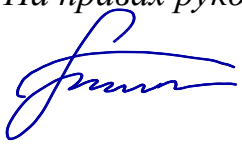
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И. Т. ТРУБИЛИНА»

На правах рукописи



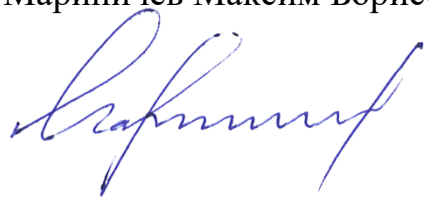
ТКАЧЕВ Игорь Геннадьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ

Специальность **2.1.2.** Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Мариничев Максим Борисович



Краснодар – 2025

ВВЕДЕНИЕ 4

1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ (ПРС) 11

1.1. Типы промежуточных распределительных слоев 11

1.2. Основные подходы к проектированию ПРС в составе свайных фундаментов 16

1.3. Методы расчёта свайных фундаментов на основе осреднения свойств грунто-свайного массива 28

1.4. Особенности учета сейсмических нагрузок при конструировании ПРС 37

1.5. Выводы по Разделу 1 и задачи исследований 40

2. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЕЖУТОЧНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО СЛОЯ (ПРС) В СОСТАВЕ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА 43

2.1. Выбор модели грунта и параметров расчетной схемы для исследований 43

2.2. Оценка работы свай в составе свайных фундаментов с ПРС 49

2.3. Влияние шага свай и толщины ПРС на неравномерность осадок над сваями и в пролете между ними 61

2.4. Оценка влияния оголовков свай на напряженное состояние свайных фундаментов с ПРС 76

2.5. Исследование влияния размеров свайных оголовков на деформированное состояние свайных фундаментов с ПРС 82

2.6. Сопоставление лабораторных экспериментальных исследований и численного моделирования работы свайных фундаментов с ПРС 92

2.7. Исследование работы свайных фундаментов с ПРС и железобетонными оголовками при действии сейсмических нагрузок 94

2.8. Выводы по Разделу 2 110

3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОМЕЖУТОЧНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО СЛОЯ (ПРС) СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА 111

3.1. Описание модели деформации материала ПРС 112

3.2. Условия равновесия ПРС свайного фундамента..... 116

3.3. Расчет сил, действующих в ПРС свайного фундамента..... 118

3.4. Расчет усилий в ПРС свайного фундамента на подошве фундаментной плиты при устройстве железобетонных оголовков 125

3.5. Блок-схема усовершенствованного аналитического метода..... 129

3.6. Сопоставление аналитических и численных исследований..... 131

3.7. Выводы по Разделу 3 133

4. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАСЧЕТУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ (ПРС) 134

4.1. Методика конструирования свайных фундаментов с ПРС..... 134

4.2. Классификация технических решений свайных фундаментов с ПРС 140

4.3. Внедрение результатов исследований..... 145

4.4. Выводы по Разделу 4 163

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 164

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 167

ПРИЛОЖЕНИЕ А 181

ПРИЛОЖЕНИЕ Б 185

ВВЕДЕНИЕ

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-Мартиросян А. З., Тер-Мартиросян 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 пылевато-глинистых 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 1,5–2,5d (где d – диаметр свай) в сравнении с решениями без оголовков для межсвайного расстояния 5-7d.

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.

Автор благодарит научного руководителя, д.т.н. проф. кафедры «Основания и фундаменты» КубГАУ М.Б. Мариничева, за профессиональное руководство и поддержку при выполнении исследования.

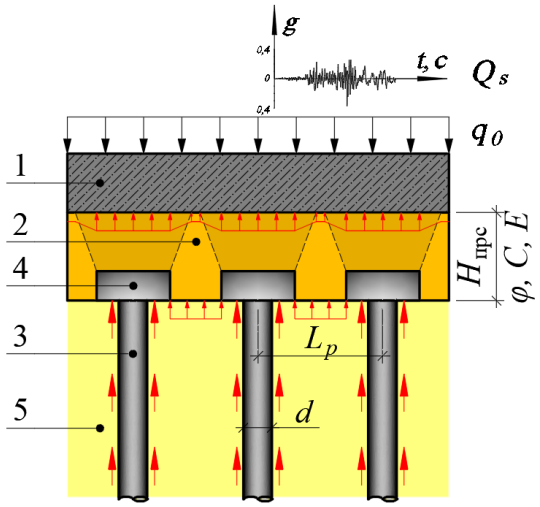
Особая признательность д.т.н. проф. А.И. Полищуку, Заслуженному строителю РФ, за ценные рекомендации и научное сопровождение.

Автор также высоко ценит профессиональную поддержку коллектива кафедры «Основания и фундаменты» Кубанского государственного аграрного университета (КубГАУ) и специалистов ООО «ГЕОТЭК», способствовавших проведению исследовательской работы и формированию её научной базы.

1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ (ПРС)

1.1. Типы промежуточных распределительных слоев

Свайные фундаменты являются одним из наиболее распространенных типов фундаментов, используемых в строительстве в сложных инженерно-геологических условиях для передачи нагрузок от сооружения на более глубокие и прочные слои грунта. В последние десятилетия все большее внимание уделяется поиску инновационных решений, которые с одной стороны будут надежными, а с другой стороны могут позволить снизить трудоемкость и материалоемкость классических свайных фундаментов. Одним из таких решений является использование промежуточных распределительных слоев (ПРС), которые могут значительно улучшить технические характеристики свайных фундаментов (рис.1.1). Повышение эффективности работы свайных фундаментов с ПРС может быть достигнуто путем устройства железобетонных свайных оголовков, имеющих б*о*льшую площадь по сравнению с поперечным сечением сваи. Оголовки позволяют более эффективно расставить сваи в поле, обеспечивая равномерное распределение нагрузки на ПРС и грунт. Введение оголовков также может повысить несущую способность свайного фундамента за счёт увеличения площади контакта плиты с грунтом, позволяя в том числе снизить риск продавливания ПРС сваями. Однако, данной теме в литературе не уделено внимание, а именно: геометрическим и физико-механическим характеристикам ПРС ($H_{\text{прс}}$, φ, C, E), размерам оголовков свай (диаметр, площадь), доле несущей способности свай и плиты в зависимости от параметров свайного поля (шаг, длина, диаметр) и др.



Исследуемые параметры:

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

Рисунок 1.1 – Схема работы фундамента с промежуточным распределительным слоем (ПРС) и железобетонными оголовками: 1 – фундаментная плита; 2 – промежуточный распределительный слой; 3 – свайное поле; 4 – железобетонные оголовки свай; 5 – грунт основания

Таким образом, применение промежуточных распределительных слоев и введение оголовков свай является эффективным способом улучшения характеристик свайных фундаментов. Эти меры позволяют обеспечить равномерное распределение нагрузок, а также минимизировать влияние динамических процессов.

Исследования отечественных и зарубежных авторов показывают, что ПРС могут значительно улучшить характеристики свайных фундаментов за счет:

1. Уменьшения осадок: ПРС способствуют равномерному распределению нагрузки, что снижает вероятность неравномерных осадок.

2. Повышения несущей способности: промежуточные слои могут увеличить удельную нагрузку, передаваемую плитой на межсвайный грунт, что позволяет использовать несущую способность фундаментной конструкции более эффективно.

3. Устройство ПРС приводит к снижению материалоёмкости при изготовлении свай.

В литературе описаны различные типы ПРС, которые могут состоять из:

1. Геосинтетических материалов: геотекстили и георешетки улучшают сцепление между слоями грунта и сваями. Использование этих материалов распространено в дорожном строительстве.

2. Гравийно-песчаных смесей: использование гравийно-песчаных подушек для перераспределения нагрузки и улучшения дренажа, является применимым решением для фундаментов в сейсмических районах.

3. Бетонов и цементно-песчаных растворов: известны случаи, когда для строительства высотных зданий применялись специальные решения, которые объединяли головы свай в единую конструкцию силовой бетонной подготовкой, при этом поверх нее устраивалась гидроизоляция, после которой возводился плитный фундамент для здания. Такой подход называют «двуслойным ростверком» п. 8.1.3.22 СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования».

4. Метаматериалов: гранулированные метаматериалы рассматриваются в качестве эффективного средства для защиты зданий и сооружений от сейсмических воздействий. Они используются для заполнения сейсмических барьеров и сейсмических подушек под фундаментами. Их свойства могут быть эффективно использованы для создания промежуточных распределительных слоев, снижающих передачу сейсмических воздействий от грунта к зданию [1].

В ряде научных работ проводились полевые испытания и численные эксперименты для оценки эффективности различных типов ПРС. Например, исследования показали, что использование геотекстилей для высоких насыпей может снизить осадки на 20-30% по сравнению с традиционными методами [107]. Другие результаты свидетельствуют, что гравийно-песчаные подушки могут увеличить несущую способность свайных фундаментов в сейсмических районах на 15-25% [24].

Механизм передачи нагрузки [62], действующий в системе «основание - свайное поле - промежуточный распределительный слой - сооружение», можно описать в следующих четырех стадиях (рис. 1.2):

Стадия 1: консолидация – расчетная нагрузка достигает сжимаемых глинистых грунтов и вызывает их осадку (рис. 1.2 *а*);

Стадия 2: мобилизация отрицательного трения – по мере того, как сжимаемый глинистый грунт оседает, на сваи передается нагрузка от околосвайного грунта (рис. 1.2 *б*);

Стадия 3: включение в работу свайного основания – предыдущие две стадии и часть расчетной нагрузки, непосредственно воспринимаемой сваями, приводят к их осадке, в результате чего развивается положительное (вертикальное) трение по боковой поверхности и сопротивление основания свай (рис. 1.2 *в*);

Стадия 4: равновесие – фундамент достигает состояния силового равновесия. Верхняя часть свай все еще подвержена действию отрицательного трения, направленного вниз. Нижняя часть сваи развила вертикальное трение и сопротивление основания, направленные вверх (рис. 1.2 *г*).

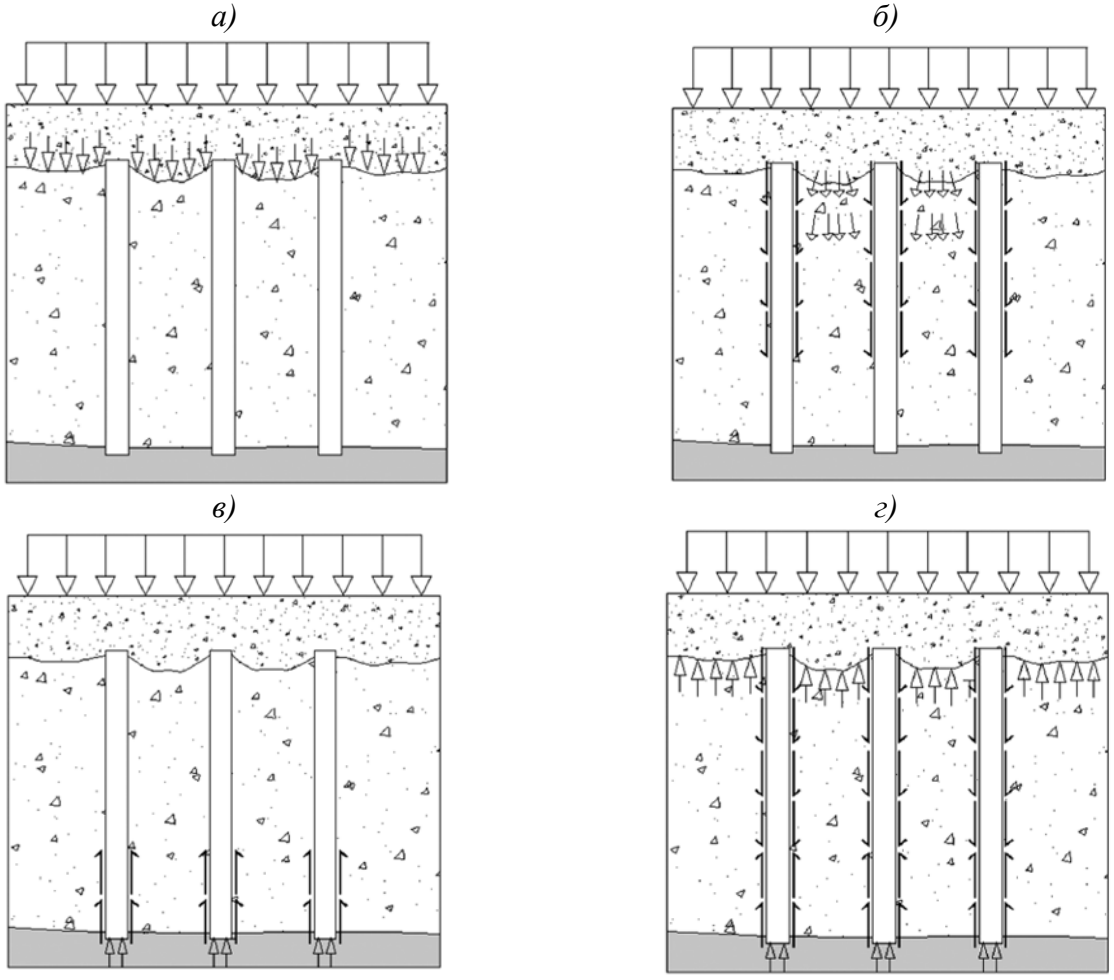


Рисунок 1.2 – Механизм передачи и распределения нагрузки между элементами

Основываясь на механизме передачи нагрузки, описанном выше, и результирующих контурах деформации, можно сделать вывод, что в этой композитной системе будет три нейтральных плоскости, называемые плоскостями равных деформаций: уровни, на которых перемещения свай и окружающего грунта равны (рис.1.3).

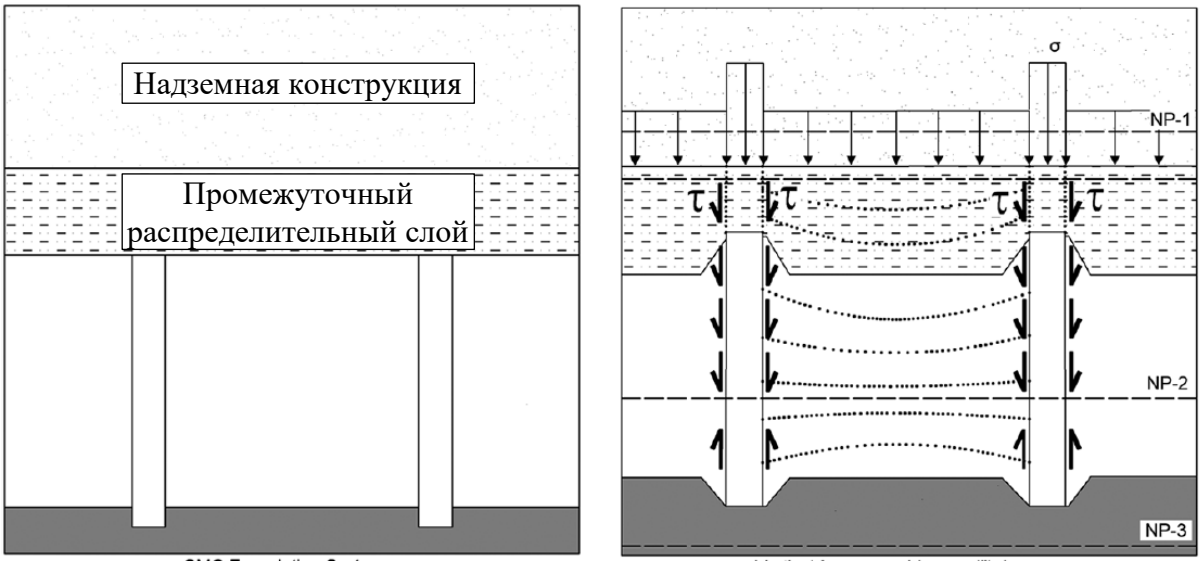


Рисунок 1.3 – Предполагаемые плоскости равных деформаций: верхняя нейтральная плоскость (*NP-1*) – выше уровня подошвы фундамента: предполагается, что над этим уровнем осадка будет равномерной; средняя нейтральная плоскость (*NP-2*) – в пределах длины сваи: уровень, где происходит уравновешивание отрицательного и положительного трения по боковой поверхности; нижняя нейтральная плоскость (*NP-3*) – расположена ниже уровня острия сваи: предполагается, что осадка становится равномерной

Использование промежуточных распределительных слоев в свайных фундаментах представляет собой перспективное направление в строительной отрасли для возведения свайных фундаментов. Преимущества таких решений включают уменьшение осадок, повышение несущей способности и снижение затрат. Однако для широкого внедрения данной технологии необходимы дальнейшие исследования и разработка нормативной базы.

1.2. Основные подходы к проектированию ПРС в составе свайных фундаментов

Промежуточные распределительные слои (ПРС) – это материалы или конструкции, размещаемые между головами свай и низом фундаментной конструкции с целью перераспределения нагрузок на сваи и грунт, а также для уменьшения общих деформаций системы «основание-свайный фундамент с ПРС-сооружение».

Оголовки свай в свайных фундаментах с промежуточным распределительным слоем представляют собой железобетонные, монолитные или сборные уширения, устанавливаемые в уровне головы сваи. Они обладают размерами, превышающими поперечное сечение самой сваи, и служат для регулирования напряженно-деформированного состояния в теле распределительного слоя.

Известность данный вид фундамента в нашей стране получил в начале 70-х годов прошлого века благодаря Д.Д. Баркану. В эти годы Д.Д. Баркан принял участие в VII конгрессе по механике грунтов и фундаментостроению в Чили и «привез оттуда» эффективное решение свайного фундамента с промежуточной подушкой (такое название вошло в строительную отрасль в нашей стране и закрепилось в нормативных документах), который рассматривался, в первую очередь, как антисейсмическая конструкция [49]. Таким образом, Д.Д. Баркан считал перспективным использование свайных фундаментов с промежуточной подушкой в качестве антисейсмической конструкции и инициировал масштабные экспериментальные исследования этого решения на сейсмополигоне в Кишиневе в начале 1970-х годов. В конечном итоге, его экспериментальная база была оформлена в рекомендации [41], которые и по сегодняшний день используются инженерами для проектирования таких фундаментов.

В данной работе рассматривается вопрос определения толщины ПРС над оголовками свай. Его величина подбирается с учётом несущей способности сваи на сжатие и определяется следующим образом:

- для нагрузок до 600 кН – слой толщиной 40 см;

- для нагрузок свыше 600 кН – слой увеличивают до 60 см.

Кроме того, важно обеспечить выполнение условия

$$\frac{N}{F_{\text{ог}}} \leq 2{,}5 \text{ МПа} \qquad (1.1)$$

где N – расчетная вертикальная нагрузка, приходящаяся на одну сваю; $F_{\text{ог}}$ – площадь оголовка сваи в квадратных метрах.

Однако авторский коллектив не сформулировал зависимости между габаритными размерами свайных элементов и соответствующими им значениями высот промежуточных распределительных слоев (ПРС), которые помогали бы назначать их параметры для наиболее эффективного перераспределения напряжений и регулирования неравномерных деформаций в пределах высоты слоя. Отсутствует методологическая привязка важных параметров ПРС – таких как толщина слоя, модуль деформации, показатели сцепления и угла внутреннего трения материала ПРС – к механизмам распределения нагрузок от фундаментной конструкции. Заслуживает особого внимания установленный норматив предельного давления на верхнюю часть сваи, ограниченный значением 2,5 МПа. По всей видимости, данное ограничение обусловлено недостаточным объемом натурных экспериментальных исследований для различных высот промежуточных подушек. Предложенное техническое решение, вероятно, не рассматривалось для применения в строительстве объектов с существенными нагрузками на сваи.

Среди нормативных документов, разработанных на территории РФ, наибольшую методологическую близость к вышеописанным подходам отражают материалы [34]. Рекомендации предусматривают, что высоту промежуточного распределительного слоя (в источнике [34] его называют гибким ростверком) следует определить по следующей формуле:

$$h \geq (s - d) \qquad (1.2)$$

где h – высота слоя в метрах; s – шаг установки свай в плане, также в метрах; d – диаметр свай, м.

Следует отметить, что влияние основных параметров этого слоя на деформируемость основания свайного фундамента в данных рекомендациях не приводится.

