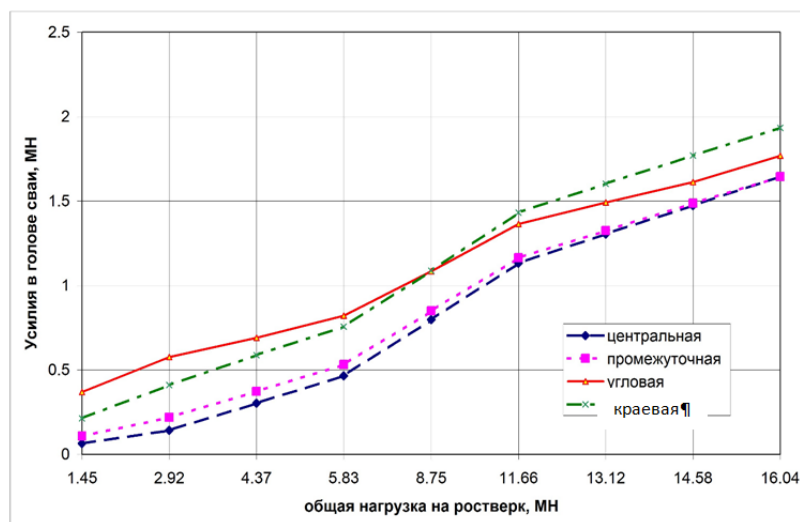
Эффект краевой сваи характеризуется резким снижением относительных значений усилий, возникающих в угловых и краевых сваях к центральным вследствие истощения несущей способности по грунту из-за возрастания общих нагрузок на фундамент

Как видно из рисунка 9 а, наибольшие сжимающие усилия возникают в краевых сваях, усилия в остальных (внутренних) сваях практически одинаковые. Снижение относительной величины усилий достигнуто только для угловой сваи, в которой при нагрузке 1,20 МПа усилия стали меньше, чем в краевых. Грунт в межсвайном пространстве практически не влияет на несущую способность свай по боковой поверхности, так как его зона, имеющая одинаковую осадку со сваями (оседающая вместе с ними), располагается вблизи уровня пяты свай. Только в районе угловой сваи наблюдается «прокалывание» существенной толщи межсвайного грунта (до $1/5$ длины свай L).

Для варианта 2 фундамента при шаге свай 1,5 м ($S_p = 5d$) можно отметить следующее. Нагрузка на ростверк была доведена до 0,60 МПа. Как видно из рисунка 10, первоначально усилия в краевых и угловых сваях значительно выше усилий в центральных сваях фундамента. Анализ изменения деформаций ростверка показал, что первоначально при нагрузке до 0,40 МПа наблюдался его прогиб, затем при увеличении нагрузки – выгиб.

Из рисунка 9 б, видно, что в зоне трансформации сопротивления краевых и внутренних свай их податливости наиболее близки между собой. При заданной нагрузке варьирование шага свай также выявит зону их наиболее близкой податливости. Такой шаг может оказаться оптимальным.

а



б

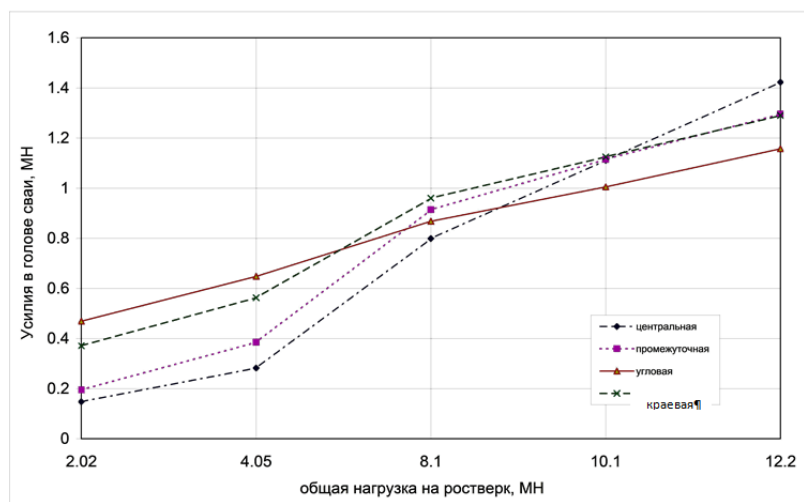


Рисунок 9 – Зависимость осевых сжимающих усилий в сваях к общей нагрузке на ростверк: а – при расстоянии между сваями $3d$; б – при расстоянии $5d$

Также в четвёртой главе рассматривается эффект экранирования осадки сваи соседними сваями группы. Для упрощения понимания назовём эту величину коэффициентом влияния в свайной группе K_{ij} .

