

На правах рукописи



Ткачев Игорь Геннадьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДОВ
РАСЧЕТА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ
С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина» на кафедре «Основания и фундаменты»

Научный руководитель: **Мариничев Максим Борисович**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Основания и фундаменты» КубГАУ

Официальные оппоненты: **Маковецкий Олег Александрович**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет», профессор кафедры
«Строительные конструкции и вычислительная механика»

Нуждин Леонид Викторович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
(СибСтрин)», профессор кафедры
«Инженерная геология, основания
и фундаменты»

Ведущая организация: **АО «НИЦ «Строительство»**

Защита диссертации состоится «23» октября 2025 г. в 10:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2, ауд. 208, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте <https://www.tyuiu.ru/media/pdf/1bc8bd41-edb9-47b2-8d31-6dee3156e992.pdf>.

Автореферат разослан «08» августа 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Степанов Максим Андреевич

Актуальность темы исследования. В настоящее время в южных регионах Российской Федерации ведется масштабное строительство многоэтажных зданий и сооружений, что приводит к существенному росту внешних нагрузок на несущие слои основания. При этом выбор рациональных конструкций фундаментов в рассматриваемых регионах должен обеспечивать их безаварийную эксплуатацию в течение нормативного срока службы объектов строительства с учетом возможного влияния неблагоприятных факторов, к которым относятся сейсмические и ветровые воздействия, а также неравномерная сжимаемость основания в плане и по глубине.

При значительных вертикальных и горизонтальных нагрузках, передаваемых от надземного сооружения, наиболее приемлемым решением часто являются свайные или свайно-плитные фундаменты, способные снижать сверхнормативные деформации основания. В то же время, ограниченные габариты фундаментных плит в плане при многоэтажном и высотном строительстве в сейсмических районах затрудняют размещение достаточного количества свай при условии их жесткой заделки в фундаментную плиту, поскольку в таких случаях необходимо обеспечивать высокую несущую способность жестких узловых соединений при действии горизонтальных и сейсмических нагрузок.

Для отдельных случаев многоэтажного и высотного строительства в сложных и особо сложных инженерно-геологических условиях, а также в сейсмических районах более экономичным и технологически обоснованным может быть решение с применением свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем (далее ПРС), который устраивается на участке между оголовками свай и подошвой фундаментной плиты. Установлено, что такое решение за счет рационального шага свай, высоты ПРС и габаритов оголовков может существенно снижать действие горизонтальных и моментных нагрузок в верхней части свай, в том числе за счет включения в работу межсвайного грунта, плитной части фундамента и тела ПРС.

В геотехнической практике для объектов со столбчатыми и ленточными ростверками разработаны рекомендации по назначению высоты ПРС, выбору материала слоя и плотности его сложения. Однако нормативная база для расчета свайных фундаментов с ПРС проработана пока недостаточно, что ограничивает возможность их применения для многоэтажных зданий, в том числе в районах с высокой сейсмичностью, поэтому выбранная тема диссертационной работы является *актуальной*.

Степень разработанности темы. Исследованиями работы фундаментов с ПРС в разное время занимались ученые: Абелев М. Ю., Антонов В. М., Баркан Д. Д., Бартоломей Л. А., Безволев С. Г., Готман А. Л., Готман Н. З., Денисенко В. В., Зарецкий Ю. К., Знаменский В. В., Караулов А. М.,

Королев К. В., Крутов В. И., Ляшенко П. А., Маковецкий О. А., Малинин А. Г., Мангушев Р. А., Мариничев М. Б., Мирсаяпов И. Т., Мустакимов В. Р., Нуждин Л. В., Полищук А. И., Пономарев А. Б., Саурин А. Н., Столяров В. Г., Тер-Мартirosян А. З., Тер-Мартirosян З. Г., Федоровский В. Г., Шаевич В. М., Шарафутдинов Р. Ф., Шейнин В. И., Шулятьев О. А., Carlson B., Eekelen S. J. M., Hewlett W. J., Mandolini A., Randolph M. F., Viggiani C., Xirong N., Yuhao H., Yanfang S. и др.

В научных работах конструирование такого типа фундаментов рассматривается либо как классическое свайное решение с исключением горизонтальных нагрузок на сваи ввиду отсутствия жесткой связи между ними и плитой, либо как армированное жесткими вертикальными элементами основание с приведением объема усиливаемого грунта к осредненным деформационным и прочностным характеристикам. Оба подхода хорошо известны и научно обоснованы. В практике многоэтажного и высотного строительства, где часто требуется применение большеразмерных свай переменной длины с нерегулярной привязкой в плане из-за необходимой соосности свай с вертикальными несущими конструкциями здания, применение принципа армированного основания с осреднением его характеристик может быть использовано лишь в очень ограниченном количестве случаев. Поэтому в данной работе с учетом области ее применения вертикальные элементы рассматриваются как сваи, работа которых в грунте регулируется за счет выполнения между ними и фундаментной плитой промежуточного распределительного слоя, подбора его характеристик, а также устройства монолитных свайных оголовков. При этом ранее ПРС и его вкладу в общую эффективность всей конструкции фундамента уделялось недостаточное внимание. Исследования отечественных авторов и данные наблюдений в разных регионах Российской Федерации (Москва, Краснодарский край, Санкт-Петербург, Новосибирская область и др.) свидетельствуют о повышении эффективности свайных фундаментов при устройстве ПРС.

Цель работы заключалась в совершенствовании конструкции и методов расчета свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем из сыпучего материала, обеспечивающих их надежную эксплуатацию в пылеватоглинистых грунтах для промышленных и гражданских зданий.

Задачи исследований:

1. Провести численные исследования для оценки влияния параметров свайного поля и внешней нагрузки от здания на конструктивное решение свайного фундамента с ПРС, в том числе с учетом устройства железобетонных свайных оголовков;

2. Установить эффективность устройства ПРС на участке между оголовками свай и подошвой фундаментной плиты как способа снижения горизонтальных усилий, возникающих в сваях при сейсмическом воздействии различной интенсивности;

3. Разработать аналитический метод расчета свайных фундаментов с ПРС, учитывающий устройство железобетонных оголовков свай. Определить область применения предложенного метода на основе сравнения полученных результатов с данными численных исследований;

4. Разработать классификацию технических решений свайных фундаментов с ПРС в зависимости от категорий сложности инженерно-геологических условий строительства;

5. Внедрить разработанные технические решения для свайных фундаментов с ПРС в практику строительства многоэтажных и высотных зданий в сложных инженерно-геологических условиях. Обеспечить проведение геотехнического мониторинга для оценки результатов исследований и определить эффективность полученных решений.