В зарубежной практике также применяются подобные фундаменты для зданий и, в связи с этим, проводятся соответствующие научные исследования. Например, при жесткой заделке, небольшом количестве свай и больших расстояниях между ними фундаментная плита может испытывать значительные изгибающие моменты, что способно привести к появлению трещин и локальному увеличению усилий в головах свай [3, 110]. ПРС расчетной высоты позволяет эффективно задействовать сопротивление грунта между сваями для регулирования и распределения нагрузок [87, 103, 80].

Ряд учёных проводили моделирование свайных фундаментов в центрифугах в песчаных грунтах, рассматривая варианты соединения голов свай с плитой как посредством жёсткого стыка, так и через применение промежуточного распределительного слоя (ПРС) [88, 68]. В частности, работы [88] и [68] содержат результаты экспериментов, посвященных изучению влияния вертикальных постоянных и временных нагрузок. Исследования, представленные в трудах [73, 74, 75], рассматривают технический результат при внедрении обоих подходов с использованием серии опытов в центрифугах. В свою очередь, в статье [97] сформулирована упрощённая схема разрушения конструкции, где плита отделена от свай при помощи ПРС, с соответствующим теоретическим обоснованием. При этом результаты полевых испытаний статическими нагрузками, описанные в работах [115] и [89], подчёркивают значимость применения промежуточного распределительного слоя для перераспределения нагрузок и напряжений между сваями и грунтом.

Carlsson [69], Hewlett & Randolph [81], Kempfert et al. [84], Russell & Pierpoint [101] и другие зарубежные авторы [98, 62, 83, 67, 64, 76, 106, 100, 85, 70, 77, 107, 72] в своих работах изложили основные принципы расчета промежуточных распределительных слоев, включающие модели сводообразования, арочные эффекты и схемы продавливания в виде конусов, учитывающие параметры свай, свойства грунта и

конфигурацию геосинтетического армирования. В зарубежной практике проектирования фундаментов с использованием свайных оснований выделяют три основных подхода к анализу промежуточных распределительных слоев [98]:

- Метод на основе решения Прандтля: устойчивость массива при развитии зон сдвига

Согласно этому подходу, разрушение тела ПРС не происходит либо при наличии жесткого штампа над распределительным слоем, либо когда высота ПРС позволяет сформировать сдвиговые конусы внутри собственного объёма, тем самым предотвращая разрушение непосредственно над головой сваи. В рекомендациях ASIRI [98] тело ПРС классифицируется тонким, если выполняется условие:

$$H_M < 0{,}7(s - D) \qquad (1.3)$$

где H_M – обозначает высоту ПРС (в метрах); s – шаг свай в плане и D – диаметр свай (в метрах).

Диаграмма разрушения Прандтля (см. рис. 1.4 слева) включает три основные области:

– область активного предельного состояния Ренкина (I) над головой сваи;

– область дуги логарифмической спирали (II), ограничивающую активное состояние;

– область пассивного предельного состояния Ренкина (III), находящуюся за пределами сваи.

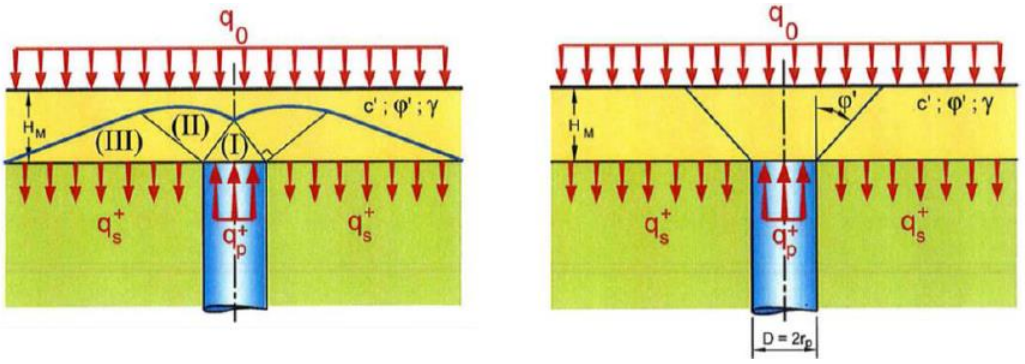


Рисунок 1.4 –Механизм разрушения Прандтля (слева) для плит поверх ПРС и высоких насыпей и (справа) механизм разрушения при продавливании и сдвиге для тонких ПРС из [98]

Напряжение q_p^+ определяется как воздействие на голову сваи, а q_s^+ – как напряжение, передаваемое на грунт между сваями.

Исследования [98], проведённые с помощью испытаний в центрифугах с различными параметрами ПРС, шагами между сваями и коэффициентами замещения грунта сваями, показали хорошую согласованность экспериментальных предельных давлений с расчетными по теории Прандтля (см. рис. 1.5).

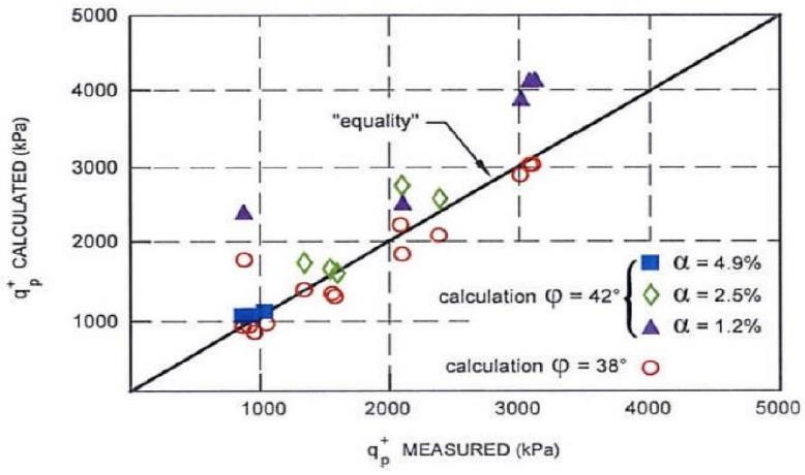


Рисунок 1.5 – Сравнение измеренных предельных давлений (по данным испытаний в центрифуге) с теоретическими значениями, рассчитанными по теории Прандтля [из 98]

- Метод среза по конусу: анализ геометрии ячеек

Для тонких ПРС без жёсткого штампа используется модель сдвига в виде конусов (рис. 1.6, слева). Здесь разрушение определяется предельным углом внутреннего трения материала ПРС. Расчёт предельного напряжения на голове сваи проводится по Еврокоду 7 с учётом внешней нагрузки q_0. Рассматривают два случая:

– Неперекрывающиеся конусы сдвига (рис. 1.6, слева):

Критическая высота H_c, при которой формируются конусы, вычисляется как:

$$H_c = \frac{R - r_p}{tan\varphi'} \tag{1.4}$$

где r_p – радиус сваи, м; R – радиус ячейки, м.

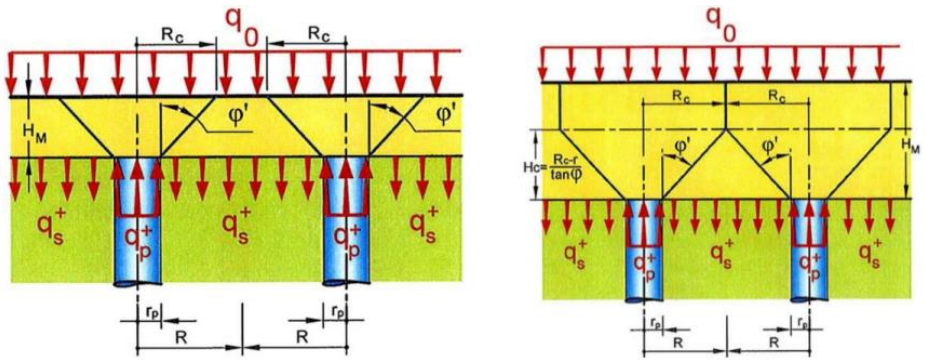


Рисунок 1.6 – Неперекрывающиеся конусы сдвига (слева) и перекрывающиеся конусы сдвига (справа) [98]

Радиус ячейки R определяется как:

$$R = \frac{s}{\sqrt{\pi}} \tag{1.5}$$

При $H_M < H_c$ напряжение q_p^+ рассчитывается по формуле:

$$q_p^+ = \frac{H_M}{3}\left(\frac{R_c^2}{r_p^2} + 1 + \frac{R_c}{r_p}\right)\frac{\gamma}{\gamma_\gamma} + \frac{R_c^2}{r_p^2}q_0 + \frac{1}{tan\varphi'}\left(\frac{R_c^2}{r_p^2} - 1\right)\frac{c'}{\gamma_{c'}} \tag{1.6}$$

где:

$$R_c = r_p + H_M tan\left(\frac{\varphi'}{\gamma_{\varphi'}}\right) \tag{1.7}$$

– Перекрывающиеся конусы сдвига (рис. 1.6, справа):

При $H_M > H_c$ напряжение q_p^+ включает вес конуса, вес грунтового цилиндра и внешнюю нагрузку:

$$q_p^+ = \left[\frac{H_M}{3}\left(\frac{R_c^2}{r_p^2} + 1 + \frac{R_c}{r_p}\right) + (H_M - H_c)\frac{R_c^2}{r_p^2}\right]\frac{\gamma}{\gamma_\gamma} + \frac{R_c^2}{r_p^2}q_0 + \frac{1}{tan\varphi'}\left(\frac{R_c^2}{r_p^2} - 1\right)\frac{c'}{\gamma_{c'}} \tag{1.8}$$

где коэффициенты $\gamma_{c'}$, $\gamma_{\varphi'}$, и γ_γ = 1,0.

- Метод Хьюлетта и Рэндольфа: армирование геосинтетиками

Для дорожного строительства с использованием геосинтетических материалов применяется модель полусферических поверхностей передачи нагрузки (рис. 1.7). Разрушение может происходить в ключе арки (E_v) для тонких

ПРС или на голове сваи (E_t) для массивных слоёв. Расчёт учитывает минимальное значение из E_v и E_t, что повышает эффективность армирования [72].

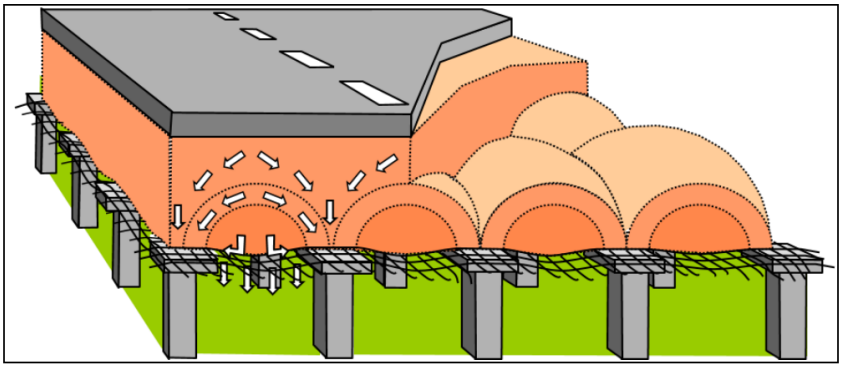


Рисунок 1.7 – Модель армированного основания согласно рекомендациям CUR-rapport 226 (2016) [72]

Обращаясь к последним разработкам отечественных ученых, можно отметить вклад в развитие этой темы руководителя соискателя – д.т.н., профессора кафедры «ОиФ» КубГАУ Мариничева М. Б. [24], предложившего рассматривать и рассчитывать эту конструкцию на основе энергетического подхода. Предлагаемый аналитический подход к расчёту ПРС основывается на условии равенства не только сил, но и работ, связанных с упругими деформациями, возникающими в фундаментной плите, ПРС, сваях и грунте основания (ГО), когда они взаимодействуют в единой системе под нагрузкой от здания. Основные положения данного метода включают:

1. Анализ работы ПРС при помощи штамповых испытаний дает возможность установить аналитическую зависимость между осадкой основания и давлением, приложенным к подошве штампа:

$$s_{gc}^{(m)} = f_{gc}\,(\sigma_f\,) \qquad (1.9)$$

где $s_{gc}^{(m)}$– величина осадки под штампом; σ_f – контактное давление под основанием штампа; $f_{gc}\,(\sigma_f\,)$– функциональная зависимость между давлением и соответствующей ему осадкой.

2. Проведение испытаний грунта под ПРС с использованием метода постоянно возрастающей нагрузки (ПВН). Этот метод позволяет разделить общую

осадку на упругую и пластическую составляющие, а также вычислить соответствующие им значения работы деформаций.

3. Суммарная работа, совершаемая в процессе перемещения фундаментной плиты, представляется в виде суммы работ, связанных с деформацией всех элементов системы:

$$A_f = A_{gc} + A_P + A_b \quad (1.10)$$

где A_f – работа, связанная с перемещением плиты, Дж; A_{gc} – работа сжатия ПРС, Дж; A_P − работа, совершаемая за счёт перемещения свай, Дж; A_b – работа, обусловленная осадкой грунта основания, Дж.

4. Для достижения равновесия всей системы рассматривается следующее уравнение равенства сил:

$$N_f = N_P + P_b \quad (1.11)$$

где N_f – суммарная нагрузка, передаваемая на плиту, N_P – усилие, воспринимаемое сваями, P_b – часть нагрузки, передающаяся через ПРС на грунт основания.

5. Использование аналитических выражений для расчета работ деформаций, приходящихся на различные элементы системы (ПРС, сваи и основание), позволяет составить и решить систему уравнений. В результате решения системы определяются величины N_f и N_P, обеспечивающие соблюдение обоих условий – равенства сил и равенства работ.

Таким образом, метод использует данные натурных испытаний и аналитические зависимости для определения распределения нагрузки между сваями и грунтом основания, а также осадок фундаментной плиты. Такой подход, по мнению автора, является перспективным и должен развиваться, например в части учета дополнительных монолитных оголовков свай, которые могут существенно улучшить работу ПРС в составе свайных фундаментов. Совершенствование аналитического метода расчета было проведено в разделе 3 настоящей диссертации.

Описанные выше способы определения требуемой высоты промежуточного распределительного слоя были сведены в таблицу 1.1 для удобства их рассмотрения и сопоставления.

В таблице 1.1 межосевое расстояние между сваями – S_1 и S_2 (см. рис.1.8); d – эквивалентный диаметр сваи; $S = S_1 = S_2$ для квадратной конфигурации свайного поля; $(S - d)$ – чистое межсвайное расстояние; $S^* = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$ – осредненное расстояние между сваями при нерегулярной сетке расстановки свай.

Таблица 1.1 – Основные опубликованные рекомендации по минимальной высоте промежуточного слоя

Ссылка	Минимальная высота промежуточного распределительного слоя	Примечания
СССР (1974 г.)	0.40 м 0.60 м	при нагрузках ≤ 600 кН при нагрузках ≥ 600 кН
Аль Шемали Али [авт. канд. техн. наук] (2022 г.)	0.1 м	При использовании ПРС из метаматериалов
ОДМ 218.3.1.001-2020 (2020 г.)	> (*S*-*d*) > 0.66 (*S*-*d*)	При φ > 30° При φ > 35°
СП 24.13330.2021 (2021 г.)	0.4…1.0 м	
Мариничев М.Б. [авт. д-ра техн. наук] (2023 г.)	0.36-0.57*(S-d)* 0.5-0.78*(S-d)*	При абс. жестком фунд. При абс. гибк. фунд.
Великобритания, BS8006 (2010 г.)	0.7 (*S*-*d*)	
Германия, EBGEO (2010 г.)	0.7 (*S*-*d*) 2.0 (*S*-*d*)#	#при циклической нагрузке
Нидерланды, CUR226 (2016 г.)	0.66 (*S*-*d*)	
Rogbeck и др. (1998), Collin (2004 г.)	(*S*-*d*) и > 0.9 м	
Kempfert и др. (2004 г.)	1.4 (*S**-*d*) и > 0.9 м	
Hewlett and Randolph (1988 г.)	2.0 (*S*-*d*)	
Франция, ASIRI (2013 г.)	0.7 (*S*-*d*) $\{(S/\pi) - (d/2)\} / \tan\phi'$ #	По Прандтлю #По механизму при продавливании
Шведский метод (Carlsson, 1987 г.)	1.87 (*S*-*d*)	
McGuire (2011 г.)	1.15 s' +1.44 d	
Sloan (2011 г.)	>1.5 (*S*-*d*) или 1.15 s' +1.44 d	

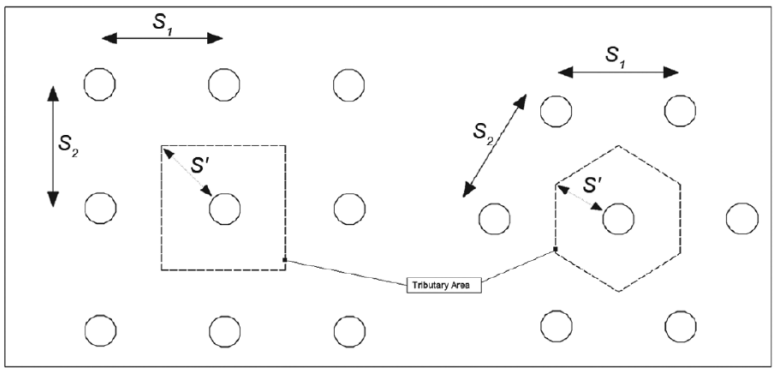


Рисунок 1.8 – Схемы расстановки свай, обычно рассматриваемые в строительстве

$$\text{Прямоугольное расположение свай } s' = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{2} - \frac{d}{2} \qquad (1.12)$$

$$\text{Шахматное расположение свай } s' = \frac{\sqrt{2S_1^2 + S_2^2}}{3} - \frac{d}{2} \qquad (1.13)$$

где s' – это радиус влияния сваи, который определяется с помощью уравнений (1.12) и (1.13), соответственно, для квадратной и шахматной компоновки свай.

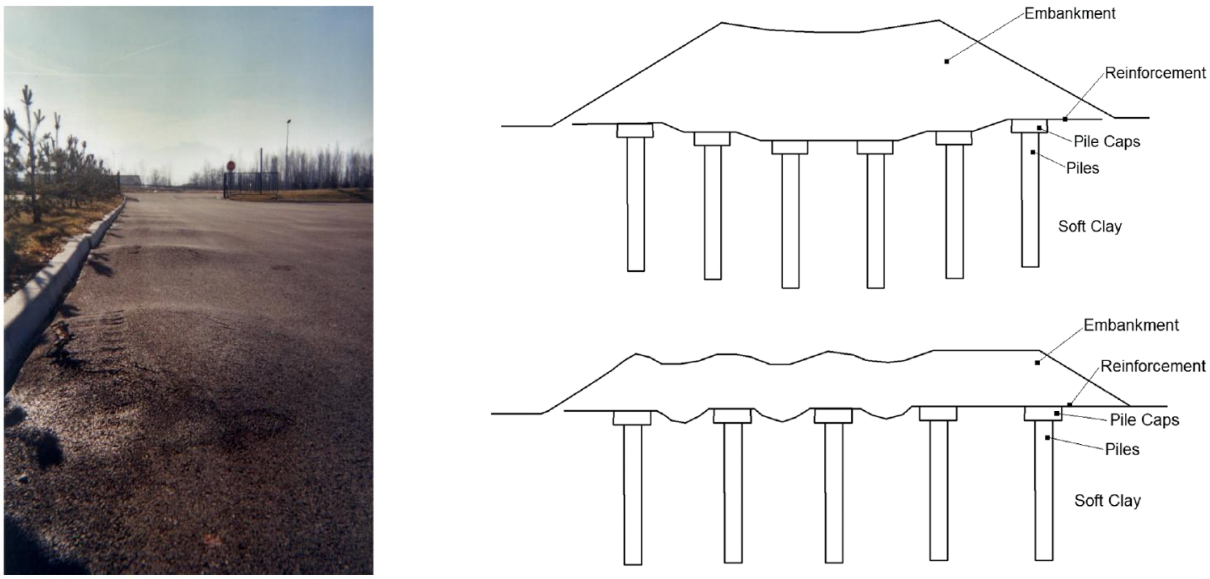


Рисунок 1.9 – Примеры отсутствия совместности перемещений над головами свай и в пролетах между ними у искусственной насыпи и образование в ее теле неравномерных деформаций

Таким образом, выполнив разбор основных методов расчета и конструирования промежуточных распределительных слоев автором сделан вывод о необходимости развития действующих рекомендаций и методик для применения

свайных фундаментов с ПРС в многоэтажном и высотном строительстве. Пока не дана оценка параметрам промежуточного слоя, от которых зависит их прочность и деформируемость. По мнению автора, одним из главных критериев работы данного элемента в системе с свайным основанием является совместность перемещений точек верха ПРС над головой свай и в пролете между ними. Поскольку при отсутствии совместности перемещений возникает проблема неравномерных осадок фундамента, что в конечном итоге приводит к негативным последствиям (см. рис. 1.9). Оценка этого влияния с точки зрения совместности перемещений в голове свай и в пролете между соседними сваями проведена в разделе 2.