Расчёты взаимовлияния свай выполнялись с использованием идеально-упруго-пластической грунтовой модели Кулона – Мора. Взаимовлияние свай в соответствии с идеологией п. 7.4.2-7.4.3 СП 24.13330.2016 рассчитывалось как дополнительная осадка j -й сваи ΔW_j от нагрузки, приложенной к i -й свае $N_{icв}$. Для удобства сопоставления результатов расчёта используется параметр, характеризующий величину снижения жёсткости рассматриваемой j -й сваи от нагрузки, действующей на соседнюю i -ю сваю K_{ij} . Для упрощения понимания назовём эту величину коэффициентом влияния в свайной группе.

$$K_{ij} = \frac{N_{icв} \cdot [kT]}{\Delta W_j \cdot [м]} \quad (3)$$

В таблице 2 приведены результаты численного расчёта 9 железобетонных свай призматического сечения $0,3 \times 0,3$ м, расположенных в один ряд с шагом 0,9 м. Длина свай 12 м. Первый слой грунта имеет характеристики $\varphi = 30^\circ$; $c = 0,01$ т/м²; $E = 20$ МПа, распространяется до глубины 12 м от поверхности земли. Второй слой грунта имеет характеристики $\varphi = 30^\circ$; $c = 0,01$ т/м²; $E = 25$ МПа, распространяется до глубины до 24 м от поверхности земли. Глубина сжимаемой зоны принята на основе требований действующих норм и составила 12 м. На рисунке 10 представлен пример результатов аналитического расчёта осадок свайной группы от взаимовлияния в один ряд, выполненный согласно формулам 7.4.2-7.4.3 СП 24.13330.2016.

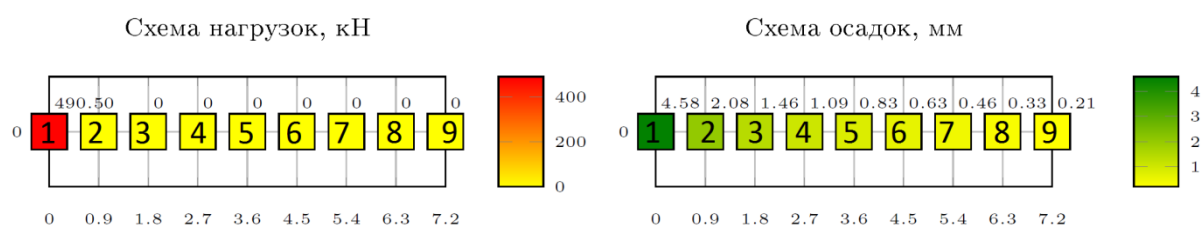


Рисунок 10 – Расчёт значений дополнительных осадок группы свай в один ряд согласно 7.4.2-7.4.3 СП24.1333.2011

С применением МКЭ было выполнено три схемы расчётов. Первая схема предусматривала возрастающие нагрузки N_i к свае №1. Поочерёдно включались j -е свайные пары по схеме №1 и №2; №1 и №3; ...; №1 и №9. Вторая схема расчёта: возрастающая нагрузка N_i приложена к свае №1, все сваи включены одновременно. Третья схема расчёта предусматривала приложение к каждой из девяти свай нагрузки $N_i = 50$ т. На рисунке 11 представлен пример результатов расчёта, полученный для схемы 2.