Объект исследования: свайный фундамент с промежуточным распределительным слоем и железобетонными оголовками свай, устраиваемый в пылевато-глинистых грунтах.

Предмет исследования: взаимодействие свайного поля, железобетонных оголовков свай и подошвы фундаментной плиты с промежуточным распределительным слоем из сыпучего материала.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлена закономерность влияния параметров свайного поля и внешней нагрузки от здания на конструктивное решение ПРС с учетом устройства железобетонных оголовков свай. Установлено, что осадка ПРС может составлять до 36% от общей осадки свайного фундамента, при этом введение оголовков свай позволяет регулировать напряжения в теле ПРС, уменьшать осадки фундаментной плиты и снижать их неравномерность в пределах слоя на 31–64% при соответствующих диаметрах оголовков $1,5\text{--}2,5d$ (где d – диаметр свай) в сравнении с решениями без оголовков для межсвайного расстояния $5\text{--}7d$.

2. Установлено, что устройство ПРС между оголовками свай и подошвой фундаментной плиты при 7–9-балльной интенсивности сейсмического воздействия приводит к снижению в 10–20 раз максимальных горизонтальных усилий в сваях по сравнению с усилиями при их жесткой заделке в тело плиты и позволяет передавать на сваи преимущественно сжимающие нагрузки, что приводит к существенному снижению их количества в составе свайного фундамента с ПРС;

3. Разработан аналитический метод расчета параметров ПРС в составе свайных фундаментов, базирующийся на условии его равновесия, расчете действующих сил и напряжений, с ограничением областей предельного состояния кинематическими огибающими, имеющими форму прямых линий;

4. Разработана классификация технических решений свайных фундаментов с ПРС, рекомендуемых к реализации с учетом их соответствия простой, средней, сложной и особо сложной категориям инженерно-геологических условий строительства.

Практическая и теоретическая значимость работы. *Практическая ценность работы* заключается в доведении ее результатов до практического применения. Разработаны рекомендации и метод расчета параметров промежуточного распределительного слоя, разработаны технические решения узлов сопряжения свай (оголовков) с ПРС. Результаты исследований внедрены при проектировании и строительстве фундаментов многоэтажных зданий в сложных инженерно-геологических условиях Краснодарского края в период 2013–2024 гг.

Теоретическая значимость работы заключается в теоретическом обосновании закономерностей взаимодействия свайного поля и плитной части фундамента, разделенных при помощи ПРС, с учетом устройства железобетонных оголовков свай; в разработке аналитического метода расчета ПРС при его сжатии под действием внешней нагрузки на фундаментную плиту.

Методология и методы исследований. В основу работы легли аналитические и численные расчетные методы, выбранные для проведения исследований на основе проведенного обзора научно-технической и нормативной литературы. Методологическую базу составили основные законы механики грунтов, методы системного анализа и статистической обработки результатов. Использованы базовые положения теории предельного равновесия, теории упругости и пластичности. Особое внимание уделено сопоставлению результатов натурных наблюдений с данными расчётных прогнозов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты численных исследований, устанавливающие закономерности взаимодействия свайного поля и ПРС, в том числе с учетом устройства железобетонных оголовков свай;

2. Результаты, подтверждающие эффективность устройства ПРС между оголовками свай и подошвой фундаментной плиты с целью снижения горизонтальных усилий, возникающих в сваях при сейсмическом воздействии различной интенсивности;

3. Аналитический метод расчета ПРС в составе свайных фундаментов многоэтажных зданий, базирующийся на условии равновесия системы с учетом действующих сил и напряжений, а также влияния конструкции оголовков;

4. Классификация технических решений свайных фундаментов с ПРС, рекомендуемых к внедрению в зависимости от сложности инженерно-геологических условий строительства;

5. Результаты внедрения исследований в практику многоэтажного и высотного строительства на территории Краснодарского края в период с 2013 по 2024 годы.

Диссертация соответствует пунктам 3, 4 паспорта научной специальности 2.1.2. «Основания и фундаменты, подземные сооружения».

Достоверность результатов обеспечивается их согласованностью с теоретическими и экспериментальными данными известных ученых, а также корректным применением положений механики грунтов и механики деформируемого твёрдого тела. Подтверждением служит сопоставление аналитических решений с данными геотехнического мониторинга и использование сертифицированных конечно-элементных программных комплексов.

Апробация работы. Наиболее значимые результаты исследований были доложены и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: Краснодар (2013, 2016–2021); Москва (2017, 2019, 2020); Екатеринбург (2016–2020, 2024); Пермь (2021, 2024); Новочеркасск (2015, 2018); Прага, Чехия (2017).

Личный вклад автора заключается во всестороннем участии на всех этапах исследования: в поиске и обобщении литературных источников по рассматриваемой теме, подготовке расчётных моделей, выполнении численных и аналитических расчётов, а также обработке и интерпретации полученных результатов. Автором разработан аналитический метод расчёта свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем (ПРС) с учётом использования свайных оголовков и сформулированы рекомендации по их конструированию. Кроме того, автор (совместно с соавторами) подготовил научные статьи и заявки на изобретения для публикации результатов в профильных изданиях, а также осуществлял авторский надзор при внедрении разработанных решений в практику строительства.

Публикации. По теме диссертации подготовлено 19 работ, в том числе: 3 статьи в изданиях, индексируемых в реферативных базах *Scopus/Web of Science*; 3 статьи в изданиях ВАК РФ; 3 патента РФ (в соавторстве).

Структура и объем работы. Диссертация включает: введение, четыре главы, заключение, библиографический список из 115 источников, а также два приложения. Работа содержит 192 страницы текста, дополненного 142 иллюстрациями и 20 таблицами.

Основное содержание работы

Во введении раскрыта актуальность выбранной темы, определены цель и задачи исследований, научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость, обоснован личный вклад автора, сформулированы защищаемые положения.

В первом разделе проведён анализ работ по устройству фундаментов многоэтажных и высотных зданий, в основаниях которых используются сваи, не имеющие жёсткой связи с фундаментной плитой. При строительстве таких зданий на многослойных разнородных основаниях необходимы сваи большого диаметра для передачи нагрузок на глубоко залегающие прочные грунты. Однако при жёсткой заделке свай, даже с учётом их большого количества под пятном фундаментной плиты, прочность самих свай и устойчивость окружающего их грунта не обеспечиваются в сейсмических районах из-за возникающих горизонтальных нагрузок. При значительной расчетной глубине сжимаемой толщи и наличии в ней разнородных переслаиваемых грунтов армирование основания короткими элементами малого диаметра или альтернативное закрепление грунтов не всегда является надёжным и контролируемым решением.