Обычно в качестве свай при устройстве фундаментов зданий и сооружений используются сборные сваи заводского изготовления, буронабивные, грунтоцементные и другие. Железобетон является самым распространенным материалом, используемым в свайном фундаментостроении, однако для выполнения жестких вертикальных элементов также могут использоваться другие материалы, такие как дерево или сыпучие материалы (песчаные дренирующие сваи), однако они в диссертации не рассматриваются.

Обычно диаметр свай варьируется от 0,3 м до 0,6 м. (Таблица 1.2, *FHWA* [102]). Эти подходы к конструированию применимы для размеров свай и за пределами стандартных диапазонов; однако следует учитывать производственные мощности машин и другие практические ограничения подрядных организаций.

Таблица 1.2– Наиболее часто применяемые размеры свай (на основе анализа *FHWA* [102])

Тип сваи	Длина сваи (м)	Диаметр сваи (м)
Деревянные	от 6 до 18	от 0,3 до 0,45
Сваи из стальных двутавров	с 9 до 30	от 0,25 до 0,35
Сваи из стальных труб	от 9 до 36	от 0,25 до 1,2
Сборные сваи заводского изготовления	с 9 до 15	от 0,25 до 0,6
Буронабивные сваи с применением обсадных труб	от 6 до 36	от 0,25 до 0,45
Забивные сваи оболочки	от 6 до 23	от 0,3 до 0,9
Буровые сваи CFA	от 6 до 23	от 0,3 до 0,6

Тип сваи	Длина сваи (м)	Диаметр сваи (м)
Буросмесительная технология Deep Soil Mixing	от 6 до 27	от 0,6 до 2,0
Сваи из щебня	от 3 до 9	от 0,6 до 1,2
Виброуплотненные щебеночные сваи	от 6 до 27	от 0,45 до 0,6

Для того, чтобы свайно-грунтовый массив имел равномерную сжимаемость под пятном фундамента, обычно принимают межсвайное расстояние от трех до четырех диаметров сваи ($S = 3d$ до $4d$). Некоторые из опубликованных рекомендаций по стандартному расстоянию между сваями приведены в Таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Стандартные межосевые расстояния между сваями в поле

Ссылка	Расстояние между сваями
FHWA (2017)	от 1.2 м до 1.8 м
Kempfert et al. (2004)	$S^*- d \leq$ 3 м – для статической нагрузки $S^* - d \leq$ 2.4 м – для значительной динамической нагрузки
Collin (2004)	$S - d \leq$ 3 м
German Code, EBGEO (2010)	$S * -d \leq$ 2.5 м
German Code, EBGEO (2011)	$d/S >$ 0.15 ($S < 6.7d$)
Wong and Muttuvel (2011)	1.3 м to 2.0 м

Расстояние между сваями определяет коэффициент замещения площади (A_r), который рассчитывается как отношение площади поперечного сечения колонны к площади ее элементарной ячейки, как показано на рисунке 1.8. Зависимость изменения A_r и S/d (шаг/диаметр) показано на рисунке 1.10.

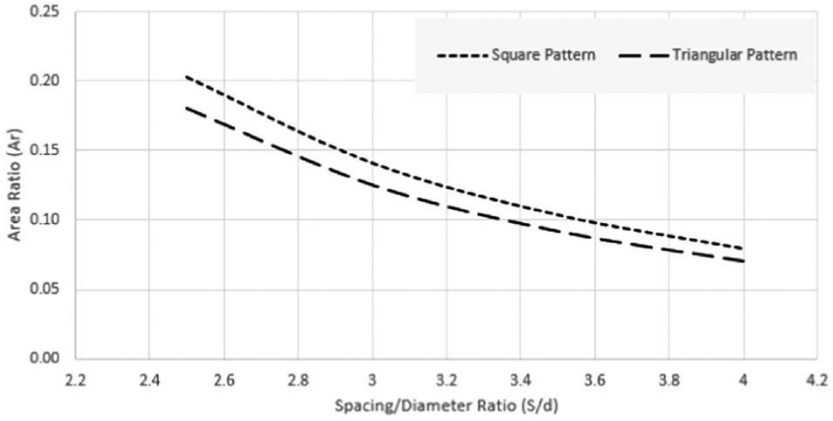


Рисунок 1.10 – Соотношение площади замещения грунта сваями и отношение шаг/диаметр

Рогбек и др. [99] рекомендуют, чтобы A_r был не менее 10%, и это является нижним пределом, выведенным Ханом и Габром [78] на основе опыта применения армирования геосинтетиками насыпей на свайных основаниях. Для стандартных значений S/d от 3 до 4 значение коэффициента площади попадает в диапазон от 7% до 13% для рекомендуемого расстояния между сваями, как показано на рисунке 1.10.

1.3. Методы расчёта свайных фундаментов на основе осреднения свойств грунто-свайного массива

В российской геотехнике значительный вклад в развитие теории расчета свайных оснований и работы грунтовых массивов внесли такие специалисты, как С. Г. Безволев, И. К. Попсуенко, З. Г. Тер-Мартиросян, А. З. Тер-Мартиросян и В. Г. Федоровский [7, 8, 9, 11, 12, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 44, 45, 51, 52, 54, 55].

Значительный вклад в изучение оснований, усиленных грунтоцементными сваями, внес З. Г. Тер-Мартиросян [52], предложивший методы определения осреднённых характеристик деформируемости улучшенного массива, включающего исходный грунт и армирующие элементы. Среди основных подходов выделены:

1. Метод равных или равенства деформаций;
2. Метод эквивалентной и однородной среды;
3. Метод полидисперсной среды с цилиндрическими включениями;
4. Метод приведённого модуля деформации массива со сваями.

Метод равных деформаций (формула 1.14–1.15) предполагает замену реального массива условно однородной средой с осреднёнными характеристиками. Условие равенства вертикальных деформаций сваи и грунта позволяет выразить эквивалентный модуль деформации:

$$S_{sw} = \frac{N_{sw}}{A_{sw}E_{sw}}, S_{gr} = \frac{N_{gr}}{A_{gr}E_{gr}}, \; S_{\Sigma} = \frac{N}{A < E >} \tag{1.14}$$

Условие равенства суммарной осадки (S_{Σ}), равной как осадке свай (S_{sw}), так и осадке окружающего грунта (S_{gr}), позволяет вывести следующую формулу для расчёта **эквивалентного модуля деформации** $< E >$ усиленного основания:

$$< E > = \frac{A_{gr}E_{gr} + A_{sw}E_{sw}}{A} \tag{1.15}$$

где E_{sw}, E_{gr} – модули деформации сваи и грунта соответственно.

Метод полидисперсной среды с цилиндрическими включениями [52] (рис.1.11), основан на разработках Хашена и Розена [79], описывает массив как изотропную среду с цилиндрическими включениями (сваями). Эквивалентный модуль деформации вдоль оси цилиндра рассчитывается по формуле 1.16:

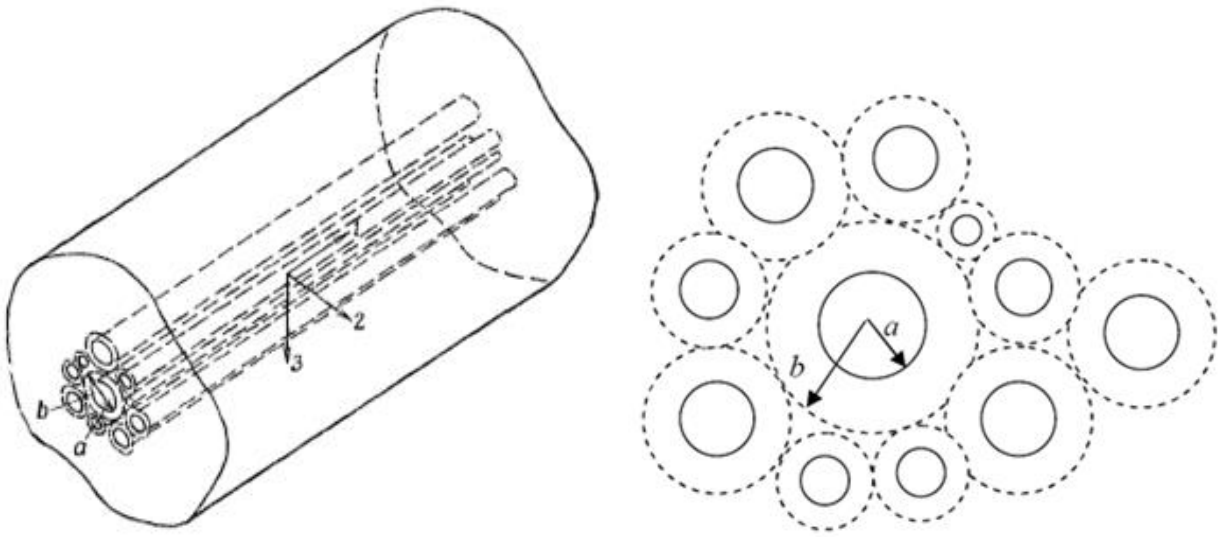


Рисунок 1.11 – Полидисперсная среда с цилиндрическими включениями и ее сечение [52, 79]

$$< E >= nE_{sw} + (1-n)E_{gr} + \frac{4n(1-n)(v_{sw}-v_{gr})^2 G_{gr}}{\frac{(1-n)G_{gr}}{K_{sw}+G_{sw}/3} + \frac{nG_{gr}}{K_{gr}+G_{gr}/3} + 1} \quad (1.16)$$

где $< E >$ – эквивалентный модуль деформации усиленного основания грунтоцементными сваями, кПа; E_{sw} – модуль деформации сваи, кПа; E_{gr} – модуль деформации грунта, кПа; v_{sw}, v_{gr} – коэффициент Пуассона свай и грунта; n – объемная доля содержания грунтоцементных элементов в рассматриваемой области; G_{gr}, G_{sw} – модуль сдвига грунта и свай; K_{sw}, K_{gr} – объемный модуль деформации свай и грунта.

Для оценки деформаций численными методами также используется метод приведённого модуля деформации массива со сваями, основанный на решении контактной задачи для одной сваи в ячейке. Приведённый модуль вычисляется по формулам:

$$\varepsilon_2 = \frac{S_A - \frac{S_B - S_C}{2}}{l} \quad (1.17)$$

$$< E >= \frac{p}{\varepsilon_2}\beta \quad (1.18)$$

где S_A, S_B, S_C – осадки в различных точках ячейки.

Эквивалентные характеристики применяются для расчёта осадки плиты с использованием метода послойного суммирования (СП 22.13330), МКЭ с осреднёнными параметрами или детального моделирования свай.

Следует отметить, что все вышеописанные подходы позволяют учитывать жесткость грунта с включенными в него сваями через осреднение их деформационных свойств. Однако при использовании железобетонных свай с модулем упругости порядка 30000 МПа эти методы могут давать завышенные значения осредненной жесткости массива, что искажает оценку его реальной распределительной способности. Кроме того, при данном подходе не учитываются

особенности устройства промежуточных распределительных слоев и оголовков свай.

И. Т. Мирсаяпов и В. Р. Мустакимов [25, 26, 27] предложили формулу для эквивалентного сопротивления массива:

$$R_{gr}^{ef} = (R_{gr}\frac{A_{gr} - A_{sw}}{A_{gr}} + R_{sw}\frac{A_{sw}}{A_{gr}}) \quad (1.19)$$

Эквивалентный модуль деформации E_{gr}^{ef} определяется с учётом корректирующих коэффициентов $\gamma_{\varepsilon i}$ и $\gamma_{\mu i}$, зависящих от длины свай и их площади внутри массива (формулы 1.20–1.22).

$$E_{gr}^{ef} = \left(\frac{E_{gr}\left(A_{gr} - A_{sw}\right)}{A_{gr}} + \frac{E_{sw}A_{sw}}{A_{gr}}\right)(\gamma_{\varepsilon i} + \gamma_{\mu i}) \quad (1.20)$$

$$\gamma_{\varepsilon i} = 1{,}6 + 0{,}3\left({}^{l_{sw}}/_{h_{\text{НС}}}\right), \quad (1.21)$$

$$\gamma_{\mu i} = 1{,}07\left[\frac{\mu_1 - \mu_i}{\mu_1}\right], \quad (1.22)$$

Рассмотренные работы схожи с подходом З. Г. Тер-Мартиросяна [51], однако вводятся некоторые уточняющие коэффициенты, характеризующие площадь, занятую сваями, и их длину, что должно уточнять осредненный модуль, однако из этих работ [25, 26, 27] следует, что осредненный модуль деформации в случае с железобетонными сваями будет существенно увеличиваться, что может приводить к расхождению с фактическими характеристиками и нуждается в дополнительном уточнении.

В. И. Крутов и И. К. Попсуенко [11, 12] разработали методы ограничения давления p на подстилающий грунт:

$$p = \frac{(0.8656a^2 - \pi R_0^2)\gamma_c + A_{sw}\gamma_{sw} + A_{gr}\gamma_{gr}}{A_{sw} + A_{gr}} \leq R_z, \quad (1.23)$$

а также условия устойчивости зон уплотнения против сдвига (формула 1.24).

$$\left((0.8656a^2 - \pi R_0^2)\gamma_c + \pi(R^2 + r^2)\gamma_{gr}\right)h \leq (\sigma tg\varphi + C)2\pi rh \qquad (1.24)$$

А. Н. Саурин [44, 45] предложил учитывать снижение напряжений в грунте между сваями, определяя реактивное давление:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 a_1 a_2 - F_d}{a_1 a_2 - A_{sw}} \qquad (1.25)$$

В. Г. Федоровский и С. Г. Безволев [54, 55] разработали систему дифференциальных уравнений для расчёта вертикального поля свай:

$$F_1 \frac{d(\sigma_1 - \sigma_2)}{dz} = -\tau \times u \qquad (1.26)$$

$$F_1 \frac{d(\sigma_1 - \sigma_2)}{dz} = -\tau \times u + F_2 \frac{du_0}{dz}, \qquad (1.27)$$

Для модуля деформации грунта E_2 предложена билинейная модель (формула 1.28).

$$E_2 = \begin{cases} E_{20} \\ \dfrac{\sigma_2 - \sigma_{20}}{\frac{\sigma_2 - p_{st}}{E_2} + \frac{p_{st} - \sigma_{20}}{E_{20}}} \end{cases} \qquad (1.28)$$

Осадка массива грунта со сваями определяется:

$$s_1 = \frac{2\pi}{ln\frac{5(1+v)}{d}} \qquad (1.29)$$

где l и d обозначают, соответственно, длину и диаметр сваи, а v – коэффициент Пуассона.

А. М. Караулов [7, 8, 9] исследовал предельное состояние свай, где в верхней и нижней частях формируются зоны сдвига. Основные этапы работы сваи отражены на схемах, представленных на рисунках 1.12 и 1.13.

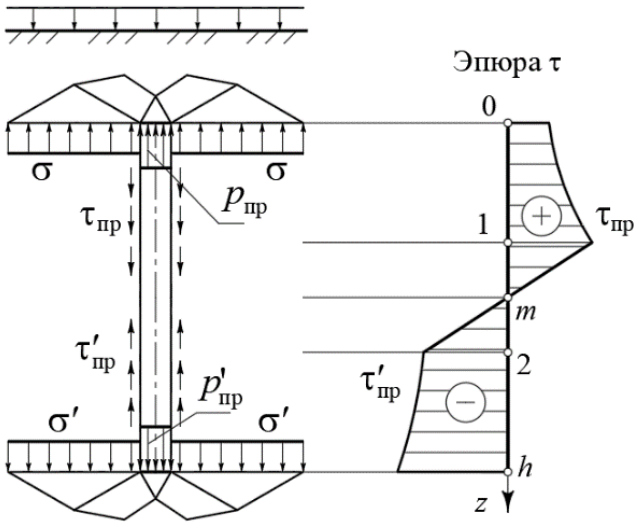


Рисунок 1.12 – Схематичное изображение разреза вдоль оси сваи с эпюрами распределения предельных и касательных напряжений

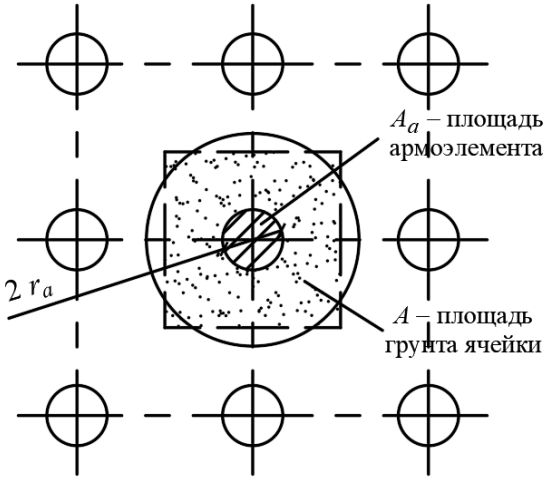


Рисунок 1.13 – Модель отдельной ячейки поля армоэлементов

Осадка армоэлемента (сваи в ячейке) рассчитывается по формуле:

$$S_i = \frac{\beta}{E}\left\{-\gamma\frac{z_1^2 - z_0^2}{2} + n_1(z_1 - z_0) - \frac{m_1}{\alpha}(e^{-\alpha z_1} - e^{-\alpha z_0})\right\} +$$

$$+\left[\sigma_1 - \frac{u(z_2 - z_1)(2t_1 - t_2)}{6A}\right](z_2 - z_1) -$$

$$-\left(\gamma\frac{z_h^2 - z_2^2}{2} + n_2(z_h - z_2) + \frac{m_2}{\alpha}(e^{\alpha z_h} - e^{\alpha z_2})\right) \qquad (1.30)$$

В этой зависимости параметры α, n_1, m_1 и другие коэффициенты определяются в соответствии с начальными условиями задачи. Максимальное

значение осадки $S_{\max} = \max S_i$ находится аналитически как функция переменных z_1 или z_2. Применяя данный метод расчёта, можно установить распределение осадок в пределах грунтового массива, армированного сваями.

Л. В. Нуждин и М. Л. Нуждин [30, 31, 32] показали, что основное сопротивление нагрузке обеспечивается боковым обжатием грунта (рис. 1.14 – 1.18). Осадка фундамента определяется как сумма деформаций промежуточного слоя (ПРС), свай и подстилающих грунтов (формула 1.31).

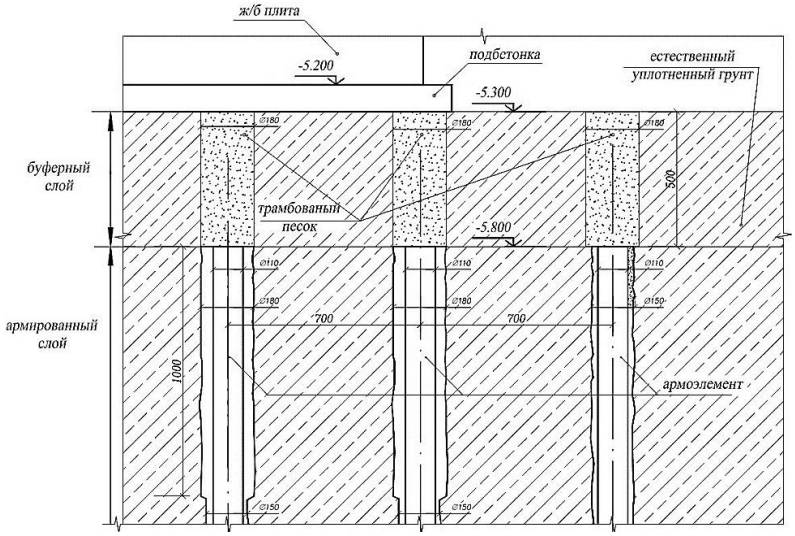


Рисунок 1.14 – Решение по сопряжению свай и фундамента [30, 31, 32]

$$S = S_1 + S_{2max} + S_3 \qquad (1.31)$$

где S_1 – представляет деформацию тела ПРС; $S_{\max}$ – осадка в пределах длины свай; S_2 – осадка подстилающих грунтов.