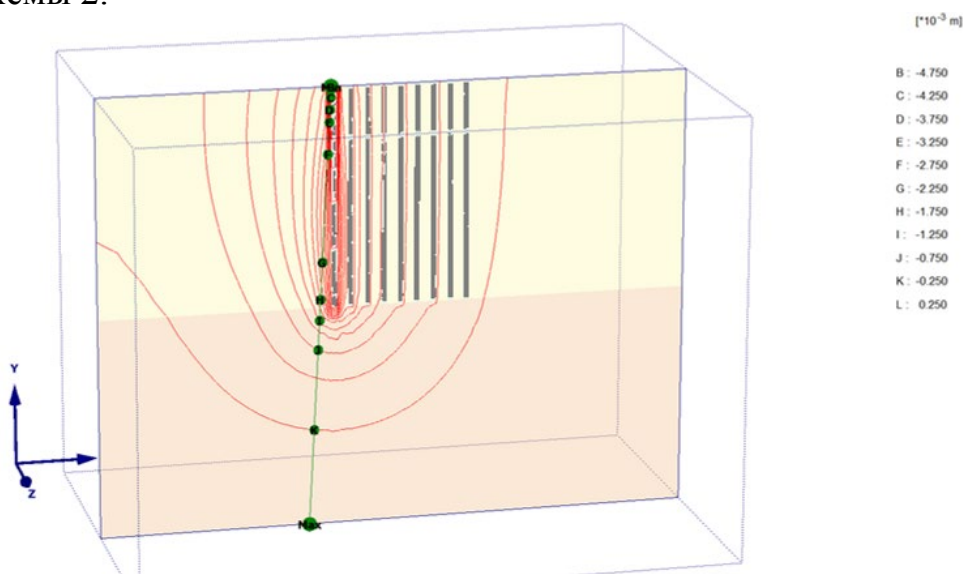


Рисунок 11 – Расчёт МКЭ дополнительных осадок j -х свай №2 – №9 от нагруженной i -й сваи №1 в PLAXIS.

Распределения перемещений массива грунта. Результаты определения дополнительных осадок свай, выполненные по рекомендациям СП 24.13330.2016, а также по МКЭ, при различных условиях нагружения приведены в таблице 2.

Значение дополнительной осадки по схеме 1 сваи №9 при нагрузке 50 т примерно на 10% больше значения осадки по сравнению с расчётом по схеме 2, в котором между сваями №1 и №9 в расчётной схеме присутствует ещё шесть свай. В результате можно сделать вывод о наличии экранирующего (армирующего) эффекта в свайных группах. Кроме этого, отмечаются меньшие значения дополнительных осадок, рассчитанных по СП, по сравнению с величинами осадок, полученными на основе расчёта по МКЭ.

Записав осадки, представленные в таблице 2, в виде коэффициентов K_{ij} , получим значения, представленные в таблице 3.

Таблица 2 – Расчётные значения дополнительных осадок свай на основе МКЭ и рекомендаций СП 24.1333.2011

Исходные условия расчёта	№ схемы расчёта	Дополнительная осадка свай ΔW_i и ΔW_j , мм Расстояния в метрах, i -я свая – 0,0 м, j -е сваи – все остальные								
		Свая 1	Свая 2	Свая 3	Свая 4	Свая 5	Свая 6	Свая 7	Свая 8	Свая 9
		0	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	6,3	7,2
МКЭ пары свай. Нагрузка 50 т	1	4,8	1,85	1,31	1,02	0,814	0,664	0,54	0,45	0,39
МКЭ. Нагрузка 50 т	2	4,75	1,8	1,3	1	0,79	0,65	0,52	0,43	0,35
СП. Нагрузка 50 т	2	4,58	2,08	1,46	1,09	0,83	0,63	0,46	0,33	0,21
МКЭ. Нагрузка 25 т	2	2,1	0,923	0,66	0,51	0,40	0,33	0,27	0,22	0,18
СП. Нагрузка 25 т	2	2,29	1,04	0,73	0,54	0,42	0,31	0,23	0,16	0,1
МКЭ. Нагрузка 75 т	2	6,95	2,6	1,85	1,44	1,15	0,932	0,765	0,63	0,53
СП. Нагрузка 75 т	2	6,95	3,16	2,21	1,66	1,26	0,96	0,71	0,49	0,31
МКЭ. Нагрузка 50 т на все сваи	3	11,96	13,15	13,89	14,31	14,44	14,31	13,92	13,2	12,13

Таблица 3 – Распределение значений коэффициента влияния K_{ij} в девяти сваях, расположенных в один ряд