Для отдельных случаев многоэтажного и высотного строительства в сложных и особо сложных инженерно-геологических условиях, а также в сейсмических районах при выполнении свайных фундаментов более экономичным и технологически обоснованным может быть решение, предусматривающее устройство промежуточного распределительного слоя (далее ПРС), который выполняется между оголовками свай и подошвой фундаментной плиты. Это позволяет добиться более рационального использования материалов при изготовлении фундамента, в том числе за счёт устройства свайных оголовков.

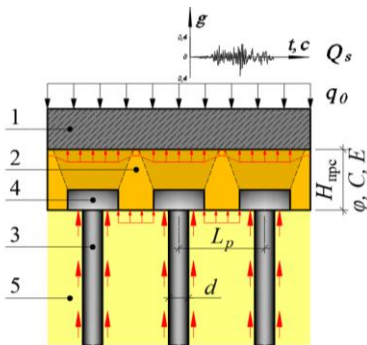
К основным конструктивным параметрам свайных фундаментов с ПРС относятся: физико-механические характеристики материала ПРС, толщина ПРС; длина свай и их диаметр; межсвайное расстояние; наличие свайных оголовков и их диаметр; жесткость надземного строения. Также рассмотрены материалы для устройства промежуточных слоев, и установлено, что наибольшее распространение получили сыпучие материалы и отдельные виды грунтов (щебень, гравий, песок крупный и средней крупности). Существуют решения с применением метаматериалов (материалы со свойствами, позволяющими рассеивать энергию сейсмических волн в широком диапазоне частот).

В отдельных случаях для повышения несущей и распределительной способности ПРС в его составе над головами свай (или по всей площади) используют синтетические материалы. Это повышает стоимость и трудоемкость исполнения технического решения, требует высокой квалификации подрядчика, что является ограничением для широкого практического применения.

Проанализированы рекомендации отечественных и зарубежных исследователей по назначению высоты ПРС. Нормы СП 24.13330.2021 допускают использование ПРС высотой от 0,4 до 1,0 м. По данным Мариничева М. Б., при абсолютно жёстком фундаменте высота слоя составляет $0,36-0,57 (L_p - d)$, где L_p – шаг свай; d – диаметр свай. Зарубежные авторы и нормы (Hewlett и Randolph, 1988, EBGEO, ASIRI, 2013 и др.) рекомендуют принимать высоту ПРС в пределах $0,7-2,0 (L_p - d)$. Известны также решения промежуточных слоев из метаматериалов с заданными свойствами толщиной от 0,01 до 0,1 м, а также решения из формуемых в заводских условиях мешков с песком (T-bags, Япония).

В разных регионах России отмечено повышение эффективности свайных фундаментов (на 30...40%) при введении промежуточного распределительного слоя вследствие перераспределения напряжений между элементами фундаментной конструкции. При этом анализ проведенных исследований по рассматриваемой теме выявил необходимость совершенствования существующих расчетных методов с целью более точного обоснования целесообразности введения промежуточного слоя в схему свайного фундамента и дальнейшую разработку рекомендаций по назначению его параметров. Выполненный обзор позволил обосновать *актуальность* темы диссертации, сформулировать ее цель и задачи.

Во втором разделе приводятся результаты теоретических и лабораторных исследований влияния высоты ПРС, шага свай и габаритов их оголовков на напряжения и деформации, возникающие в уровне верха свай и в уровне низа фундаментной плиты.



Исследуемые параметры:

- Геометрические и физико-механические характеристики ПРС ($H_{\text{прс}}$, φ , C , E);
- Размеры оголовков свай (диаметр, площадь);
- Доли несущей способности свай и плиты в зависимости от параметров свайного поля (шаг, длина, диаметр)

Рисунок 1 – Схема работы свайного фундамента с ПРС и железобетонными свайными оголовками: 1 – плита/ростверк многоэтажного здания; 2 – ПРС; 3 – свая; 4 – оголовок свай; 5 – грунт основания

В рамках рассматриваемых задач дана оценка влияния оголовков свай, а также геометрических и физико-механических характеристик ПРС на из-

менение напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «фундаментная плита – ПРС – свайное поле с железобетонными свайными оголовками» (рис. 1).

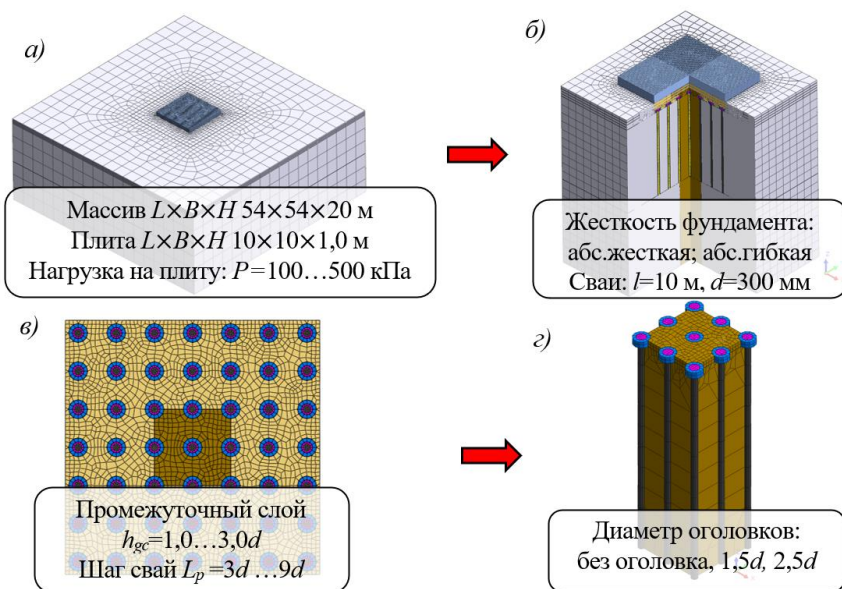


Рисунок 2 – Пример рассматриваемой модели свайных фундаментов с ПРС:

- а – общий вид расчетной схемы; б – укрупненный вид расчетной модели с показом сечения рассматриваемой ячейки; в – план свайного поля с габаритом и контурами оголовков рассматриваемой ячейки; г – рассматриваемая ячейка с шагом свай $5d$

Исследованы закономерности развития напряжений и деформаций в точках над головами свай и в пролете между ними в пределах центральной ячейки свайного поля (рис. 2). В рамках исследований выполнено моделирование работы свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем с различной жесткостью надземного строения (абсолютно гибкого и абсолютно жесткого) в программном комплексе MIDAS FEA NX.