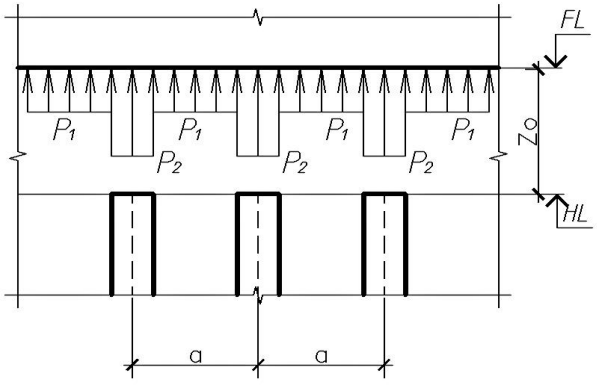


Рисунок 1.15 – Распределение контактных давлений между элементами

При этом осадка S_1 рассчитывается с учетом компрессионного сжатия ПРС, а S_3 определяется на основе модели условного фундамента.

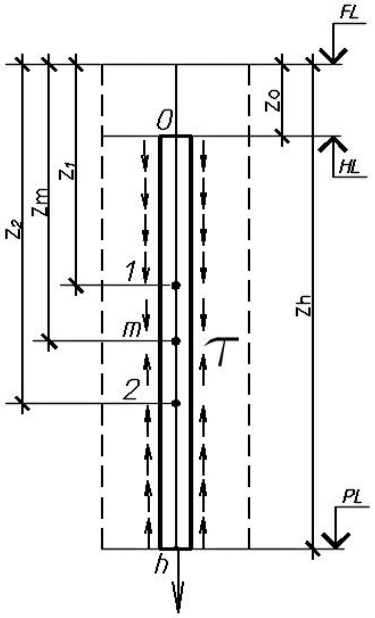


Рисунок 1.16 – Схема работы сваи как армоэлемента

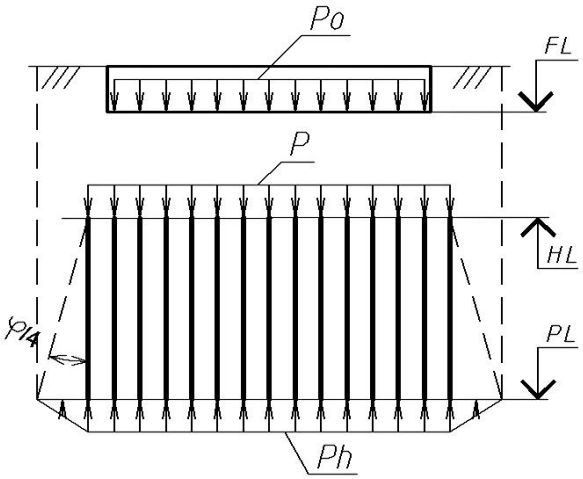


Рисунок 1.17 – Схема уровней передачи нагрузки от фундамента P_0 на армированное основание (P и Ph – нагрузки в уровне головы и острия армоэлементов)

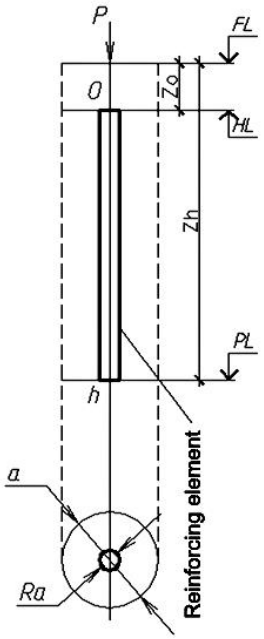


Рисунок 1.18 – Расчетная ячейка метода [30, 31, 32]

Эксперименты подтвердили [30, 31, 32], что максимальные напряжения сосредоточены в средней части сваи (рис. 1.19).

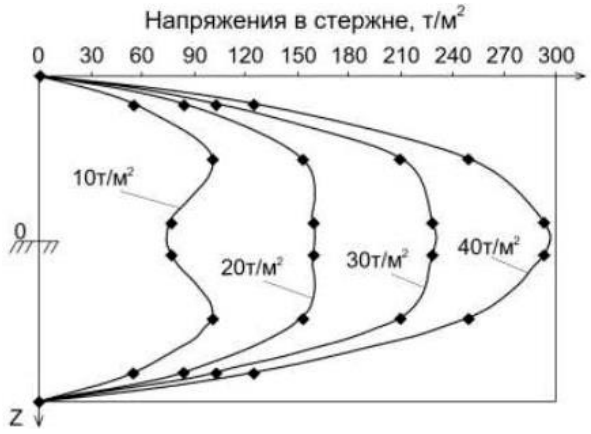


Рисунок 1.19 – Экспериментальные зависимости распределения напряжений вдоль армоэлемента при поэтапном увеличении давления под подошвой фундамента

Анализ результатов показал, что верхняя и нижняя трети сваи практически не испытывают существенных нагрузок (см. рис. 1.19), тогда как основная нагрузка сконцентрирована в средней части, что, по-видимому, связано с интенсивным развитием бокового трения по её поверхности. Эти результаты подтвердили, что головы свай практически не подвергаются значимым нагрузкам. В качестве перспективного направления предлагается повышать эффективность работы верхней трети сваи, что может быть достигнуто за счет применения железобетонных оголовков. Теоретическое обоснование этого подхода, подтвержденное численными расчётами, подробно представлено во втором разделе настоящей диссертации.

Современные программные комплексы (*PLAXIS, MIDAS* и др.) реализуют *МКЭ* и обеспечивают:

- удобство принятия решений
- детализацию локальных зон
- учет этапов строительства

Наиболее используемые модели грунта:

- модель Мора-Кулона
- Hardening Soil (включая модификацию с учетом малых деформаций)

Точность расчетов зависит от качества сетки разбиения и корректности задания граничных условий, которые определяются спецификой решаемой задачи.

1.4. Особенности учета сейсмических нагрузок при конструировании ПРС

Применение промежуточных распределительных слоев хорошо зарекомендовало себя при динамических и сейсмических нагрузках. При этом для большей эффективности некоторые авторы используют так называемые метаматериалы, которые обладают заданными рассеивающими свойствами. Анализируя работу А. А. Аль Шемали [1] можно выделить следующие важные моменты по применению метаматериалов для промежуточных распределительных слоев:

1. Гранулированные метаматериалы рассматриваются в качестве эффективного средства для защиты зданий и сооружений от сейсмических воздействий. Они используются для заполнения сейсмических барьеров и сейсмических подушек под фундаментами (аналог ПРС).

2. Конечно-элементное моделирование 10-этажного здания с плитным фундаментом и подушкой из метаматериалов (ПРС) показало, что размещение такой подушки под фундаментом позволяет снизить ускорения, скорости и перемещения в конструкции более чем на 70% по сравнению со случаем без ПРС.

3. Наиболее значимым параметром метаматериалов, влияющим на эффективность их применения, является сцепление. Увеличение сцепления приводит к существенному снижению диссипативных свойств метаматериалов. Влияние других параметров (плотность, угол трения, модуль Юнга, коэффициент Пуассона) незначительно.

4. Увеличение толщины ПРС не оказывает заметного влияния на снижение колебаний в здании.

Таким образом, основной вывод работы [1] – гранулированные метаматериалы, в частности их низкое сцепление, могут быть эффективно использованы для создания ПРС, снижающих передачу сейсмических воздействий от грунта к зданию.

В работе Мариничева М.Б. [24] было рассмотрено влияние сейсмических воздействий при назначении параметров ПРС в фундаментах.

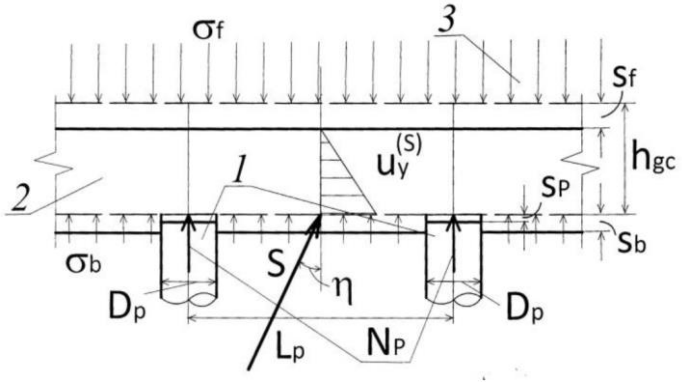


Рисунок 1.20 – Схема ПРС к расчету на сейсмическое воздействие [24]: сваи (1), фундаментная плита (2), промежуточный распределительный слой (3), нагрузка от здания на плиту (σ_f), сопротивление свай (N_P), сопротивление грунта основания (σ_b), толщина ПРС (h_{gc}), расстояние между сваями (L_p) и диаметр свай (D_p), осадка фундаментной плиты (s_f), осадка ПРС (s_{gc}), осадка грунта основания (s_b)

При воздействии землетрясения на фундаментную конструкцию, включающую промежуточный распределительный слой (ПРС) (см. рис. 1.20) испытывает комбинированное действие сейсмических сил, раскладываемых на вертикальные и горизонтальные компоненты. Для расчета величины сейсмической силы используется соотношение:

$$S = \sigma_f L_p^2 k_s \qquad (1.32)$$

где σ_f – давление, формируемое весом здания на подошве фундаментной плиты, L_p – межосевое расстояние между сваями, k_s – сейсмический коэффициент, определяемый в соответствии с СП 14.13330.2018.

Вертикальная составляющая приводит к сжатию ПРС, а горизонтальная – к развитию сдвиговых деформаций в его теле в уровне подошвы. Эти два вида деформаций связаны через функцию угла внутреннего трения материала ПРС.

Сейсмическая сила совершает работу, затрачиваемую на упругие и пластические деформации ПРС. При этом фундаментная плита, рассматриваемая как жесткое и практически недеформируемое тело, обеспечивает выполнение полной работы

деформации. Равенство работ упругих деформаций позволяет свести задачу к поиску величины упругой деформации фундаментной плиты, которая оказывается функцией исключительно толщины ПРС и практически не зависит от межсвайного расстояния, а с увеличением высоты ПРС упругая деформация возрастает.

Работа упругой деформации тела ПРС рассчитывается по следующей формуле:

$$A_{gc.e}^{(S)} = G\left[\frac{1-v_{gc}}{1-2v_{gc}}\left(\frac{s_f^{(S)}}{h_{gc}}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{u_y^{(S)}}{h_{gc}}\right)^2\right]\frac{h_{gc}L_P^2}{2} \quad (1.33)$$

где G и v_{gc} – модуль сдвига, кПа, и коэффициент Пуассона материала ПРС, соответственно.

При помощи разработанного метода расчета удается подобрать такую высоту ПРС и назначить характеристики его материала, при которых дополнительные вертикальные и горизонтальные перемещения слоя в сочетании с расчетными осадками самого фундамента не будут превышать предельно допустимое значение. Описание граничных условий с использованием угла внутреннего трения влияет на результаты расчетов: при большем значении угла внутреннего трения перемещение фундаментной плиты меньше.

В исследовании М.Б. Мариничева [24] показана высокая эффективность применения ПРС между свайным полем и фундаментной плитой при сейсмических нагрузках. Численные исследования, проведенные для землетрясений интенсивностью 7–9 баллов, выявили значительное снижение усилий в сваях при использовании ПРС по сравнению с жесткой заделкой: поперечные силы уменьшаются от 7 до 14 раз; сжимающие силы – от 3 до 4 раз. ПРС обеспечивает более равномерное распределение усилий, повышает устойчивость окружающего грунта и является эффективным решением для строительства в сейсмических районах.

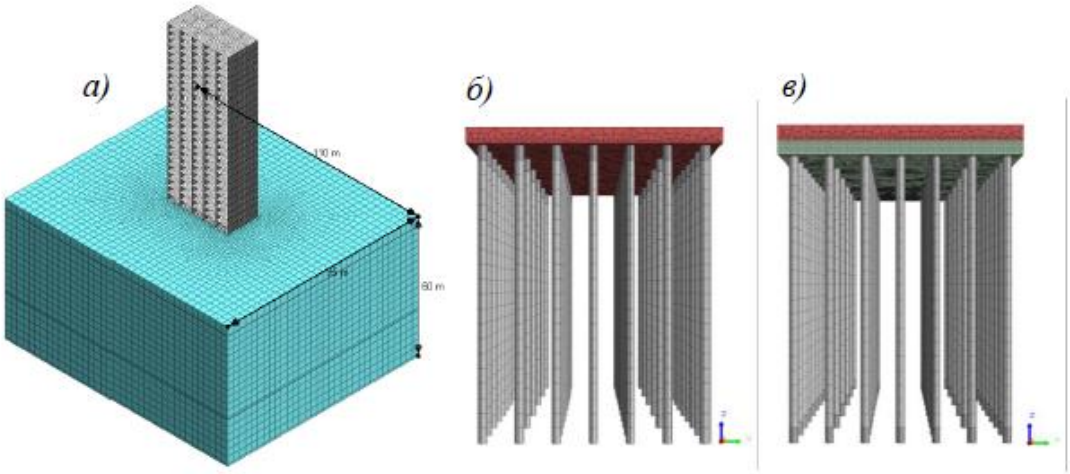


Рисунок 1.21 – Расчетная модель многоэтажного здания (а), используемая для оценки влияния сейсмических воздействий на нагрузки в сваях: (б) при жесткой заделке свай в фундаментную плиту и (в) при применении ПРС [24]

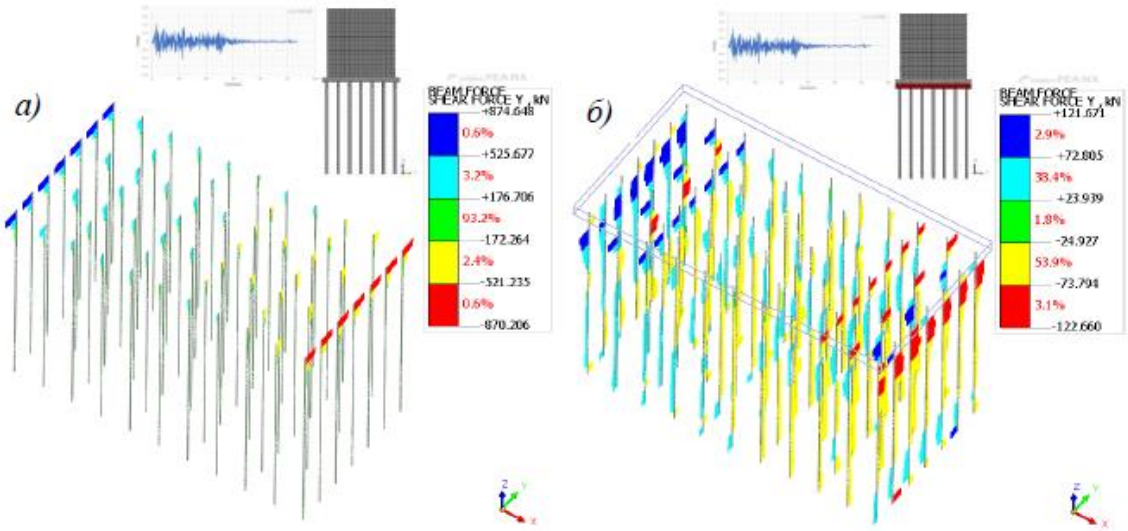


Рисунок 1.22 – Сравнение расчетных значений поперечных сил в сваях (ось OX) при 7 балльном сейсмическом воздействии: (а) фундамент жесткой заделкой свай в фундаментную плиту; (б) фундамент с использованием ПРС [24]

1.5. Выводы по Разделу 1 и задачи исследований

На основе проведенного анализа современного состояния вопроса проектирования свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем (ПРС) можно сделать вывод о необходимости дальнейшего развития методов их расчета и конструирования, особенно в сложных инженерно-геологических условиях и сейсмических районах.

Анализ существующих исследований показывает, что применение ПРС в сочетании с железобетонными оголовками свай является перспективным направлением совершенствования свайных фундаментов. Однако недостаточная изученность взаимосвязи параметров ПРС, свайного поля и внешних нагрузок от здания требует проведения комплексных исследований для обоснования возможности оптимизации конструктивных решений. Особенно актуально это становится при проектировании многоэтажных и высотных зданий, где влияние различных факторов существенно возрастает.

Вопрос снижения горизонтальных усилий в сваях при сейсмических воздействиях также требует дополнительных исследований эффективности применения ПРС. Существующие методики расчета не в полной мере учитывают особенности работы таких систем в реальных условиях эксплуатации, что подтверждается результатами натурных наблюдений.

Отсутствие единой методологии расчета свайных фундаментов с ПРС и железобетонными оголовками свай, а также необходимость учета специфики инженерно-геологических условий строительства делают актуальным продолжение разработки и совершенствования аналитического метода расчета, предложенного М.Б. Мариничевым. Также для дальнейшего практического использования свайных фундаментов с ПРС важное значение имеет разработка классификации их возможных технических решений с учетом сложности инженерно-геологических условий.

Таким образом, на основании проведенного анализа были сформулированы следующие **задачи диссертационного исследования**:

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.

2. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЕЖУТОЧНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО СЛОЯ (ПРС) В СОСТАВЕ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА

2.1. Выбор модели грунта и параметров расчетной схемы для исследований

В настоящее время численное моделирование позволяет исследовать различные задачи, в том числе без замкнутых аналитических решений [61]. Основным стал метод конечных элементов (*МКЭ*), предложенный Р. Куррантом [71], который обеспечивает высокую точность и адаптивность к сложным условиям [61].

Современные нормативные документы (СП 24.13330.2021, СП 22.13330.2016) требуют численных расчетов для большинства геотехнических задач. При выборе программного обеспечения критерием остается достоверность результатов, подтвержденная натурными данными.

Для моделирования свайных фундаментов с распределительным слоем выбран сертифицированный комплекс *MIDAS FEA NX,* который обеспечивает гибкое геометрическое моделирование, расчеты на разных стадиях строительства, работу с большими моделями и точный анализ динамических процессов, фильтрации, устойчивости и сейсмических воздействий. Программа включает мультифронтальный решатель для повышения скорости расчетов и более 15 моделей материалов, включая упругопластические и специализированные для грунтов (Кулона-Мора, Hardening Soil, Soft Soil).

2.1.1. Модель Кулона-Мора

В инженерной практике модель Кулона–Мора продолжает оставаться наиболее востребованной благодаря своей широкой известности и доступности в большинстве геотехнических программных комплексов [86]. Основное преимущество модели заключается в возможности использования минимального набора характеристик: модуля деформации E (МПа), коэффициента Пуассона ν, угла внутреннего трения ϕ (град.), удельного сцепления C (кПа) и угла дилатансии

ψ (град.). Условие разрушения в этой модели описывается линейной связью между нормальными σ (кПа) и касательными τ (кПа) напряжениями (рис. 2.1):

$$\tau = \sigma \cdot tg\varphi + C \quad (2.1)$$

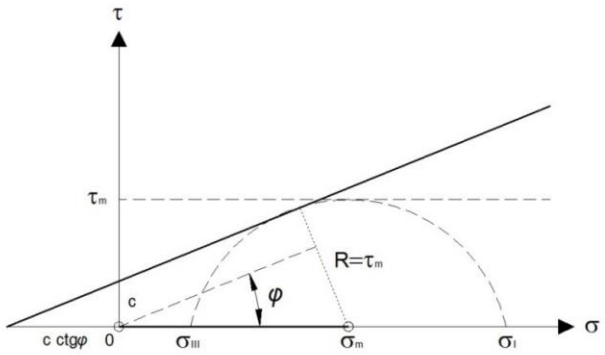


Рисунок 2.1 – Графическая интерпретация функции прочности по Кулону-Мору

2.1.2. Модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil)

В отличие от «классической» модели Мора-Кулона, подход модели Hardening Soil относится к гиперболическим и учитывает изменение прочности грунта при сдвиговых и нормальных напряжениях в грунте. Это позволяет динамически корректировать границу разрушения в процессе накопления пластических деформаций (рис. 2.2 и 2.3).