Исходные условия расчёта	№ схемы расчёта	Коэффициент экранирования (армирования) K_{ij}								
		Свая 1	Свая 2	Свая 3	Свая 4	Свая 5	Свая 6	Свая 7	Свая 8	Свая 9
МКЭ пары свай. Нагрузка 50 т	1	10,3	27,0	38,2	49,0	61,4	75,3	92,6	111,1	132,0
МКЭ. Нагрузка 50 т	2	10,5	27,8	38,5	50,0	63,3	76,9	96,2	116,3	138,9
СП. Нагрузка 50 т	2	10,5	22,9	33,3	45,5	61,0	83,3	119,0	185,2	357,1
МКЭ. Нагрузка 25 т	2	10,9	24,0	37,7	49,0	61,7	76,5	93,3	113,1	136,6
СП. Нагрузка 25 т	2	10,9	24,0	34,2	46,3	59,5	80,6	108,7	156,3	250,0

Продолжение таблицы 3

Исходные условия расчёта	№ схемы расчёта	Коэффициент экранирования (армирования) K_{ij}								
		Свая 1	Свая 2	Свая 3	Свая 4	Свая 5	Свая 6	Свая 7	Свая 8	Свая 9
МКЭ. Нагрузка 75 т	2	10,8	28,8	40,5	52,1	65,2	80,5	98,0	118,5	142,3
СП. Нагрузка 75 т	2	10,8	23,7	33,9	45,2	59,5	78,1	105,6	153,1	241,9
МКЭ. Нагрузка 50 т на все сваи	3	4,2	3,8	3,6	3,5	3,5	3,5	3,6	3,8	4,1

Анализировать значения коэффициентов влияния K_{ij} удобнее на графике изменения полученных значений по номеру сваи в ряду группы. Такой график представлен на рисунке 14. Анализируя его, можно отметить существенные отличия данных по краевым сваями (№7 – №9) при расчёте согласно рекомендациям СП 24.13330.2016 и численным расчётом по МКЭ. Примечательным фактом является то, что формулы п. 7.4.2-7.4.3 СП 24.13330.2016 завышают коэффициенты экранирования для крайних трёх свай по сравнению с расчетом МКЭ, при этом показывая практически полную сходимость результатов расчётов K_{ij} для свай в первой трети группы (№2 – №6). Этот результат было решено проверить путём сопоставительных расчётов по МКЭ свайной группы 5×5, квадратной в плане. Повторив расчёты по МКЭ по схеме 2, дополним таблицу 2 данными для куста свай (рисунок 12). Для корректности примем для анализа сваи,

лежащие на диагонали свайной группы 5×5 , и всё пересчитаем в зависимости от расстояния от i -й нагружаемой сваи до j -й. Запись дополнительных осадок в таком виде представлена в таблице 4, а коэффициенты K_{ij} – в таблице 5. Для удобства восприятия полученные значения коэффициентов экранирования (армирования) нанесём на график, представленный на рисунке 13.