Всего подготовлено и проанализировано более 180 расчетных случаев для фундаментов с различными параметрами при использовании модели, учитывающей упрочнение грунта при малых деформациях – *Hardening Soil Small-strain (HSS)* (рис. 3).

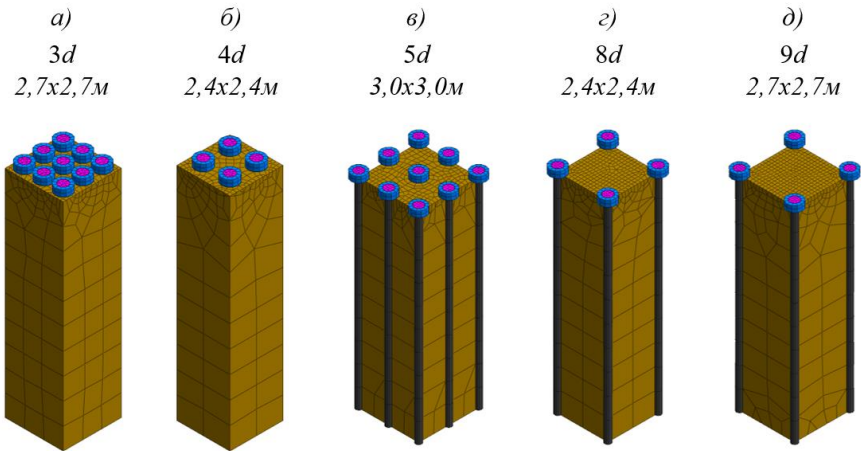


Рисунок 3 – Фрагменты расчетных схем (а – д), соответствующие различному межсвайному расстоянию в диапазоне $3d - 9d$ (фрагменты схем с шагом свай $6d$ и $7d$ условно не показаны)

Сплошная монолитная железобетонная фундаментная плита, к которой приложена равномерно распределенная нагрузка, имеет размеры в плане – 10×10 м, опирание происходило на однородный суглинистый грунт, с модулем деформации $E_0 = 14$ МПа; коэффициентом Пуассона $\nu = 0,37$; удельным сцеплением $c = 23$ кПа; углом внутреннего трения $\varphi = 21^\circ$; удельным весом $\gamma = 18$ кН/м³. Переход к основным параметрам модели *HSS* выполнен с учетом следующих соотношений: $E_{50} = E_0$; $E_{ur} = 3E_{50}$; $E_{oed} = E_{50}$; $m = 0,8$. Специфические параметры: $G_0 = 100$ МПа; $\gamma_{0,7} = 0,0001$; $OCR = 1,2$ – приняты автором на основании имеющегося опыта применения рассматриваемой модели грунта на кафедре «Основания и фундаменты» КубГАУ. Для моделирования промежуточного распределительного слоя использовался песчаный грунт с использованием модели Мора-Кулона: $E_0 = 30$ МПа; $\nu = 0,3$; $c = 1,0$ кПа; $\varphi = 30^\circ$; $\gamma = 20$ кН/м³.

В итоге, на основании выполненных расчетов была дана оценка напряжений и деформаций, возникающих в уровне голов свай, оголовков (при их наличии), а также в уровне подошвы фундаментной плиты. Анализ этих данных показал, что максимальная осадка наблюдается в пролёте между сваями, а минимальная – непосредственно над их головами. При наличии оголовков происходит снижение осадок и их неравномерности в пределах толщины слоя ПРС, что позволяет регулировать общее напряженно-деформированное состояние системы «фундаментная плита – промежуточный слой – свая».

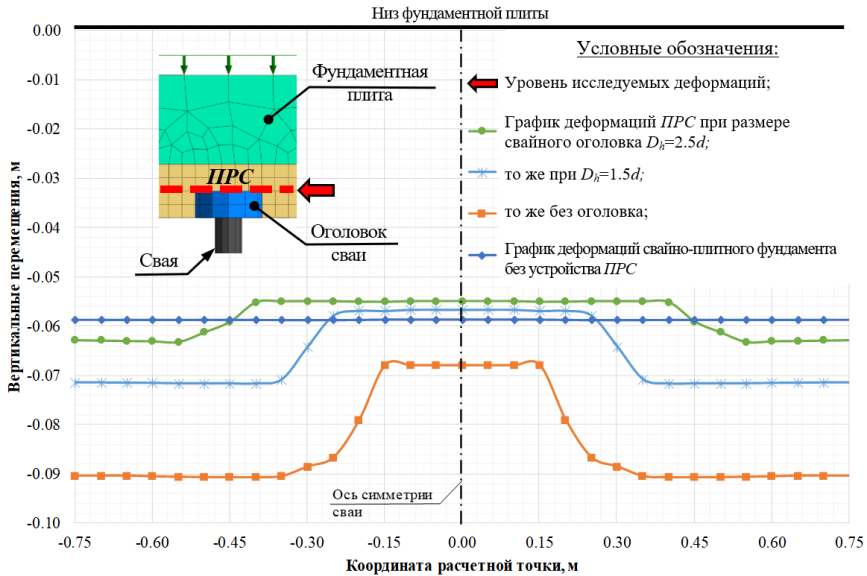


Рисунок 4 – Графики развития деформаций ПРС в уровне верха свай в зависимости от наличия и размеров свайных оголовков для расчетного случая с диаметром свай $d=300$ мм; шаге свай $L_p=5d$; давлении на подошве плиты $\sigma_f=500$ кПа

Установлено, что осадка ПРС может составлять до 36% от общей осадки фундамента, при этом введение оголовков свай позволяет снижать максимальные напряжения в теле ПРС, уменьшать осадки фундаментной плиты и снижать их неравномерность в пределах ПРС на 31–64% при соответствующих диаметрах оголовков 1,5–2,5 d в сравнении с решениями без оголовков для межсвайного расстояния 5–7 d (пример для $d=300$ мм; $L_p=5d$; $\sigma_f=500$ кПа приведен на рисунке 4).

Результаты численного моделирования сравнивались с данными лабораторных экспериментальных исследований работы свайного фундамента с ПРС, проведённых на кафедре «Основания и фундаменты» КубГАУ (П. А. Ляшенко, В. В. Бабарыкин и др., 2016–2024). В экспериментах использовались модели свай длиной 0,14 м, диаметром 0,02 м, выполненные в уплотненном глинистом грунте. В качестве ПРС использовался слой песка мелкого толщину 0,03 м. Нагрузка на ПРС через фундаментную плиту передавалась тремя этапами. Каждый этап состоял из плавного увеличения нагрузки на модель в течение 5 минут, после чего установка отключалась и в течение 10 минут отслеживалась стабилизация осадки. В результате физического моде-

лирования установлено, что наибольшая осадка ПРС зафиксирована в промежутке между сваями, а наибольшая сила реакции ПРС зарегистрирована над сваями.