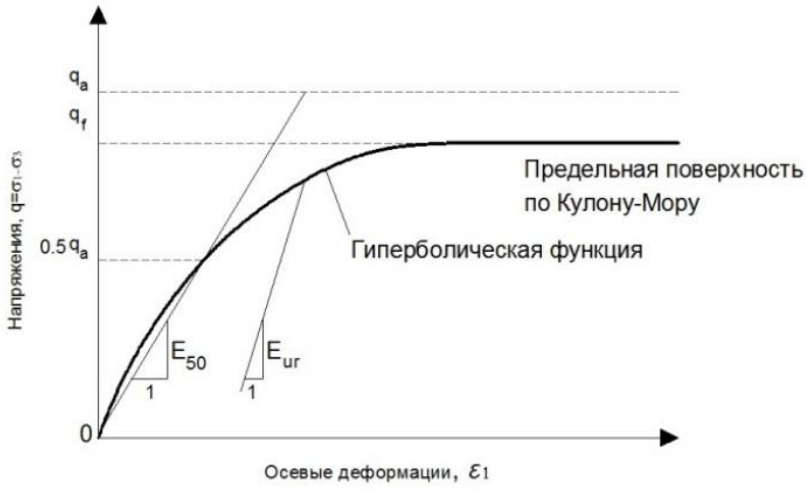


Рисунок 2.2 – Зависимость сдвиговых деформаций от девиаторных напряжений

Рисунок 2.3 – Механизм работы модели упрочняющегося грунта

Основные особенности модели упрочняющегося грунта заключаются в следующем:

– Жесткость грунта (параметр m) варьируется в зависимости от действующих напряжений;

– Пластические деформации учитываются через модуль E_{50} (при девиаторном нагружении) и модуль E_{oed} (при одометрическом нагружении);

– Для ветви разгрузки вводится модуль E_{ur};

– Критерий разрушения базируется на классических параметрах Кулона–Мора (φ, C, ψ), но дополнительно корректируется с учётом упрочнения при сдвиге.

Такой комплексный подход позволяет модели точно описывать поведение грунта при сложных процессах деформирования, включая динамические и циклические нагрузки.

2.1.3. Модель упрочняющегося грунта при малых деформациях (Hardening Soil Small-strain)

Для задач, требующих учёта малых деформаций $\varepsilon_1 < 10^{-3}$, применяется модифицированная модель Hardening Soil Small-strain (HSS). В отличие от «базовой» модели (HS), здесь жёсткость фиксируется только на начальном этапе нагружения, а при разгрузке или повторных нагружениях предполагается линейно-упругое поведение. Важная особенность – гиперболическая зависимость между напряжениями и деформациями для диапазона $\varepsilon_1 < 10^{-3}$ (рис. 2.4).

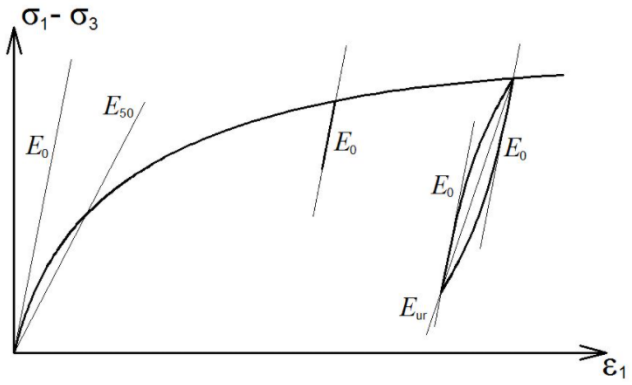


Рисунок 2.4 – Зависимость между девиаторным напряжением и относительной деформацией, а также параметры жесткости в модели HSS

Для определения начального модуля сдвига G_0 и параметра $\gamma_{0.722}$ используются эмпирические соотношения:

1. Hardin & Black (1969):

$$G_0^{ref}[MPa] = \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \times 33 \tag{2.2}$$

2. Lengkeek:

$$G_0^{ref} \approx RD \cdot 70MPa + 60MPa \tag{2.3}$$

3. Benz (2007):

$$\gamma_{0.722} = 0.385/4G_0\left[2c\left(1 + cos(2\varphi)\right) - \sigma_1(1 + K_0)sin(2\varphi)\right] \tag{2.4}$$

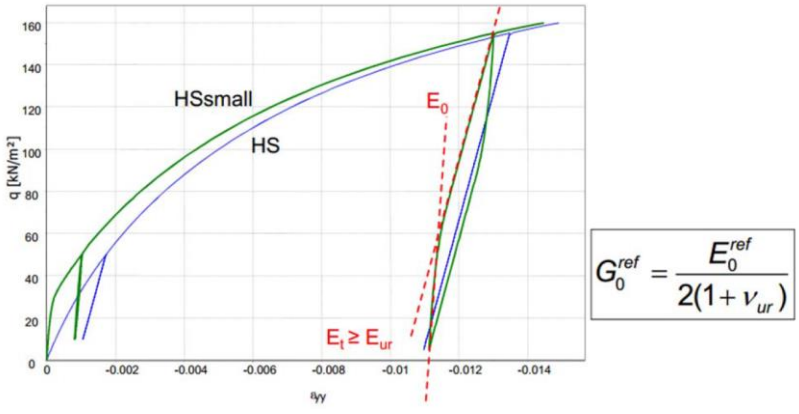


Рисунок 2.5 – Результаты дренированных трехосных испытаний для определения начального модуля сдвига G_0^{ref} в моделях HS и HSS

Обычно величина G_0^{ref} находится в пределах:

$$G_0^{ref} = (2.5\ldots10) \cdot G_{ur}^{ref} \quad (2.5)$$

а величина сдвиговых деформаций $\gamma_{0.722}$ составляет:

$$\gamma_{0.722} = (1\ldots2) \cdot 10^{-4} \quad (2.6)$$

где сдвиговой модуль разгрузки определяется как $G_{ur}^{ref} = \frac{E_{ur}^{ref}}{2(1+\nu_{ur})}$

Измерение малых деформаций ($\sim10^{-4}$мм) требует использования высокоточных приборов, таких как оптические датчики или резонансные колонки. В качестве альтернативы можно применять приборы для трёхосного сжатия с дополненной системой локальных сенсоров. Модель HSS особенно эффективна при расчёте взаимодействия грунта с подпорными конструкциями, тоннелями или сооружениями на свайных фундаментах.

Исходя из анализа существующих моделей грунтов и их особенностей, можно сделать вывод, что модель Мора-Кулона занимает лидирующее положение в конечно-элементных расчетах взаимодействия грунтов с фундаментами благодаря своей относительной простоте и надежности. Однако при работе с неравномерно сжимаемыми грунтами и при малых деформациях возникает необходимость применения более сложных нелинейных моделей для точного описания реального поведения грунта под нагрузками. Это особенно важно при проектировании тяжелонагруженных фундаментов, где точность моделирования напрямую влияет на безопасность и эффективность проектных решений.

Одной из основных трудностей при моделировании поведения фундаментов является установление корректных граничных условий. Несмотря на значительное внимание данной теме в научной литературе [49, 41], нормативные документы не содержат четких рекомендаций по их назначению. Ошибки в определении граничных условий или выборе модели грунта могут привести к серьезным последствиям, включая аварийные ситуации на этапе строительства.

В настоящей диссертации выбор моделей для описания работы грунта под нагрузками и его свойств обусловлен региональными особенностями распространения пород в Краснодарском крае. Геологическое строение территории

характеризуется разнообразием горных пород осадочного, магматического и метаморфического происхождения, охватывающих возрастной диапазон от докембрия до четвертичного периода. Особое значение для строительства имеют четвертичные отложения, которые широко распространены в освоенной части региона. Распределение этих отложений показано на рисунке 2.6.

Четвертичные отложения в Кубанской депрессии занимают значительную часть равнинной территории Предкавказья, их мощность достигает 200-300 м. В континентальных образованиях преобладают возвышенности с постепенным понижением к северу, а также молодые террасы, часто перекрывающие более древние. Эти отложения представлены песчано-глинистыми комплексами, переслаивающимися делювиальными суглинками мощностью до 50-80 м.

Суглинки характеризуются комплексом механических свойств, которые определяются их составом, влажностью и плотностью. Расчетное сопротивление (R_0) для сухих или слегка увлажненных суглинков составляет 150-250 кПа и тесно связано с минералогическим составом и влажностью. Модуль деформации (E_0), зависящий от плотности, влажности и степени уплотнения, варьируется в пределах 5-20 МПа. Сцепление (C) для суглинков обычно находится в диапазоне 10-30 кПа, а угол внутреннего трения (φ) составляет 15°-25° и определяется содержанием глинистых частиц и состоянием грунта. Эти диапазоны характеристик были установлены на основании приложений А и Б СП 22.13330 «Основания зданий и сооружений», а также имеющихся данных инженерно-геологических изысканий на кафедре «ОиФ» КубГАУ [13-24, 36, 53].

В рамках диссертационных исследований было решено использовать модель упрочняющегося грунта при малых деформациях (*Hardening Soil Small-strain*) для описания поведения грунта под нагрузкой (см. табл. 2.1), т.к. применение более сложных моделей взаимодействия грунта со свайным основанием, ПРС и надземным строением позволяет более детально оценить работу системы, приближая ее работу к реальным условиям, что является целью данной работы.

Таблица 2.1 – Основные характеристики грунтов и дополнительные параметры для моделей *HS* и *HSS*

Грунт	Основные характеристики грунтов	Дополнительные параметры для модели *HS*	Дополнительные параметры для модели *HSS*
Суглинок $e = 0.75$; $I_L = 0.375$	$\gamma = 18$ кН/м^3; $E_0 = 14$ МПа; $\nu = 0{,}37$; $C = 23$ кПа; $\varphi = 21°$	$E_{50}^{ref} = 14$ МПа; $E_{oed}^{ref} = 14$ МПа; $E_{ur}^{ref} = 42$ МПа; $m = 0{,}8$; $OCR = 1{,}2$	$G_0^{ref} = 100$ МПа; $\gamma_{0.722} = 1 \cdot 10^{-4}$

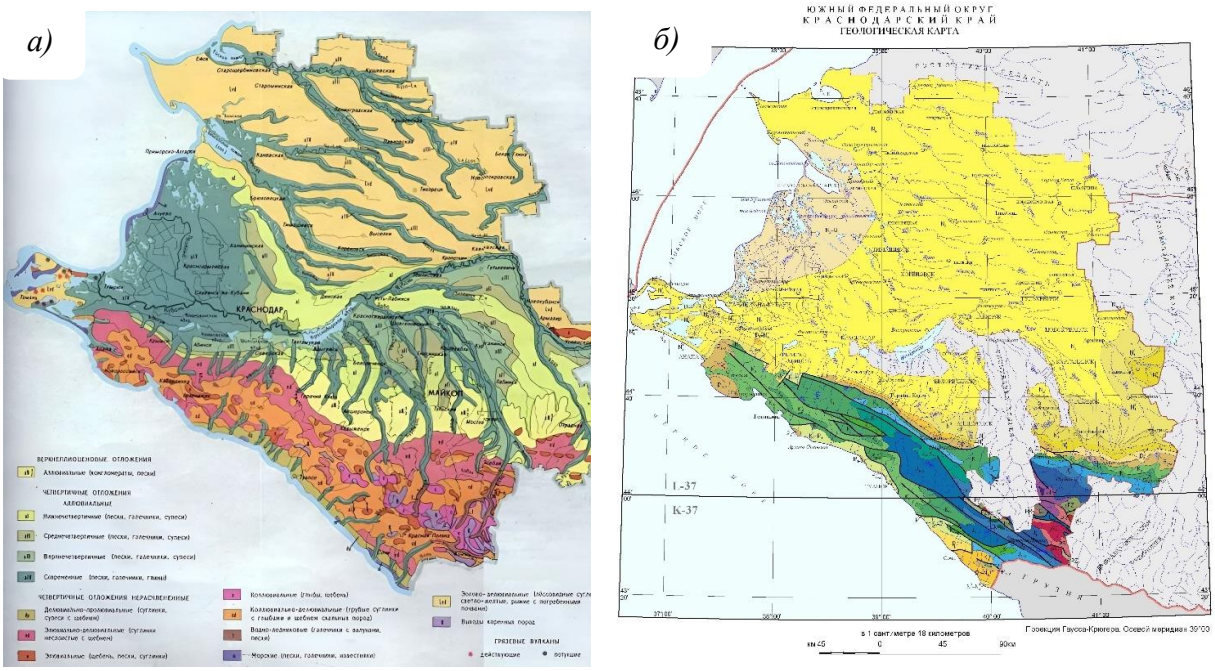


Рисунок 2.6 – Карта четвертичных отложений (*а*) [28], геологическая карта (*б*) Краснодарского края (обозначения грунтов условно не показаны)

2.2. Оценка работы свай в составе свайных фундаментов с ПРС

Для корректного исследования работы свайного фундамента с ПРС необходимо этот процесс начать с рассмотрения элементарной ячейки, моделирующей процесс взаимодействия сваи с окружающим грунтом и вышележащим промежуточным распределительным слоем (ПРС). Элементарная ячейка рассматривается как некоторое цилиндрическое тело, включающее сваю, окружающий её грунт и расположенный над ними слой ПРС. Такая постановка

задачи позволяет оценить механизм взаимодействия элементов системы и установить границы области влияния одной сваи на соседние.

Для определения внешних границ элементарной ячейки использованы рекомендации [98], которые предлагают методику расчета радиуса влияния сваи на основе экспериментальных данных и аналитических зависимостей. Это позволяет обосновать размеры ячейки и обеспечить корректность дальнейших численных расчетов:

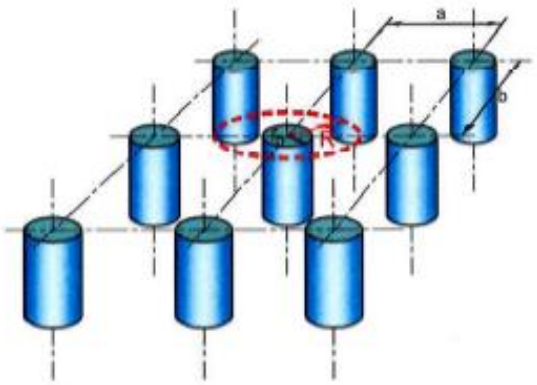


Рисунок 2.7 – К определению радиуса влияния одиночной сваи в составе группы

Откуда радиус R будет определяться из выражения:

$$R = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} \tag{2.7}$$

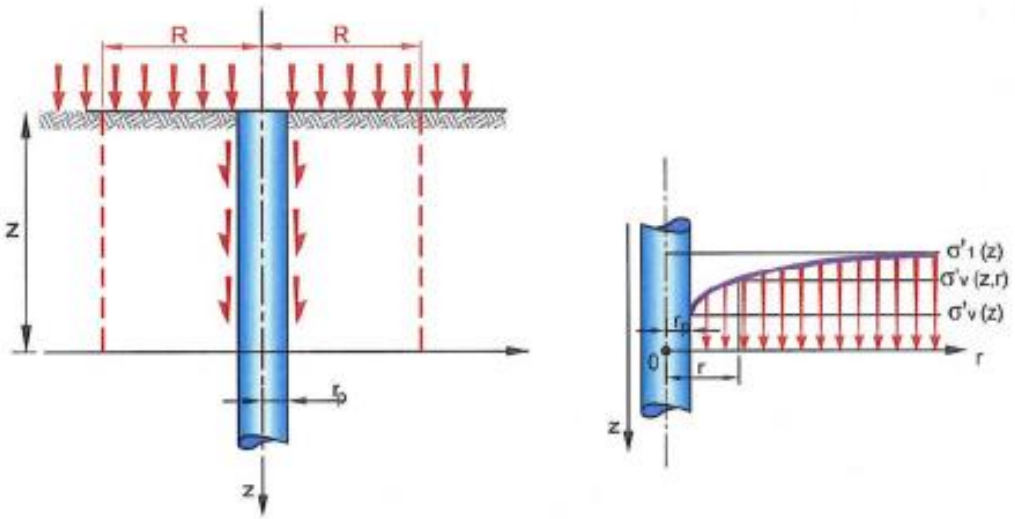
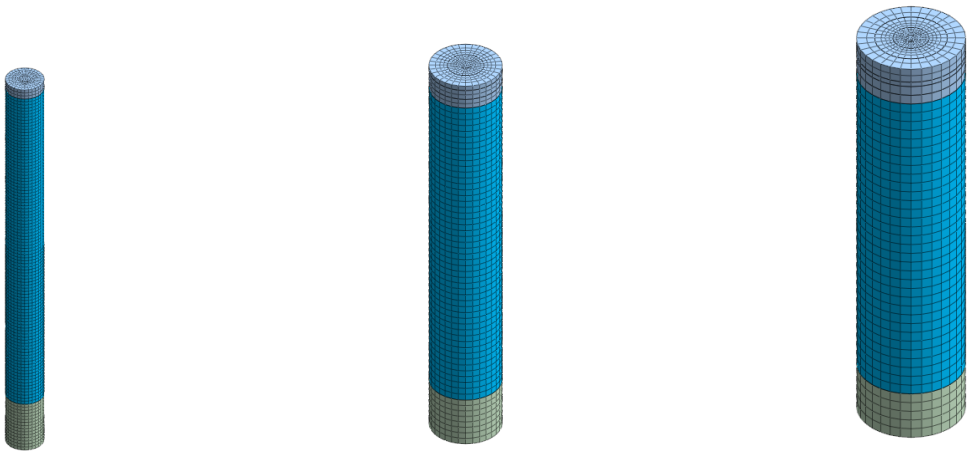


Рисунок 2.8 – Схема ячейки для анализа взаимодействия сваи с основанием

Для оценки этого взаимодействия проведен ряд конечно-элементных экспериментов в однородном грунте с постоянным диаметром и длиной свай, но с переменным радиусом влияния, зависящим от шага свай в свайном поле.

а) *б)* *в)*



$R = 510$мм $R = 1020$мм $R = 1530$мм

Рисунок 2.9 – Расчетные схемы ячеек грунтового основания для свайного поля при различных межсвайных расстояниях: *а) 3d; б) 6d; в) 9d*

Параметры грунта установлены в соответствии с данными таблицы 2.1 данной работы. Сваи выполнены из железобетона и имеют диаметр d = 300 мм, а их длина составляет L= 10 м. Шаг свай для определения габаритов ячейки варьировался от *3d* до *9d*. Исходя из этого шага принималась различная высота промежуточного распределительного слоя $h_{gc} = 0{,}5(s-d)$; $1{,}0(s-d)$; $2{,}0\ (s-d)$, аналогично [24]. Нагрузка по верху промежуточного распределительного слоя принята 500 кПа с шагом 100 кПа.

В данном исследовании, используя модель *HSS*, глубина ограничена $5d$ (рис. 2.9), что удовлетворяет минимальным требованиям для достоверных расчетов.

Далее в сечении показана расчетная ячейка с учетом изменения высоты промежуточного слоя в зависимости от шага расстановки свай.