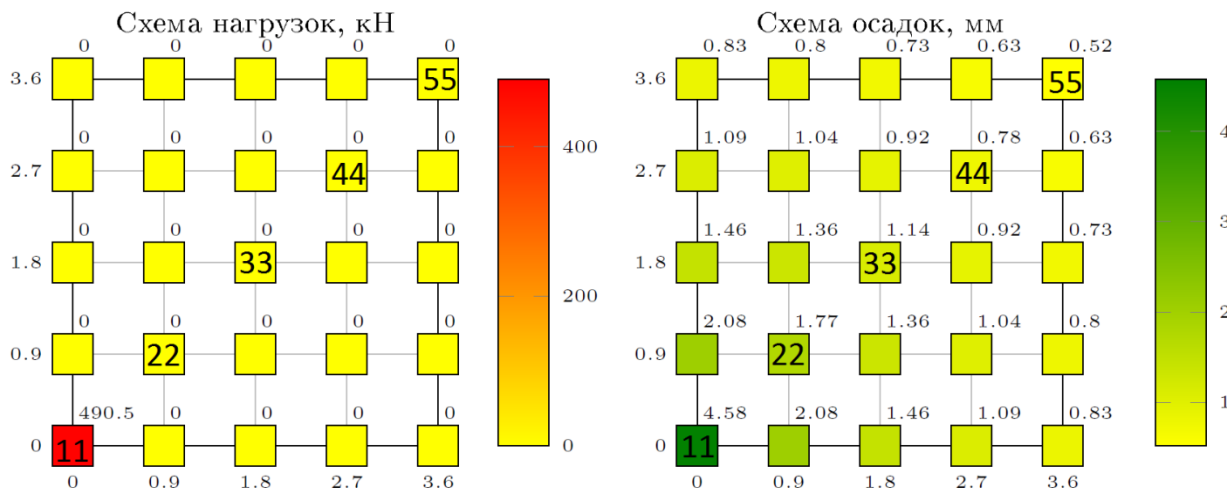


Рисунок 12 – Расчёт значений дополнительных осадок группы свай 3×3 согласно 7.4.2-7.4.3 СП24.1333.2011

Таблица 4 – Расчётные значения дополнительных осадок свай на основе МКЭ и рекомендаций СП 241333.2011

Исходные условия расчёта	Дополнительная осадка свай ΔW_i и ΔW_j , мм Расстояния в метрах, i -я свая – 0,0 м, j -е сваи – все остальные				
	Свая 11 0 м	Свая 22 1,27	Свая 33 2,55	Свая 44 3,82	Свая 55 5,09
МКЭ. Нагрузка 50 т	5,51	1,3	0,814	0,557	0,407
СП. Нагрузка 50 т	4,58	1,77	1,14	0,78	0,52

Таблица 5 – Распределение значений коэффициента влияния K_{ij} в пяти диагональных сваях, расположенных в группе 5×5

Исходные условия расчёта	Коэффициент экранирования (армирования) K_{ij}				
	Свая 11 0 м	Свая 22 1,27 м	Свая 33 2,55 м	Свая 44 3,82 м	Свая 55 5,09
МКЭ. Нагрузка 50 т	9,07	38,5	61,4	89,8	122,8
СП. Нагрузка 50 т	10,5	28,24	43,85	64,10	96,15

Анализируя результаты расчётов свайной группы 5×5 на основе МКЭ, можно отметить, что экранирующая способность свай, работающих в группе, зависит от формы и размеров этой группы. Общая распределительная способность деформаций однорядной группы свай примерно на 20-30% меньше, чем в группе 5×5 , что в значениях коэффициентов влияния K_{ij} больше на те же 20-30%. Кроме

того, можно отметить, существенные отличия величин для краевых свай при расчёте согласно нормам и численным расчётом по МКЭ.