Результаты лабораторных экспериментов по установлению разницы в величинах напряжений и значениях деформаций для участков ПРС над головами свай и в пролётах между ними в сравнении с полученными данными численного моделирования позволили подтвердить качественную схожесть итоговых результатов.

Введение ПРС из сыпучих материалов в состав свайного фундамента позволяет существенно снижать горизонтальные усилия в сваях при сейсмических нагрузках. Однако влияние железобетонных оголовков на усилия в сваях для таких случаев до сих пор полноценно не изучалось. Для исследования этого эффекта были проведены серии численных экспериментов (рис. 5) на модели высотного здания, в которой параметры свайного поля, оголовков и ПРС приняты в соответствии с ранее установленными в работе закономерностями.

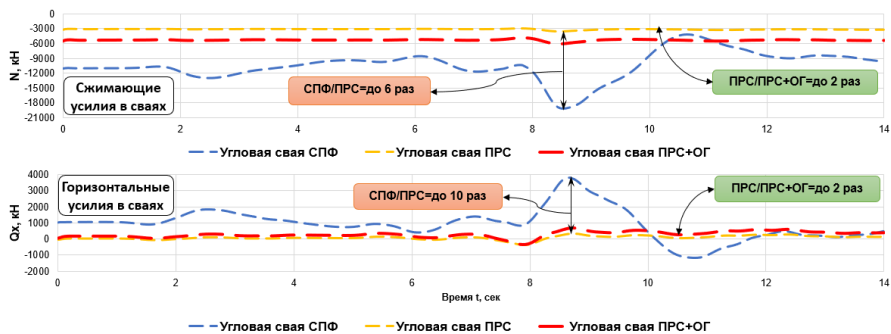


Рисунок 5 – Сопоставление результатов расчёта сжимающих сил N (кН) (сверху) и горизонтальных сил Q_x (кН) (снизу) в угловых сваях: для варианта с их жесткой заделкой в фундаментную плиту (СПФ); варианта с использованием ПРС без выполнения оголовков на сваях и варианта с учётом устройства оголовков (ПРС+ОГ), – при сейсмическом воздействии длительностью 14 секунд и интенсивностью 9 баллов

Устройство промежуточного распределительного слоя при действии сейсмических нагрузок существенно (*более чем в 10 раз*) снижает усилия в сваях, повышая эффективность работы фундамента.

В третьем разделе приведены результаты исследований, проведенных с целью разработки аналитического метода расчета промежуточного распределительного слоя в составе свайных фундаментов многоэтажных зданий. Метод базируется на условии равновесия, выполняемого для ПРС, с учетом

действующих в нем сил и напряжений, а также влияния конструкции оголовков. За основу принят энергетический подход при расчете ПРС, предложенный М.Б. Мариничевым (2023). В предлагаемом методе вычисляются границы областей предельного состояния в объеме ПРС при передаче на него нагрузки от фундаментной плиты, в том числе с учетом устройства оголовков свай. Расчет производится на основе уравнений статического равновесия с учетом соблюдения условий прочности промежуточного слоя и грунта основания и предельной осадки фундамента ($P \leq R_{gc}$, $\tau_{max} \leq \tau_{lim}$, $P_b \leq R$; где R_{gc} – предел прочности материала ПРС на одноосное сжатие, τ_{lim} – предельное касательное напряжение для материала ПРС; P – среднее давление на контакте «оголовок сваи – ПРС», P_b – давление передаваемое на грунт основания между сваями, R – расчетное сопротивление грунта основания).

Сутью метода расчёта ПРС является соблюдение условия равенства сил и равенства работ упругих деформаций фундаментной плиты, промежуточного распределительного слоя, свай с оголовками и грунта основания (ГО) при их совместной работе под нагрузкой от здания. Доля работы, совершаемая сваями, рассчитывается по результатам проведения натурных испытаний свай с выделением участка упругих и пластических деформаций на итоговом графике (более подробно см. раздел 3 диссертации). Схема к расчету ПРС включает фрагмент свайного фундамента, ограниченный ячейкой, состоящей из 4-х буровых свай, фундаментной плиты, участков ПРС и грунтового основания (ГО) под ней. На сечении ячейки вертикальной плоскостью показаны верхние части свай (A), область (B) уплотненного материала ПРС над сваями, область (C) уплотненного материала ПРС между 4-мя областями (B), область (D) грунта ГО между сваями (рис. 6).

Описанные выше допущения позволяют предложить инженерный метод расчета и обосновать изменение НДС промежуточного распределительного слоя за счет применения оголовков на сваях.

Основное условие равновесия фундамента выражается уравнением сил, действующих на выделенную ячейку:

$$N_f = N_p + P_b, \quad (1)$$

где N_f – вертикальная сила, действующая на выделенную ячейку фундамента от здания, N_p и P_b – силы сопротивления сваи и грунта основания между сваями, приходящиеся на выделенную ячейку фундамента, соответственно.

Часть силы действует непосредственно на тело (B) уплотненного материала ПРС, другая часть – на тело (C), поэтому силу N_f представим суммой сил:

$$N_f = N_{f.B} + N_{f.C}, \quad (2)$$

где $N_{f.B}$ и $N_{f.C}$ – вертикальные силы, действующие от здания на часть ячейки, ограниченную следом кругового конуса уплотненного грунта, и на часть, расположенную между 4-мя такими следами, соответственно (рис. 7).

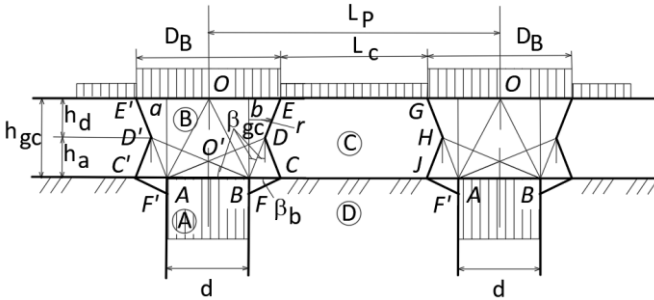


Рисунок 6 – Схема к расчету ПРС с выделением четырех взаимодействующих грунтовых тел: (A) – свая, жесткое недеформируемое тело; (B) – тело из упруго-пластически деформируемого материала ПРС в границах $ABCDEE'D'C'A$; (C) – всесторонне сжатое тело из материала ПРС в границах $CDEGHJ$; (D) – компрессионно сжатая часть ГО, прилегающая к головам свай; h_{gc} – высота ПРС; d – диаметр свай; L_p – шаг свай; L_c – габарит площадки взаимодействия фундаментной плиты и тела (C); D_B – габарит площадки взаимодействия фундаментной плиты и тела (B)

Условие равновесия тела (B) запишем в виде:

$$N_{f,B} - N_P - T_B - T_D = 0, \quad (3)$$

где N_P , T_B и T_D – равнодействующие реакции сваи на площадке AB , внутреннего трения на поверхности конуса CD и реакции ГО на кольцевой площадке BC , соответственно, (рис. 7 а). Силы T_B и T_D рассчитаны методом, основанном на условии, что области предельного равновесия описываются кинематическими огибающими, имеющими форму прямых линий, показаны двумя векторами, чтобы обозначить на сечении места приложения распределенных усилий. Их равнодействующие располагаются по оси сваи, как это представлено для T_B на рисунке 7 б.