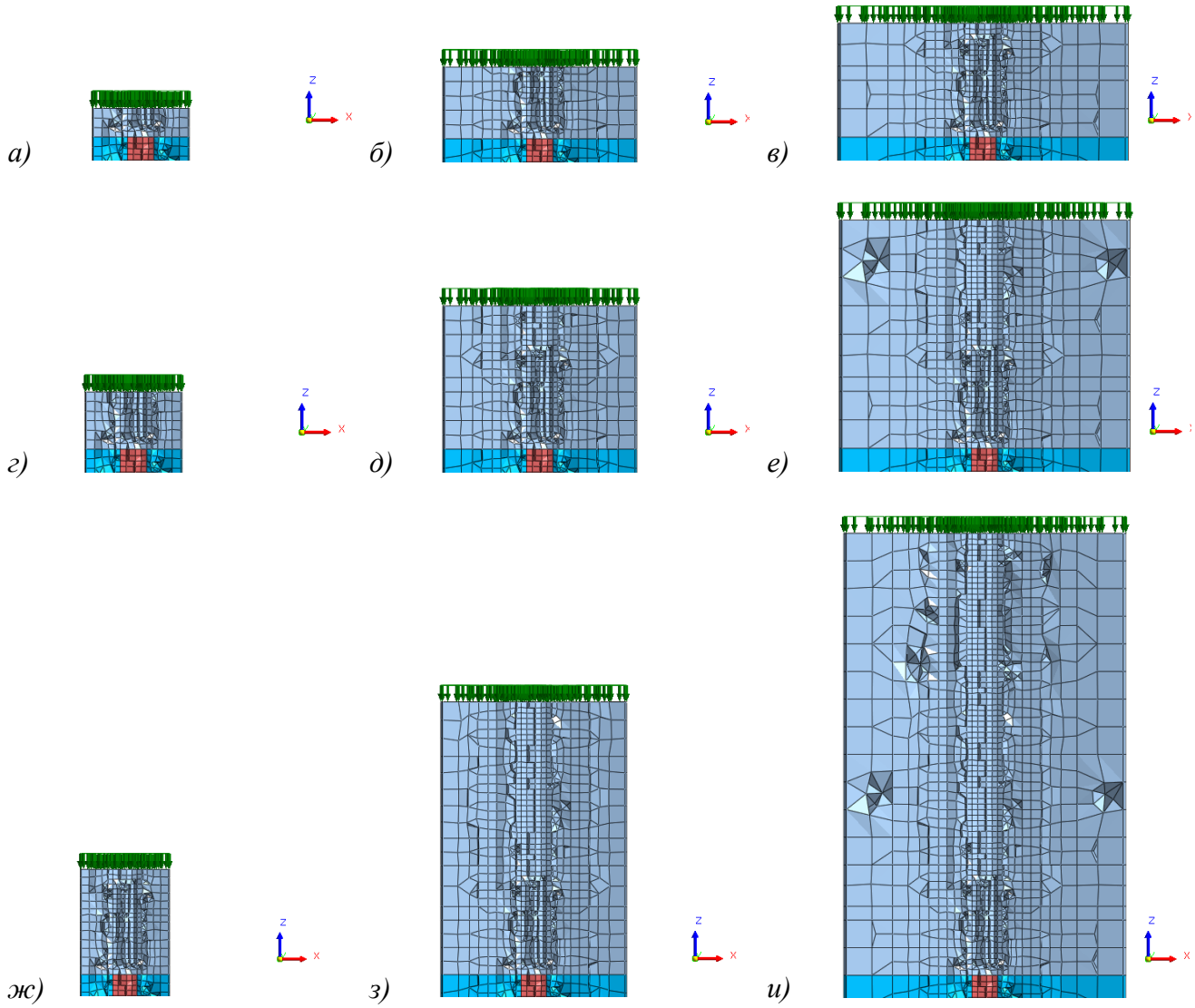


Рисунок 2.10 – Конечно-элементные ячейки грунтового основания с показом высоты промежуточного распределительного слоя в расчетах при шаге свай в поле *3d; 6d; 9d*: *а,б,в – 0,5 (s-d); г,д,е – 1,0 (s-d); ж,з,и – 2,0 (s-d)*

Таким образом, дискретность рассматриваемой задачи в условиях принятого шага расстановки свай в поле позволяет оценить НДС в пределах рассматриваемой ячейки и выявить закономерности его изменения без учета жесткости надземного строения.

Далее показано НДС системы на примере межосевого расстояния $s = 3d$ и $h_{gc} = 0,5\ (s-d)$.

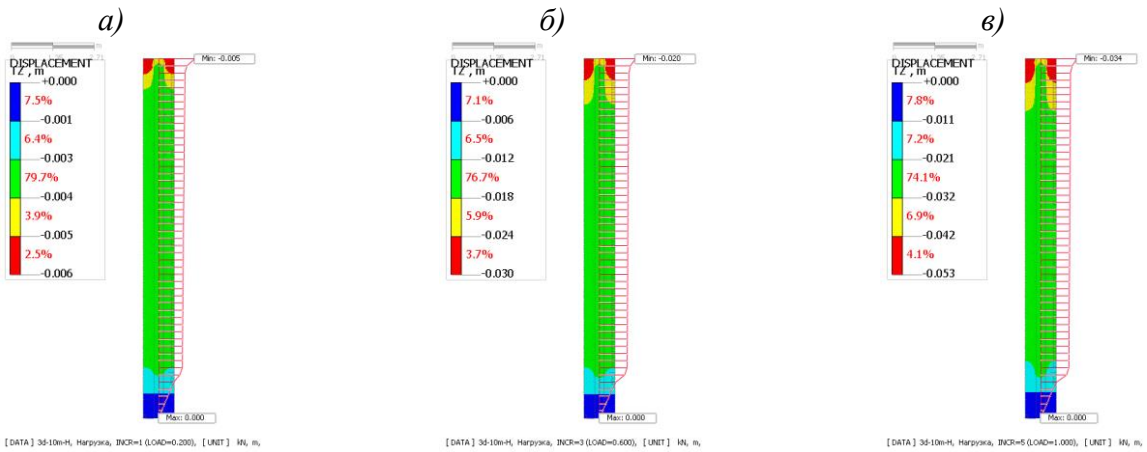


Рисунок 2.11 – Вертикальные перемещения в ячейке от нагрузки:

а) 100 кПа; *б)* 300 кПа; *в)* 500 кПа

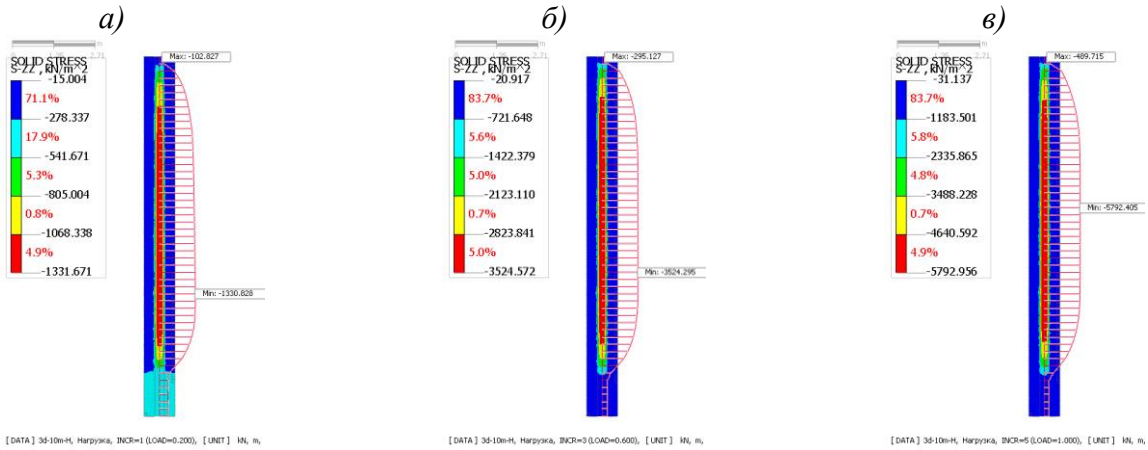


Рисунок 2.12 – Вертикальные напряжения в ячейке от нагрузки:

а) 100 кПа; *б)* 300 кПа; *в)* 500 кПа

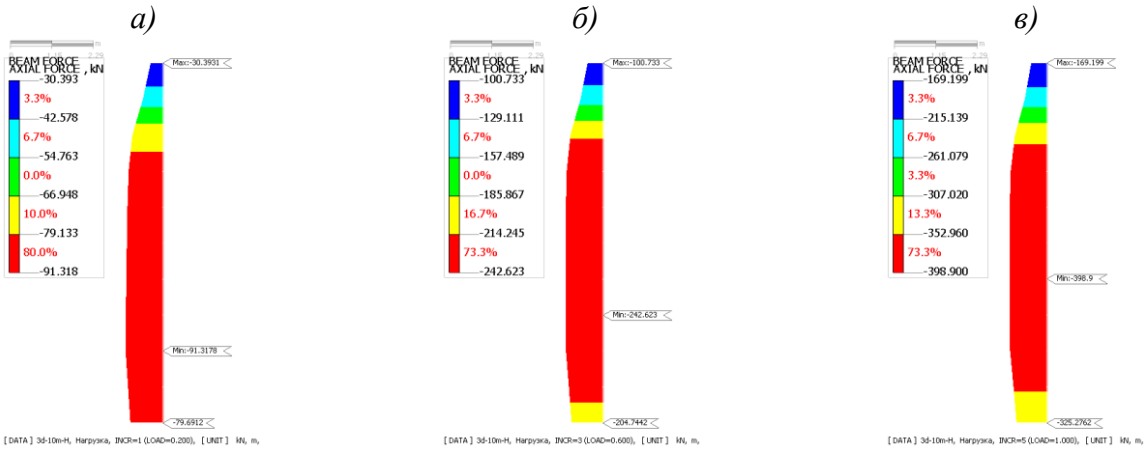


Рисунок 2.13 – Вертикальные усилия в свае:

а) 100 кПа; *б)* 300 кПа; *в)* 500 кПа

Исходя из этих данных определена удельная величина нагрузки, воспринимаемая сваей и грунтом (табл. 2.2), путем отнесения полной нагрузки,

приложенной к ячейке N_{total}.к усилию в свае в различных уровнях: уровень головы сваи (N_{top}); уровень максимальных сжимающих усилий (N_{max}); уровень острия сваи (N_{bottom}).

Таблица 2.2 – Данные об усилиях, действующих в различных уровнях по высоте сваи. Доля нагрузки, воспринимаемая сваей на различных уровнях по ее высоте

Нагрузка на ячейку	100 кПа	200 кПа	300 кПа	400 кПа	500 кПа
Усилие в голове сваи N_{top}, кН	$\frac{30,4}{0,33}$	$\frac{66,0}{0,38}$	$\frac{100,7}{0,39}$	$\frac{135,2}{0,40}$	$\frac{169,2}{0,40}$
Максимальное усилие в свае N_{max}, кН	$\frac{91,3}{1,0}$	$\frac{166,1}{0,96}$	$\frac{242,6}{0,95}$	$\frac{320,4}{0,95}$	$\frac{398,9}{0,95}$
Усилие у острия сваи N_{bottom}, кН	$\frac{79,7}{0,87}$	$\frac{141,6}{0,82}$	$\frac{204,7}{0,80}$	$\frac{266,0}{0,79}$	$\frac{325,3}{0,78}$

В числителе указано значение вертикального усилия, возникающего в свае на рассматриваемом уровне. В знаменателе приведена доля нагрузки, воспринимаемая сваей, в ячейке в данном сечении.

Установлено, что при изменении прикладываемого давления нагрузка, воспринимаемая сваей, изменяется на 4,5-22%. В диапазоне 100-500 кПа зависимость почти линейная (табл. 2.2). Следовательно, в случае шага свай *3d*, действующая нагрузка на ячейку будет практически полностью восприниматься сваей. Данный факт хорошо согласуется данными [24] и позволяет рассматривать такие свайные поля как сплошной грунто-свайный массив. Проведя аналогичные эксперименты в ячейках с шагом расстановки *6d* и *9d,* получена таблица 2.3, позволяющая оценить влияние шага расстановки свай в поле от высоты промежуточного распределительного слоя над ними.

Таблица 2.3 – Доля нагрузки, воспринимаемая сваей в ячейке, с учетом различной высоты ПРС, д.е

Нагрузка на ячейку	h_{gc}	100 кПа			200 кПа			300 кПа			400 кПа			500 кПа		
		3d	*6d*	*9d*	*3d*	*6d*	*9d*	*3d*	*6d*	*9d*	*3d*	*6d*	*9d*	*3d*	*6d*	*9d*
Усилие в голове сваи N_{top}, кН	*0,5 (s-d)*	0.33	0.25	0.18	0.38	0.28	0.19	0.39	0.28	0.19	0.40	0.28	0.18	0.40	0.28	0.17
	1,0 (s-d)	0.44	0.30	0.21	0.50	0.32	0.21	0.52	0.33	0.20	0.53	0.33	0.19	0.54	0.32	0.18
	2,0 (s-d)	0.46	0.33	0.21	0.51	0.34	0.20	0.54	0.34	0.19	0.55	0.34	0.18	0.55	0.33	0.17
Максимальное усилие в свае N_{max}, кН	*0,5 (s-d)*	1.00	0.75	0.54	0.96	0.79	0.49	0.95	0.78	0.44	0.95	0.75	0.42	0.95	0.72	0.41
	1,0 (s-d)	0.99	0.74	0.52	0.96	0.77	0.46	0.95	0.76	0.42	0.95	0.73	0.41	0.95	0.73	0.40
	2,0 (s-d)	0.98	0.77	0.49	0.95	0.77	0.44	0.95	0.74	0.41	0.95	0.71	0.38	0.95	0.69	0.36
Усилие у острия сваи N_{bottom}, кН	*0,5 (s-d)*	0.87	0.39	0.24	0.82	0.39	0.22	0.80	0.38	0.20	0.79	0.36	0.19	0.78	0.35	0.18
	1,0 (s-d)	0.87	0.39	0.23	0.83	0.38	0.20	0.81	0.36	0.18	0.79	0.34	0.17	0.78	0.34	0.17
	2,0 (s-d)	0.85	0.39	0.22	0.81	0.36	0.20	0.79	0.34	0.18	0.78	0.32	0.17	0.77	0.32	0.16

Расчёты показывают, что свая работает в грунте схожим образом на всех этапах нагружения (100-500 кПа): на начальных этапах на границах оголовка формируются области упругих и пластических деформаций, а в зоне острия – области пластических деформации, которые с последующим увеличением нагрузки распространяются на верхнюю и нижнюю части ствола сваи.

Также установлено, что максимальное усилие в свае развивается в средней части сечения, в отличие от работы свай в составе свайного (свайно-плитного фундамента), где максимальное усилие сосредоточено в уровне головы сваи. Этот факт согласуется с натурными данными из работы Нуждина Л.В. [30, 31, 32].

Увеличение приведенного радиуса ячейки в экспериментах до *6-9d* не привело к значимому изменению характера распределения напряжений и деформаций по отношению к ячейке с шагом 3*d*.

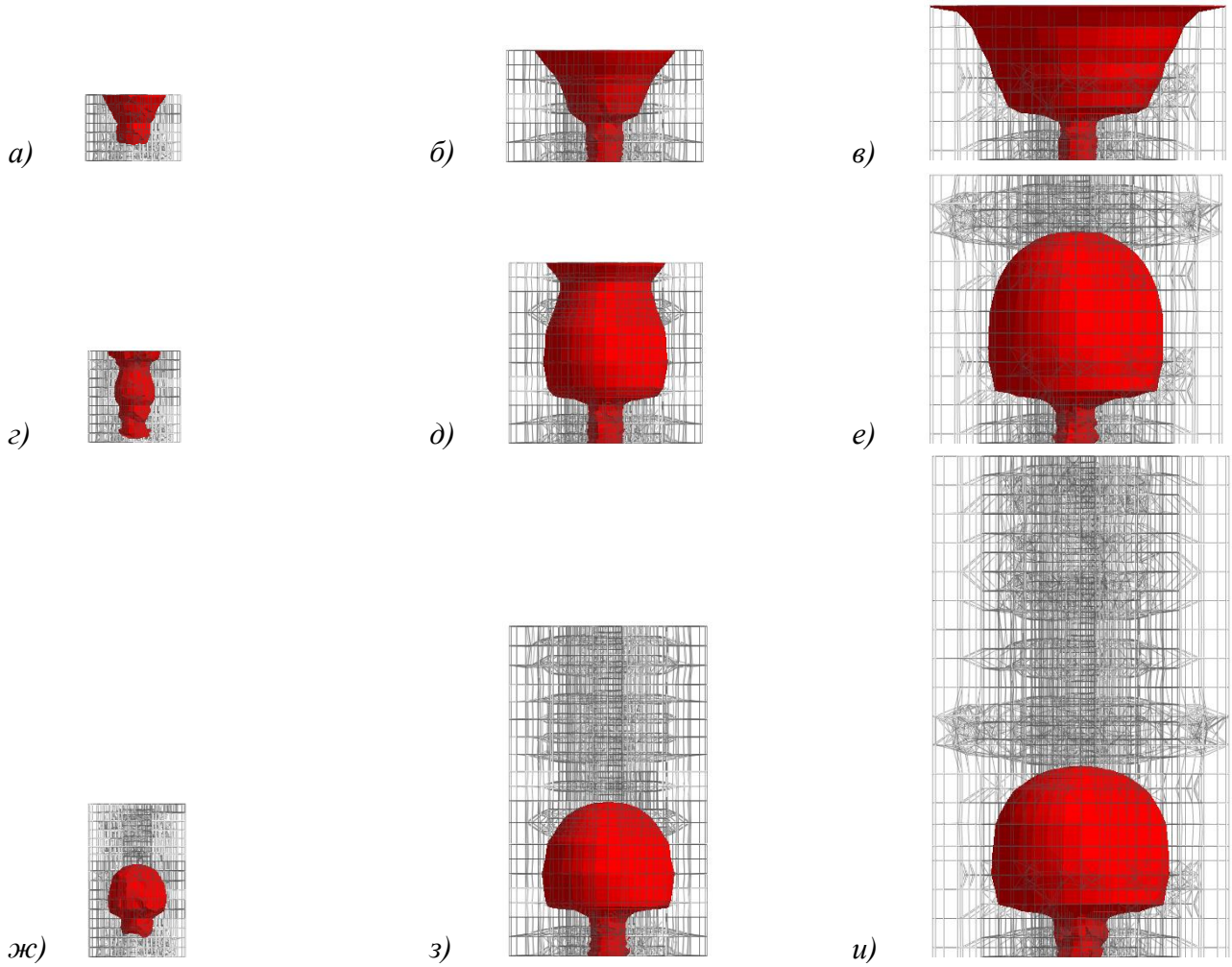


Рисунок 2.14 – Изображение поверхностей предельного равновесия, формирующихся над головами свай при устройстве ПРС от собственного веса

Исследование механизмов работы свай показало, что изменение высоты промежуточного распределительного слоя (ПРС) несущественно влияет на усилие, воспринимаемое сваей.

Для оценки взаимодействия сваи и грунта использовалась теория Кулона-Мора в *ПК MIDAS* через инструмент «SAFETY FACTOR» (SF). При SF < 1,0 грунт разрушается, при 1,0 ≤ SF ≤ 1,1 – в предельном состоянии, а при SF > 1,1 – не

достигает предела прочности. Это позволило оценить области предельного состояния на контакте «ПРС-голова сваи-грунт».

При h_{gc} = *0,5 (s-d)* в ПРС формируются уплотненные конусы продавливания с углами 60-65° (соответствует $\beta_{gc} = \pi/4 - \phi_{gc}/2$ рис.2.14 *а-в*), что подтверждается теоретическими данными [98]. При h_{gc} = *1,0 (s-d)* области предельного состояния принимают форму столбов (рис.2.14 *г,д*). При шаге свай 9*d* столб имеет сферическую верхнюю часть (рис.2.14 *е*), что указывает на уравновешивание реакции сваи.

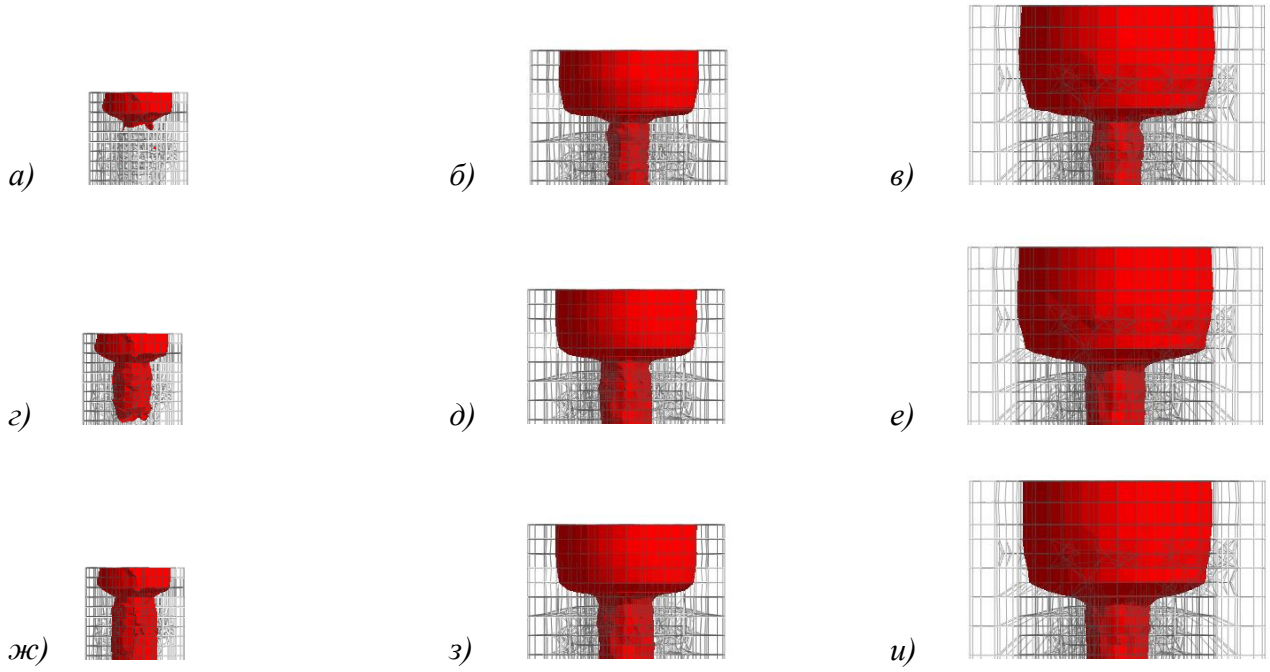


Рисунок 2.15 – Изображение поверхностей предельного равновесия ячеек с шагом *3d, 6d, 9d* при h_{gc} = *0,5 (s-d)*, формирующихся над головами свай от приложения нагрузок: *а…в – 100 кПа; г…е – 300 кПа; ж…и – 500 кПа*

Увеличение h_{gc} = *2,0 (s-d)* приводит к формированию столбов со сферическими верхними областями для всех шагов расстановки свай. Дальнейшее изучение требует анализа влияния внешних нагрузок на ячейку и соответствующие изменения в областях предельного равновесия.