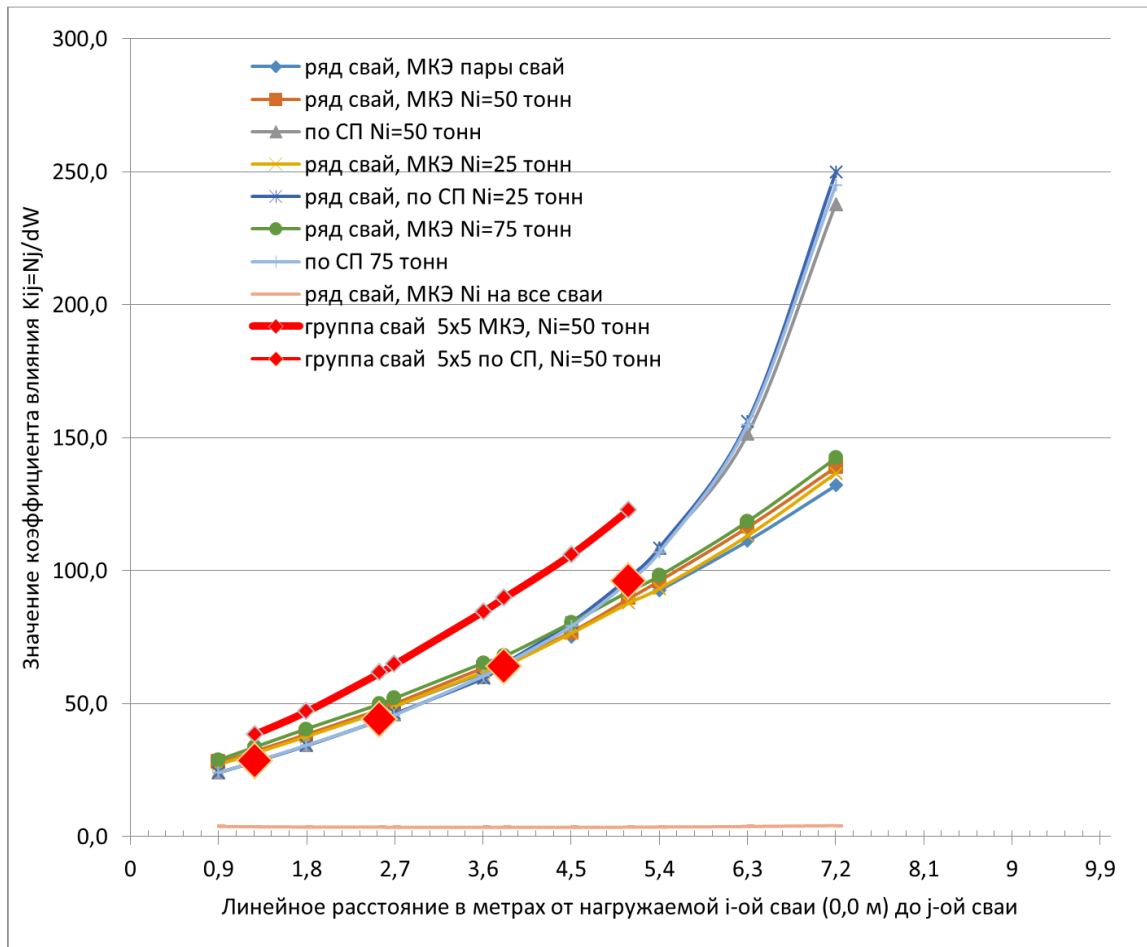


Рисунок 13 – Сопоставительный анализ расчётных значений коэффициента экранирования (армирования) K_{ij} для свайной группы из 9 свай в один ряд по СП24.1333.2011 и численного расчёта по МКЭ в PLAXIS

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненный анализ литературных источников выявил основные факторы, влияющие на взаимодействие свай между собой и с грунтом, продемонстрировал относительно небольшое число опубликованных экспериментальных работ по наблюдениям за распределением усилий в сваях, работающих в составе группы.

2. Разработана программа и проведены натурные исследования распределения усилий между сваями в процессе строительства высотного жилого здания, которые показали, что усилия в угловой свае в 2,3 раза больше, чем усилия в сваях, расположенных в центральной зоне свайного поля, и в 1,9 раза больше усилий в свае в краевой зоне свайного поля. Усилия в краевой свае в 1,3 раза больше усилий, измеренных в сваях центральной зоны.

3. Полученные результаты экспериментальных исследований подтвердили существование эффекта, связанного с различиями во взаимодействии свай с грунтом в зависимости от их расположения в группе. В связи с этим распределение усилий в сваях в границах свайного поля следует определять на основании расчетов в объемной постановке системы «основание – фундамент – здание».

4. Результаты численных исследований, выполненных на расчетной модели, апробированной на двух экспериментальных площадках, выявили основные параметры, влияющие на результаты расчетов: расстояние между сваями, нагрузки, механические характеристики грунта.

5. При проектировании свайных и свайно-плитных фундаментов следует рассматривать возможность возникновения эффекта краевых свай, в соответствии с которым сопротивление краевых свай может быть как существенно больше, так и существенно меньше, чем у внутренних свай.

6. Принимая во внимание зависимость распределения усилий в свайном поле от грунтовых условий и учитывая, что с увеличением механических (в первую очередь – прочностных) характеристик грунта жесткость грунта основания и, соответственно, соотношение между усилиями в крайних и центральных сваях увеличиваются, расчеты необходимо выполнять с введением коэффициентов надежности по грунту как в сторону увеличения, так и в сторону снижения механических характеристик грунта, а подбор сечения и армирование следует осуществлять по самому неблагоприятному варианту.

7. Разработанный свайный динамометр (патент RU69241U1) показал надежную работу в течение трех лет экспериментальных исследований.