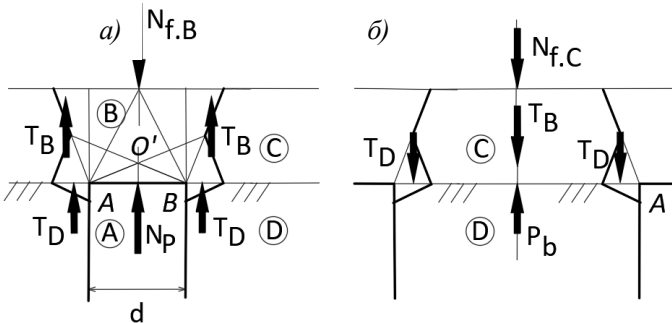


Рисунок 7 – К расчету ПРС схема сил, действующих на: а) тело (B), б) тело (C)

Условие равновесия тела (С) (рис. 7 б) запишем в виде:

$$N_{f,C} - P_b + T_D + T_B = 0, \quad (4)$$

Суммирование уравнений (3) и (4) дает, с учетом уравнения (2), уравнение (1), т. е. условие равновесия фундамента, в целом, сохраняются, а силы T_B и T_D являются внутренними для него, их алгебраическая сумма равна нулю.

Оголовки, вне зависимости от способа крепления к свае, можно считать ее частью (рис. 8). Размер горизонтальной площадки оголовка D_H больше, чем головы сваи, следовательно, больше площадь, а среднее давление на материал ПРС, соответственно, меньше. Устройство оголовков позволяет снизить напряжения на подошве фундаментной плиты над сваями, они также уменьшаются с увеличением толщины ПРС (рис. 9).

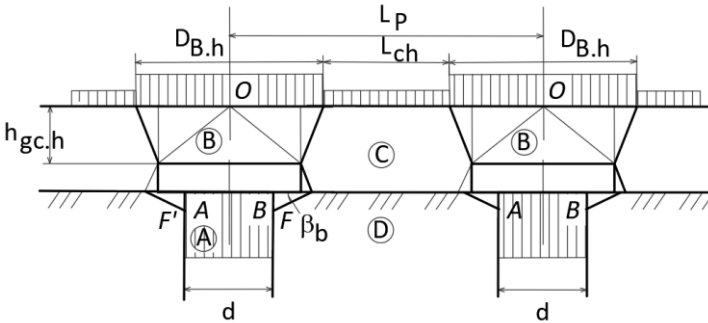


Рисунок 8 – Схема к расчету ПРС по сваям с оголовками с выделением четырех взаимодействующих грунтовых тел (аналогично рисунку 6):

$h_{gc,h}$ – высота ПРС над оголовками

При большой толщине ПРС уменьшается расстояние L_{ch} между площадками приложения реакции сваи, что приводит к уменьшению равнодействующей $N_{f,C}$ и давления материала ПРС на ГО между сваями. Это снижает эффект от включения ГО в общее сопротивление основания фундамента.

Далее в работе выполнено сопоставление значений напряжений, возникающих в уровне подошвы фундамента, определенных с использованием численных и аналитических методов расчетов (рис. 9). Выявлено, что они имеют близкие качественные и количественные результаты, разница которых не превышает 15–20%, особенно для минимальных толщин промежуточного распределительного слоя (до $2,0d$), что рекомендуется принимать как область применимости аналитического метода расчета.

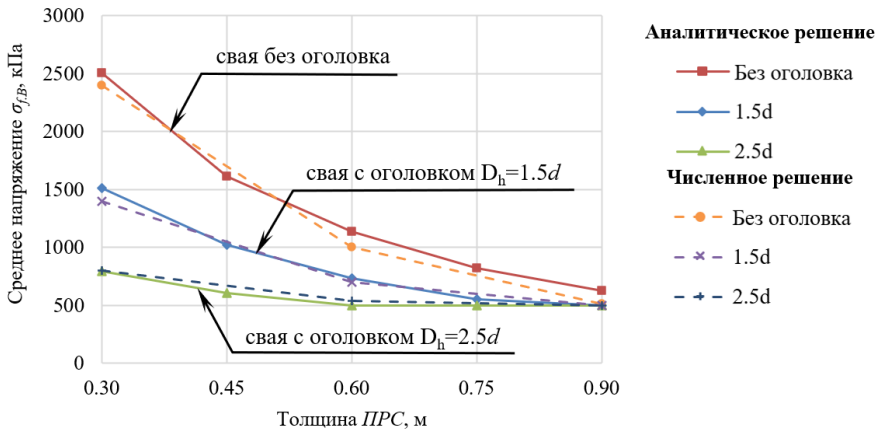


Рисунок 9 – Аналитическое вычисление напряжений на подошве фундаментной плиты: над сваями с оголовками и без оголовков в сопоставлении с результатами численных исследований для тех же мест (при диаметре $d = 0,3$ м; шаге свай $L_p = 5d$; давлении на подошве плиты $\sigma_f = 500$ кПа)

Таким образом, разработанный аналитический метод расчета, учитывающий использование оголовков над сваями и основанный на построении границ областей предельного состояния в объеме ПРС, позволяет корректно оценить возникающие напряжения и деформации в зависимости от давления на подошве фундаментной плиты, межсвайного расстояния и габаритов оголовков.

В четвертом разделе приведена методика конструирования свайных фундаментов с ПРС для многоэтажного и высотного строительства (рис. 10). Для ее разработки были продолжены теоретические исследования влияния высоты ПРС, диаметра, шага и длины свай на конечные осадки основания свайных фундаментов.