На рисунке 2.15 показано влияние нагрузки 100-500 кПа на форму поверхности предельного состояния, сформировавшуюся в промежуточном распределительном слое при h_{gc} = *0,5 (s-d)*. При такой толщине ПРС форма изменяется с конусообразной на столбчатую, визуально напоминающую оголовок

сваи. Исходя из полученных распределений, можно сделать вывод о том, что изменение нагрузки практически не влияет на габариты формы области предельных состояний. Основным фактором, влияющим на изменение размеров области, является шаг свай в поле.

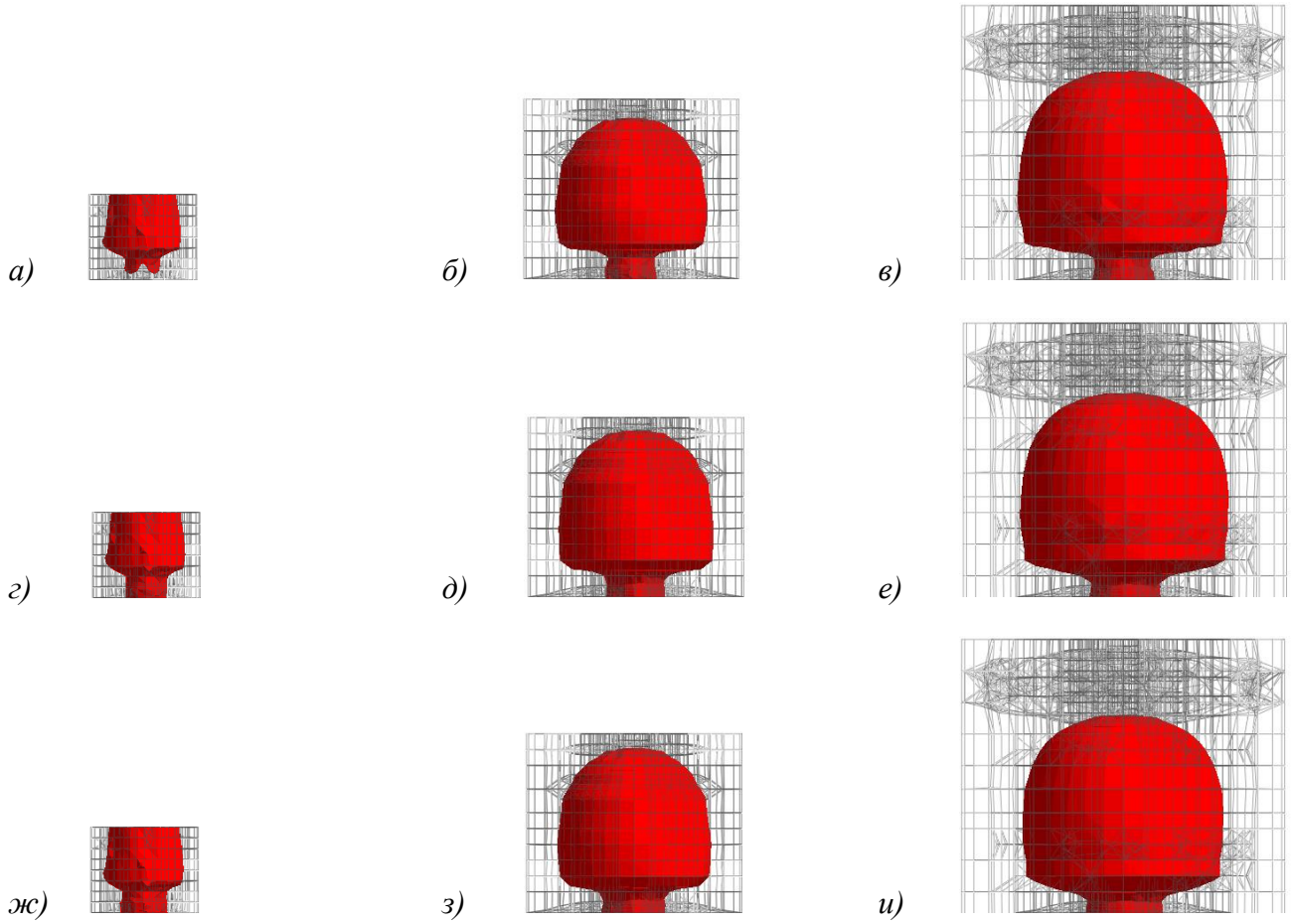


Рисунок 2.16 – Изображение поверхностей предельного равновесия ячеек с шагом *3d, 6d, 9d* при h_{gc} *= 1,0 (s-d)*, формирующихся над головами свай от приложения нагрузок: *а…в – 100 кПа; г…е – 300 кПа; ж…и – 500 кПа*

Рассматривая результаты определения областей предельного равновесия под нагрузкой для h_{gc} *= 1,0 (s-d)* (см. рис.2.16) установлено, что для шага *3d* не происходит смыкания области предельного состояния в уровне верха ПРС в полусферу, для других шагов наблюдается образование сферической поверхности в верхней части «несущего столба». При h_{gc} *= 1,0 (s-d)* на рис. 2.17, можно наблюдать сформированные «несущие столбы» со сферической поверхностью верхней грани, при этом габариты этих областей остались неизменными, что показывает отсутствие влияния дальнейшего

увеличения высоты ПРС на получаемый результат. В конечном итоге составлена таблица (табл. 2.4) результатов определения минимальной высоты ПРС для рассматриваемого диапазона нагрузок.

Таблица 2.4 – Вычисленные минимальные величины ПРС для различных нагрузок и межосевых расстояний свай

Нагрузка	Минимальная величина $h_{gc}{}^{M}$, м при шаге:		
	3d	6d	9d
100 кПа	0,673	1,286	1,660
200 кПа	0,716	1,323	1,672
300 кПа	0,730	1,340	1,663
400 кПа	0,736	1,343	1,648
500 кПа	0,739	1,334	1,630

Значения минимальной толщины промежуточного распределительного слоя (ПРС) в таблице 2.4 описывают зависимость от нагрузки и шага свай. Однако оценка эффективности ПРС требует учета жесткости надземных конструкций и распределительной способности самого слоя. По мнению автора, приведенные значения толщины слоя можно считать максимальными, так как учет влияния надземного строения снизит необходимую высоту ПРС.

Для удобства анализа данные таблицы 2.4 пересчитаны относительно межсвайного расстояния $X = \frac{h_{gc}^{M}}{(s-d)}$ и представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Пересчитанная величина минимальной высоты ПРС, относительно чистого межсвайного расстояния

Нагрузка	Минимальная величина $X = \frac{h_{gc}^{M}}{(s-d)}$ при шаге:		
	3d	6d	9d
100 кПа	1.122	0.857	0.692
200 кПа	1.193	0.882	0.697
300 кПа	1.217	0.893	0.693
400 кПа	1.227	0.895	0.687
500 кПа	1.232	0.889	0.679

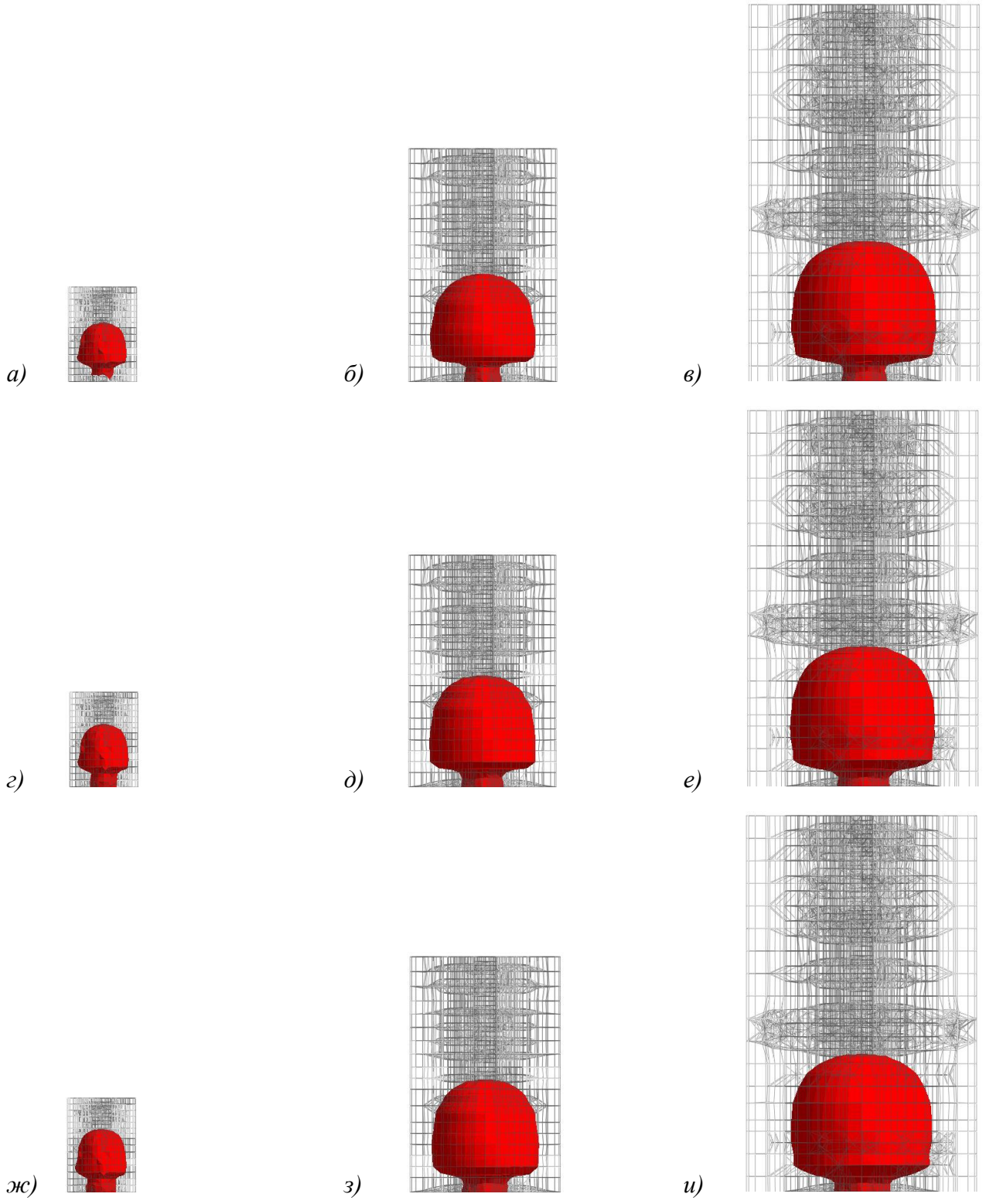


Рисунок 2.17 – Изображение поверхностей предельного равновесия ячеек с шагом *3d, 6d, 9d* при h_{gc} *= 2,0 (s-d)*, формирующихся над головами свай от приложения нагрузок:
а…в – 100 кПа; г…е – 300 кПа; ж…и – 500 кПа

Анализ работы элементарной ячейки является первым этапом исследования, направленного на анализ механизма взаимодействия сваи с грунтом и

промежуточным слоем. На этом этапе рассмотрены основные параметры системы, такие как высота ПРС, шаг свай в поле и влияние нагрузки на работу сваи. Полученные результаты служат основой для перехода к моделированию большеразмерных свайных полей, что позволит оценить их взаимодействие при различных схемах нагружения.

2.3. Влияние шага свай и толщины ПРС на неравномерность осадок над сваями и в пролете между ними

С целью изучения совместной работы свай в составе группы, а также оценки влияния характеристик ПРС на поведение фундаментной плиты под нагрузкой, в расчетной модели была рассмотрен зона в центральной части фундамента. В выделенной зоне размещаются сваи с различным шагом для разных расчетных случаев, что позволило детально проанализировать осадки плиты и степень их неравномерности при различных схемах расстановки свай.

Рассматриваемая ячейка свайного фундамента с ПРС принята размерами 2,7х2,7м в поперечном сечении, при этом сваи в ней располагались с шагом *3d, 6d, 9d* по квадратной сетке. Параметры грунта, свай и промежуточного распределительного слоя, включая его высоту, приняты аналогично предыдущим исследования в п. 2.2 настоящей диссертации.

Граничные условия на краях модели назначались таким образом, чтобы рассмотреть симметричное (зеркальное) расположение смежных свай в поле. Модель ячейки свайного фундамента с ПРС и изучаемыми точками представлена на рис.2.18. Модели свайных фундаментов с ПРС с различным шагом свай показаны ниже на примере вертикальных деформаций ячейки с различным шагом свай и высотой ПРС.

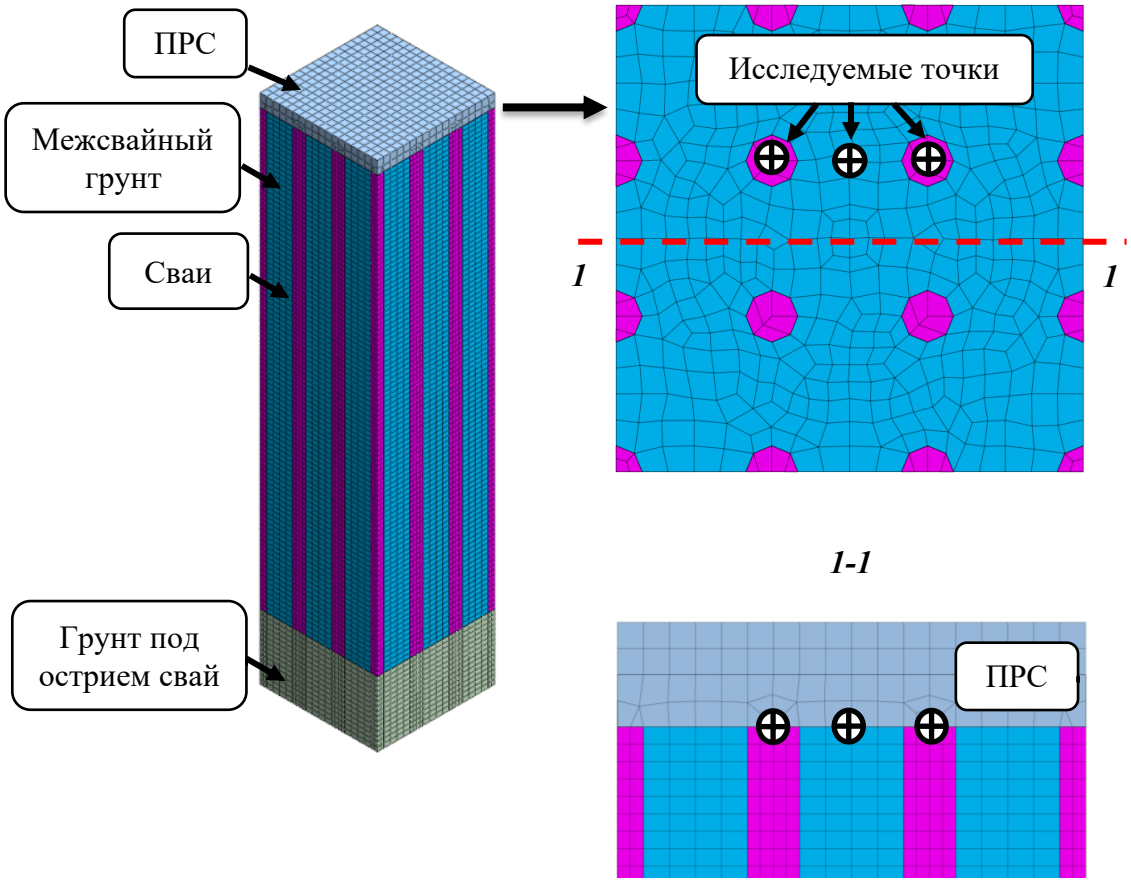


Рисунок 2.18 – Расчетная модель ячейки свайного фундамента с ПРС с показом плана и исследуемых точек

Для исследования поведения ПРС под воздействием нагрузок в диапазоне 100–500 кПа и определения его эффективной толщины, обеспечивающей равномерность осадок фундаментной плиты, были установлены графические зависимости перемещений точек в уровне оголовков свай и в промежутках между ними (см. рис. 2.22, 2.23, 2.24). Представленные диаграммы наглядно демонстрируют характер совместной работы свайного поля и ПРС заданной высоты, расположенного под подошвой фундаментной плиты. В процессе анализа было разработано и изучено более 80 расчетных моделей ячеек с различными параметрами: шагом свай, толщиной ПРС, величиной прикладываемого давления, а также характеристиками грунта, такими как удельное сцепление, угол внутреннего трения и модуль деформации. Далее показан вариант с шагом расстановки свай *3d* и высотой ПРС 300, 600, 1200 мм.