8. Сопоставление расчетов осадок взаимовлияния на основе формулы Федоровского показывает хорошую сходимость с результатами расчета дополнительных осадок по методу МКЭ во внутренней части свай, расположенных в первых $\frac{2}{3}$ длины расчетной модели свайной группы. При этом в периметральной зоне, в крайней трети длины расчетной модели значения имеют плохую сходимость. В диссертационной работе это утверждение было проверено с различными уровнями нагрузок и шагов свай. В целом результаты расчетов

показывают, что экранирующая способность свай, работающих в группе, зависит, в том числе, от формы и размеров этой свайной группы.

9. Учет наведенного напряженного состояния, образующегося в результате забивки и нагружения свай, приводит к повышению сопротивления грунта по боковой поверхности свай, увеличению модуля деформации грунта и, в конечном счете, к снижению осадки.

Результаты проведенных исследований внедрены в действующие нормативные документы (СП24.13330.2016 Свайные фундаменты, СП267.1325800.2016 Здания и комплексы высотные. Правила проектирования) и применены при проектировании фундаментов зданий и сооружений в Павшинской пойме Красногорского района Московской области, высотных зданий Москва – СИТИ, Лахта-центр в Санкт-Петербурге и др.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследований

Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволяют сформулировать перспективы дальнейшей разработки темы диссертации:

- накопление и обобщения результатов практических измерений усилий в сваях;

- верификации расчетных моделей на основании фактического распределения усилий в свайных фундаментах

- изучение механической работы фундаментов со сваями различной формы (круглые, треугольные и пр.

- исследование применимости результатов в специфических грунтах (просадочные, набухающие и др.).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Основные результаты работ, выводы и положения диссертации опубликованы в следующих работах.

Статьи в изданиях, включённых в перечень рецензируемых научных изданий по списку ВАК РФ:

1. Шулятьев, О.А. Натурные измерения распределения нагрузок между сваями в фундаменте / О. А. Шулятьев, А.И. Харичкин // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2009. – № 6. – С. 17-22.

2. Соловьев, Д.Ю. Экспериментальные исследования несущей способности анкерных свай и расчётные методы её определения / Д.Ю. Соловьев, А.И. Харичкин, С.В. Курилло [и др.] // Геотехника. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 44-55.

Участие в конференциях:

3. Kharichkin, A. Soil-Pile Interaction in Pile Foundation and Pile Reactions Monitoring / A. Kharichkin, O. Shuljatjev, S. Bezvoley; Gersevanov Research Institute of Foundations and Underground Structures, Moscow, Russia // Proceedings of International meeting of ISSMGE TC18 Pile foundation. – Frankfurt am Main, 14.05.2009.-P.243-256.

4. Шулятьев, О.А. Взаимодействие забивных свай с грунтом и между собой в составе свайного поля / О.А. Шулятьев, А.И. Харичкин // Сборник статей международной научно-технической конференции. Численные методы расчётов в практической геотехнике. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2012. – С. 221-227.

5. Харичкин, А.И. Особенности взаимодействия свай между собой и с грунтом в составе групп / А.И. Харичкин, О.А. Шулятьев, С.В. Курилло [и др.] // Вопросы проектирования и устройства надземных и подземных конструкций зданий и сооружений. – Санкт-Петербург: СПГАСУ, 2018. – С. 56-66.

Патенты:

6. Патент РФ №69241 Свайный динамометр СВД-100 / А.И. Харичкин, В.А. Годзиковский, В.Д. Антонов. Бюл. изобр., 2006, № 1.

7. Патент РФ № 2328576. Способ возведения плитно-свайного фундамента / В.П. Петрухин, О.А. Шулятьев, В.С. Лесницкий, А.И. Харичкин. Бюл. изобр., 2008, №19.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

8. Петрухин, В.П. Эффект краевой сваи и его учёт при расчёте плитного ростверка / В.П. Петрухин, С.Г. Безволев, А.И. Харичкин // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2007. – №11. – С. 90-97.

9. Харичкин, А.И. Моделирование статического нагружения свайной группы с различными условиями расположения свай / А.И. Харичкин // Вестник НИЦ «Строительство». – 2019. – №1 (20). – С. 113-119.

10. Харичкин, А.И. Практическое исследование эффекта краевой сваи / А.И. Харичкин, С.Г. Безволев, О.А. Шулятьев // НИИОСП. Сборник научных трудов. – М.: Издательство «ЭСТ», 2006. – С.202-211.