Для оценки влияния параметров свайного фундамента с ПРС (d , L_p , l , h_{gc}) на его осадки предложен коэффициент эффективности k_{ef} , определяемый как отношение осадки свайного фундамента с ПРС (S_{pile}) к осадке фундаментной плиты на естественном основании (S_{slab}) при различной жесткости фундамента; следовательно k_{ef} отражает возможность снижения осадки свайного фундамента с ПРС при его изменяемых параметрах (длина, шаг, диаметр свай, толщина ПРС) по отношению к осадке фундамента на естественном основании. Чем коэффициент k_{ef} ниже, тем техническое решение эффективнее снижает осадки. При этом учет k_{ef} обоснован только для случаев, когда фундаменты на естественном основании неприменимы, и требуется устройство свай.

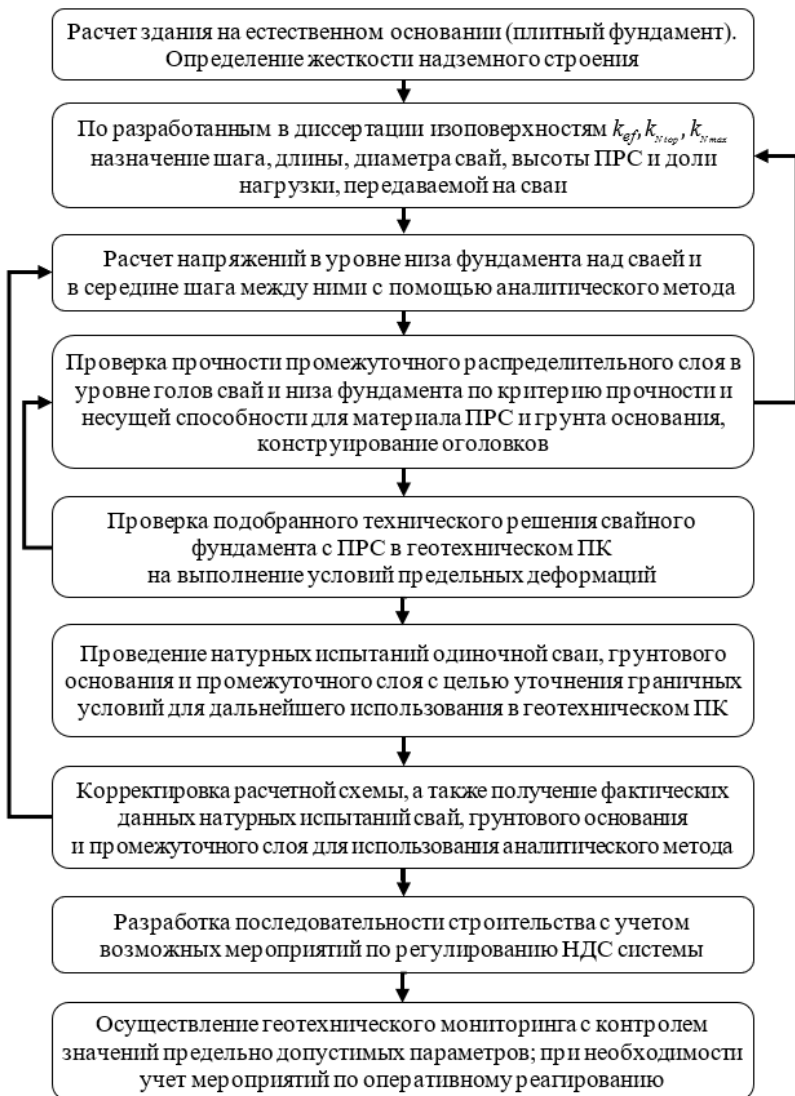


Рисунок 10 – Методика конструирования свайных фундаментов с ПРС

В диссертации построены изоповерхности, демонстрирующие зависимость коэффициента эффективности k_{ef} от межсвайного расстояния L_p/d и отношения высоты промежуточного распределительного слоя к диаметру (h_{gc}/d) при различной жесткости фундаментной конструкции.

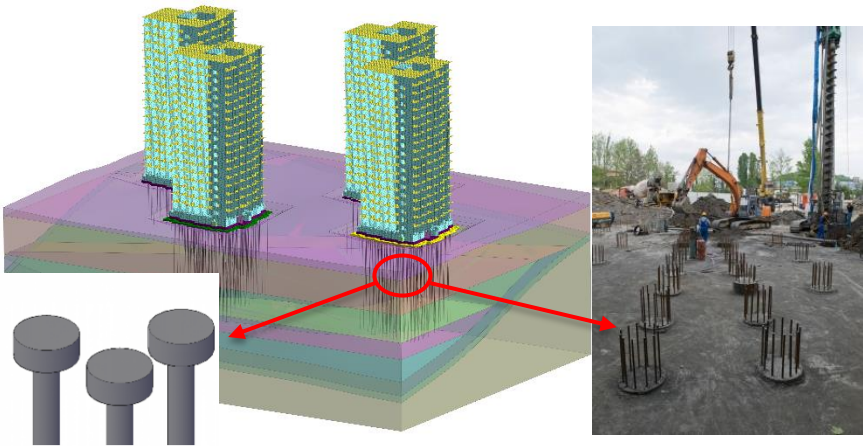


Рисунок 11 – Практическое внедрение фундамента с выполненным ПРС и одиночными свайными оголовками для многоэтажных зданий по ул. Гагариной в г. Сочи

При разработке методики также была установлена доля от общей нагрузки, распределяющейся между сваями и плитой. Численно определено, что места формирования максимальных усилий проявляются на разных участках длины при жесткой заделке свай и при введении промежуточного распределительного слоя (ПРС). В связи с этим оценка доли нагрузки, приходящейся на сваи при введении ПРС, проводилась для двух отметок по высоте: уровня голов свай ($k_{N\ top}$) и уровня суммарных максимальных усилий, возникающих в сваях ($k_{N\ max}$). Для каждого из уровней подготовлены соответствующие диаграммы.

В диссертации разработана классификация технических решений свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем, рекомендуемых к реализации с учетом их соответствия простой, средней, сложной и особо сложной категориям инженерно-геологических условий строительства. При отнесении рекомендуемого технического решения к конкретной категории учитывается совокупность одновременно действующих факторов: геоморфологических, геологических, гидрогеологических, негативных процессов, – что определяет конструктивные особенности рекомендуемого варианта фундамента с ПРС: высоту и материал ПРС, размеры оголовков свай, мероприятия по защите от напорных грунтовых вод (подробно классификация представлена в разделе 4 диссертации).

Внедрение разработанной методики расчета и конструирования свайных фундаментов с ПРС осуществлено в сложных инженерно-геологических условиях при строительстве 3 многоэтажных объектов, один из которых приведен на рисунке 11.

Для подтверждения корректности принятых проектных решений, а также их эффективности, на объектах проводился геотехнический мониторинг, включавший наблюдение за осадками фундаментов и их неравномерностью на этапах строительства. Расхождение фактических осадок с расчетными не превышало 15% на момент завершения строительства зданий.

В ходе подготовки диссертационной работы автором совместно с научным руководителем были получены патенты на изобретения РФ, в которых представлено совершенствование конструкции плитных фундаментов с промежуточным распределительным слоем, позволяющее регулировать осадки (RU 2731969). Предложены и запатентованы новые способы устройства буронабивных свай (RU 2737303), а также способы повышения их несущей способности в сейсмических районах (RU 2761795).

Предложенные в работе способы устройства свайных фундаментов с ПРС позволяют минимизировать горизонтальные нагрузки на сваи, подобрать эффективную высоту ПРС и отрегулировать напряжения в нем с учетом введения свайных оголовков с заданными размерами. Это дает возможность применить более рациональную конструкцию фундамента, снижая материалоемкость и время на его устройство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При помощи численного моделирования в пространственной постановке на большеразмерных моделях фундаментов была установлена взаимосвязь между осадками основания и параметрами свайного фундамента с промежуточным распределительным слоем (шагом, длиной и диаметром свай) для абсолютно жесткого и абсолютно гибкого фундамента. Установлено, что при эффективных толщинах ПРС ($d < h_{gc} < 3d$, где d – диаметр свай) его осадка является существенной и может составлять до 36% от общей осадки свайного фундамента. При этом устройство железобетонных оголовков свай размером $1,5\text{--}2,5d$ позволяет снижать максимальные напряжения в теле промежуточного распределительного слоя, уменьшать осадки фундаментной плиты и снижать их неравномерность в пределах ПРС на 31–64% при соответствующих диаметрах оголовков $1,5\text{--}2,5d$ (где d – диаметр свай) в сравнении с решениями без оголовков для межсвайного расстояния $5\text{--}7d$.

2. В результате исследований установлена высокая эффективность использования промежуточного распределительного слоя, устраиваемого между оголовками свай и подошвой фундаментной плиты в составе свайных фундаментов зданий, возводимых в сейсмических районах. Выявлено, что при 7–9-балльной интенсивности сейсмического воздействия введение ПРС приводит к снижению в 10–20 раз максимальных горизонтальных усилий в сваях по сравнению с усилиями при варианте с их жесткой заделкой в фундаментную плиту. Отделение свай от фундаментной плиты позволяет передавать на них преимущественно сжимающие нагрузки, приводя к снижению

их итогового количества при соблюдении требований безопасной эксплуатации объектов, возводимых в сейсмоопасных районах.

3. Предложен аналитический метод расчёта параметров промежуточного распределительного слоя в составе свайных фундаментов, учитывающий включение оголовков свай в работу. Метод базируется на условии равенства сил и равенства работ упругих деформаций, возникающих при передаче нагрузки от здания на фундаментную плиту, промежуточный распределительный слой, сваи и грунт основания, реализуемый с помощью построения кинематических огибающих в форме прямых линий для ограничения областей предельного состояния. Сопоставление результатов аналитического метода с данными численного моделирования позволило определить область его применения.

4. Разработана классификация технических решений свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем, рекомендуемых к реализации с учетом их соответствия простой, средней, сложной и особо сложной категориям инженерно-геологических условий строительства. В классификации для каждой категории сложности предложены технические решения свайных фундаментов с ПРС, учитывающие совокупность одновременно действующих факторов: геоморфологических, геологических, гидрогеологических, а также негативных процессов. Сочетание факторов определяет конструктивные особенности рекомендуемого варианта свайного фундамента с ПРС: высоту и материал ПРС, размеры оголовков свай, мероприятия по защите от напорных грунтовых вод, и делает разработанную классификацию удобной для практического использования.

5. Разработанные предложения по конструированию свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем в период с 2013 по 2024 годы внедрены в практику строительства многоэтажных и высотных зданий в сложных инженерно-геологических условиях Краснодарского края. Проведён геотехнический мониторинг, подтвердивший высокую эффективность реализованных решений: объем свайных работ был снижен на 29–55% по сравнению с исходными вариантами с жёсткой заделкой свай в фундаментную плиту.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследований: полученные патенты РФ на изобретения, в которых усовершенствованы конструкции свайных и плитных фундаментов, в рамках дальнейший исследований планируется объединить в новые технические решения для формирования свайных фундаментов с ПРС, обладающих большей эффективностью, несущей и распределительной способностью.

Основные научные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science:

1. Marinichev, M. B. Foundations design and construction for high-rise buildings in seismic areas / M. B. Marinichev, **I. G. Tkachev** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 8, Novosibirsk, 22–27 May 2020. – Novosibirsk, 2020. – P. 012020.
2. Marinichev, M. B. Regulation of additional settlements of dense urban infrastructure objects during execution of deep excavations and raft-pile foundation of high-rise buildings / M. B. Marinichev, **I. G. Tkachev** // Journal of Physics: Conference Series : 2, Perm, 26–28 May 2021. – Perm, 2021. – P. 012039.
3. Polishchuk, A. I. Evolution of the foundation design methods for multi-storey and high-rise buildings in seismic regions / A. I. Polishchuk, M. B. Marinichev, **I. G. Tkachev** // Smart Geotechnics for Smart Societies : Proceedings of the 17th ARC on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Astana, Kazakhstan, 14–18 August 2023. – Astana, Kazakhstan: Creative Commons, CC BY-NC, 2023. – P. 2358-2364.

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК:

4. Мариничев, М. Б. Практическая реализация метода вертикального армирования неоднородного основания для компенсации неравномерной деформируемости грунтового массива и снижения сейсмических воздействий на надземное сооружение / М. Б. Мариничев, **И. Г. Ткачев**, Ю. Шлее // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 94. – С. 279-299.
5. Мариничев, М. Б. Обоснование применения анкерных микросвай как сжимаемых элементов в составе фундаментов при реконструкции и новом строительстве / М. Б. Мариничев, П. А. Ляшенко, **И. Г. Ткачев** [и др.] // Строительство и архитектура. – 2022. – Т. 10, № 1. – С. 25-36.
6. Мариничев, М.Б. Особенности расчета и конструирования свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем / М.Б. Мариничев, **И. Г. Ткачев**, И.Г. Азов // Construction and Geotechnics. – 2024. – Т. 15, № 3. – С. 5-16. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.01.

Патенты РФ на изобретения

В ходе подготовки диссертации соискателем получено 3 патента РФ на изобретения (в соавторстве).

Статьи в других печатных изданиях

В других печатных изданиях опубликовано 10 научных работ.