а) *б)* *в)*

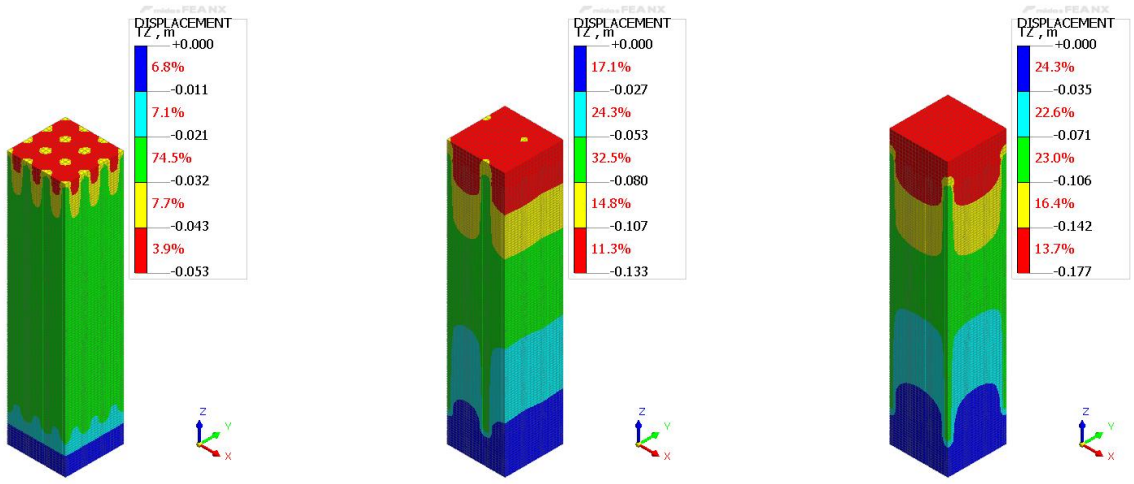


Рисунок 2.19 – Ячейка свайного поля с различным шагом свай при высоте ПРС ***h_{gc}=0,5(s-d)*** и ее вертикальные деформации при *P=500 кПа*: *а) 3d; б) 6d; в) 9d*

а) *б)* *в)*

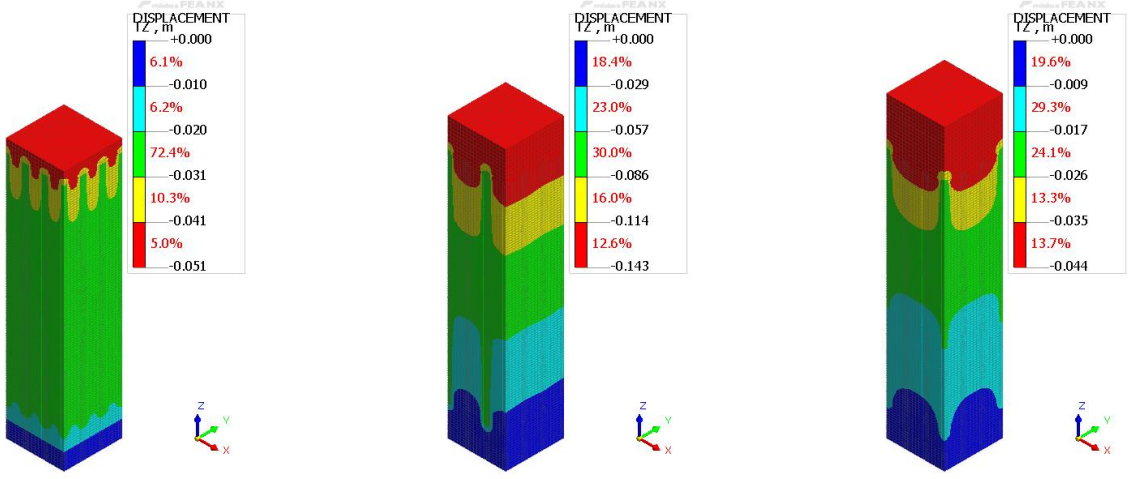


Рисунок 2.20 – Ячейка свайного поля с различным шагом свай при высоте ПРС ***h_{gc}=1,0(s-d)*** и ее вертикальные деформации *P=500 кПа*: *а) 3d; б) 6d; в) 9d*

а) *б)* *в)*

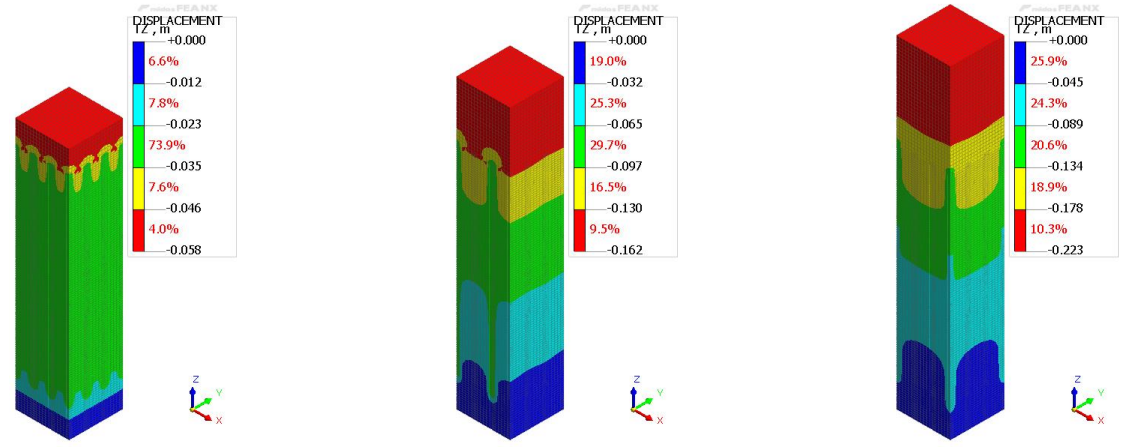


Рисунок 2.21 – Ячейка свайного поля с различным шагом свай при высоте ПРС ***h_{gc}=2,0(s-d)*** и ее вертикальные деформации *P=500 кПа*: *а) 3d; б) 6d; в) 9d*

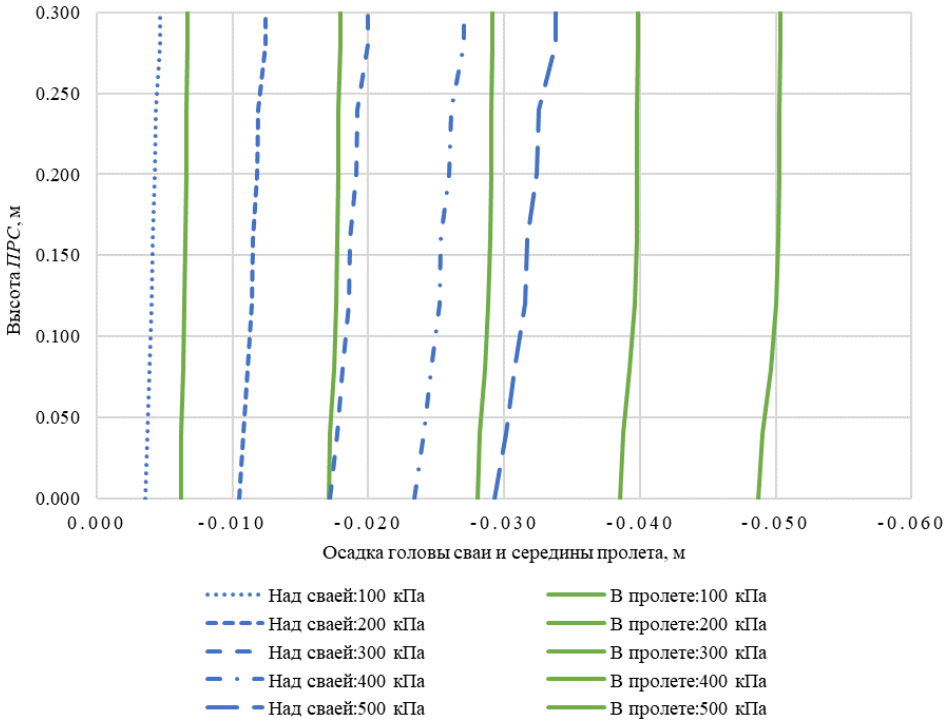


Рисунок 2.22 – Диаграмма деформаций в точках над головой сваи (синий) и в пролете между двумя сваями (зеленый) при h_{gc} = 300 мм

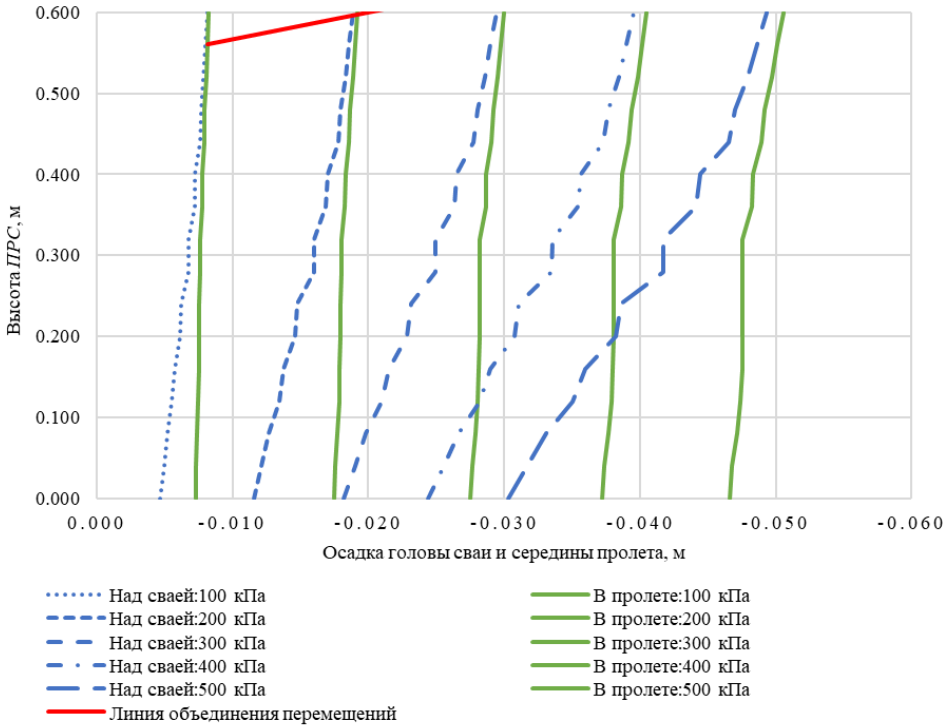


Рисунок 2.23 – Диаграмма деформаций в точках над головой сваи (синий) и в пролете между двумя сваями (зеленый) при h_{gc} = 600 мм

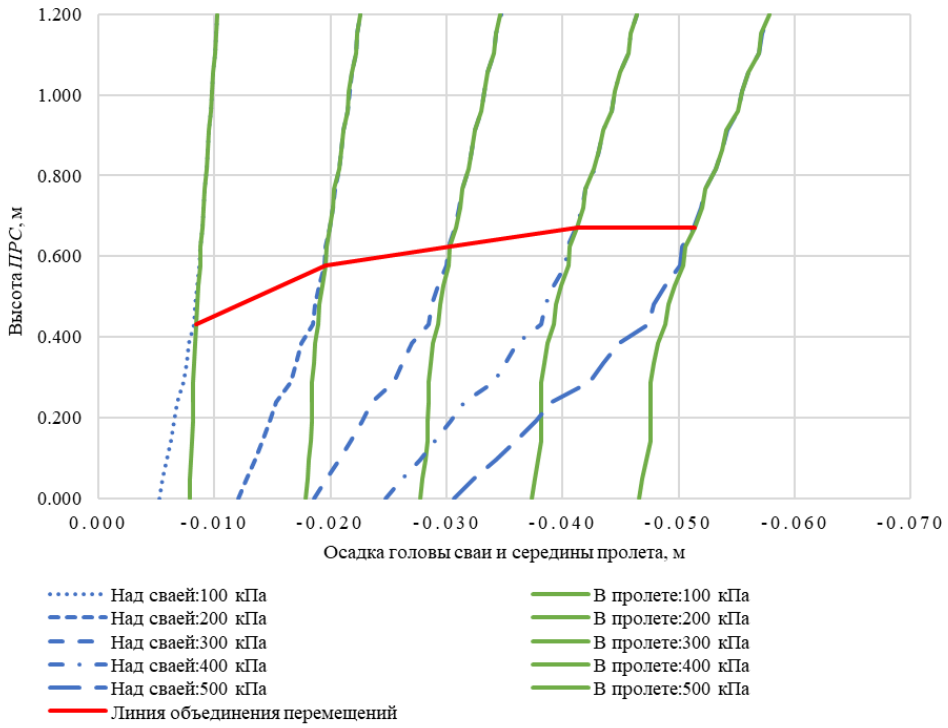


Рисунок 2.24 – Диаграмма деформаций в точках над головой сваи (синий) и в пролете между двумя сваями (зеленый) при h_{gc} = 1200 мм

Таблица 2.6 – Вычисленные минимальные высоты h_{gc}^{M} промежуточного распределительного слоя для различных нагрузок и межосевых расстояний свай для объединения перемещений в уровне подошвы фундаментной плиты в зависимости от высоты ПРС

Высота ПРС в расчетной схеме, h_{gc}	Нагрузка	Минимальная величина h_{gc}^{M}, м при шаге:		
		3d	*6d*	*9d*
0,5(s-d)	100 кПа	нет объединения	нет объединения	нет объединения
	200 кПа			
	300 кПа			
	400 кПа			
	500 кПа			
1,0(s-d)	100 кПа	0.53	1.05	1.49
	200 кПа	нет объединения	1.20	1.63
	300 кПа		1.25	1.63
	400 кПа		1.35	1.73
	500 кПа		1.35	1.78
2,0(s-d)	100 кПа	0.43	1.10	1.49
	200 кПа	0.58	1.20	1.63
	300 кПа	0.58	1.25	1.63
	400 кПа	0.62	1.34	1.68
	500 кПа	0.67	1.34	1.73

Как видно из результатов расчетов (рис.2.22, 2.23, 2.24) пространственной ячейки грунта со сваями с различной высотой и заданными свойствами ПРС, есть некоторая область в пределах величины равной *0,0 до 1,15(s-d)* расстояния в свету между сваями, где деформации рассматриваемых точек имеют различную величину и характер распределения, однако начиная с высоты *0,9…1,15(s-d)* в зависимости от давления по подошве фундамента, эти точки начинают деформироваться совместно. Эта граница четко проявляется на диаграмме при высоте ПРС 1200 мм (рис. 2.24). Расчетные данные представлены в табличном виде (табл. 2.6).

Таким образом, можно сделать вывод, что объединение перемещений является важным параметром работы свайных фундаментов с ПРС и позволяет рекомендовать для различных шагов расстановки свай в поле определенную высоту ПРС. Данная величина согласуется с выводами, сделанными в п. 2.2 настоящей диссертации. Следовательно, объединение перемещений над головой сваи и в пролете между сваями можно связать с развитием областей предельного равновесия в материале ПРС.

Далее рассмотрено влияние прочностных и деформационных характеристик промежуточного распределительного слоя на эффективность снижения деформаций свайного фундамента с промежуточным распределительным слоем.

За исследуемые параметры ПРС приняты:

- Удельное сцепление C, кПа: 0, 50, 100, 150;
- Угол внутреннего трения φ, градус: 30, 35, 40;
- Модуль деформации E, МПа: 30, 60, 90.

В нижеприведенных расчетах изменялись только рассматриваемые параметры, остальные характеристики разработанной ранее модели свайного фундамента с ПРС оставались неизменными.

В таблице 2.7 рассмотрено влияние удельного сцепления материала ПРС на конечные деформации системы (рис. 2.25) и минимальную величину h_{gc}^{M}.

Таблица 2.7 – Вычисленные минимальные высоты h_{gc}^{M} промежуточного распределительного слоя для различных нагрузок и межосевых расстояний свай для объединения перемещений в уровне подошвы фундаментной плиты в зависимости от удельного сцепления (C)

Сцепление материала ПРС	Нагрузка	Минимальная величина h_{gc}^{M}, м при шаге:		
		3d	*6d*	*9d*
C=0 кПа	100 кПа	0.432	1.104	1.488
	200 кПа	0.576	1.200	1.632
	300 кПа	0.624	1.248	1.632
	400 кПа	0.672	1.344	1.680
	500 кПа	0.672	1.344	1.728
C=50 кПа	100 кПа	0.432	1.104	1.584
	200 кПа	0.576	1.248	1.728
	300 кПа	0.624	1.344	1.776
	400 кПа	0.672	1.344	1.872
	500 кПа	0.672	1.344	1.872
C=100 кПа	100 кПа	0.432	1.104	1.632
	200 кПа	0.576	1.296	1.872
	300 кПа	0.672	1.344	1.968
	400 кПа	0.672	1.440	2.016
	500 кПа	0.720	1.440	2.064
C=150 кПа	100 кПа	0.432	1.104	1.728
	200 кПа	0.576	1.344	1.920
	300 кПа	0.672	1.392	2.016
	400 кПа	0.672	1.488	2.112
	500 кПа	0.720	1.488	2.160

Анализируя полученные результаты установлено, что изменение удельного сцепления приводит к незначительному изменению НДС модели (около 1,0-3,5%) и, можно заключить, не оказывают влияния на результат. Аналогичная ситуация происходит и с другими шагами расстановки свай, поэтому в диссертации эти результаты не приводятся.

Далее представлено влияние угла внутреннего трения ПРС на конечные деформации системы (рис. 2.26) и минимальную величину h_{gc}^{M}, которые были сведены в таблицу 2.8.

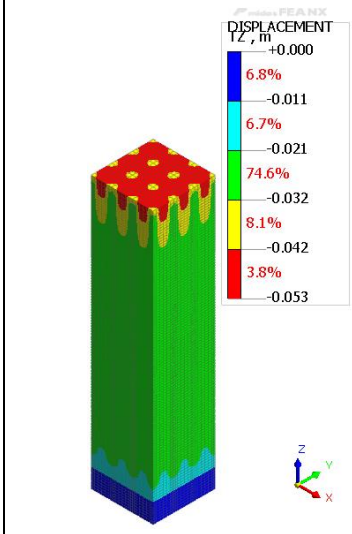
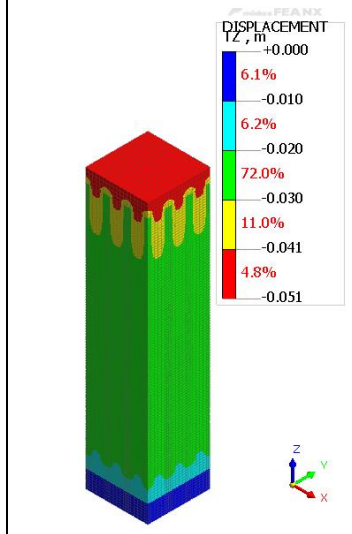
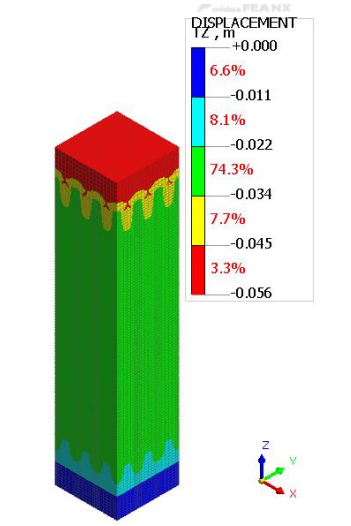
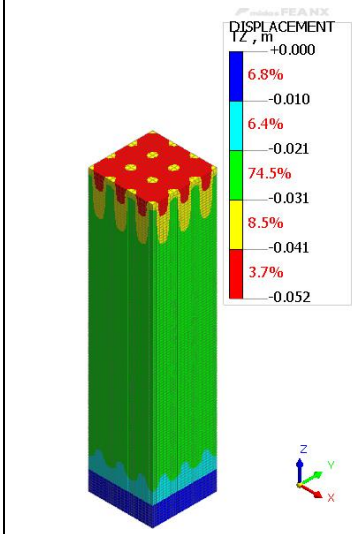
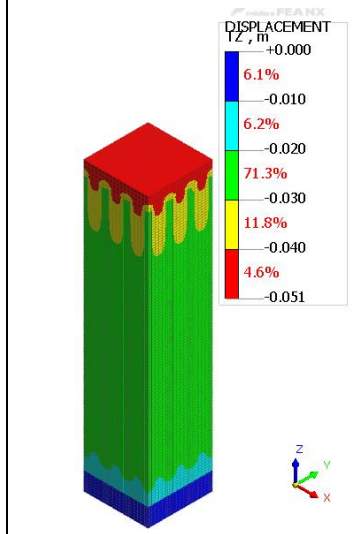
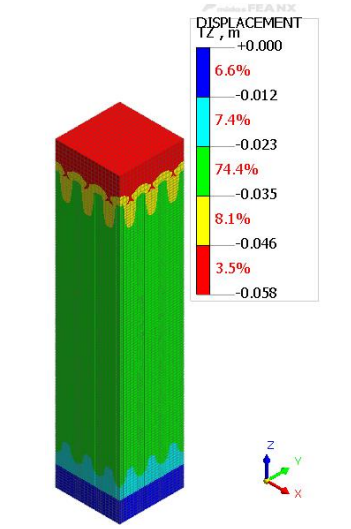
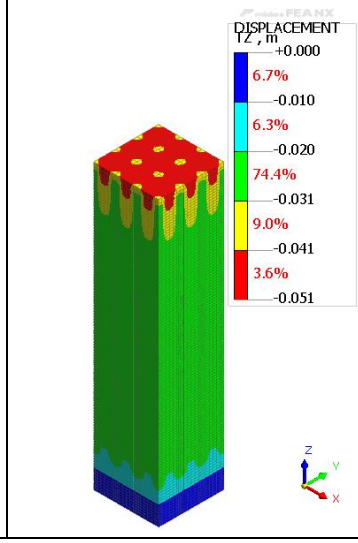
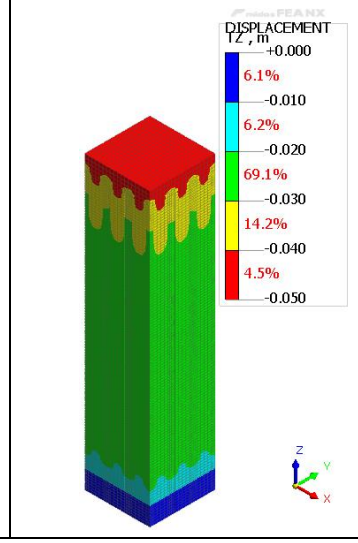
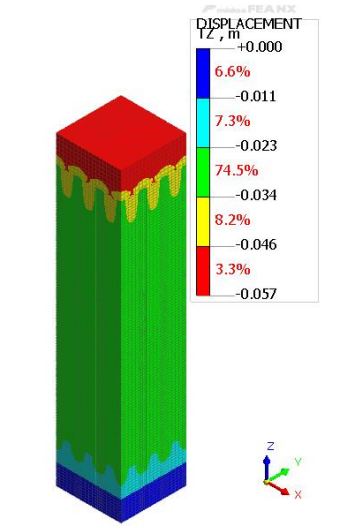
	а) h_{gc}=0,5(s-d)	*б)* h_{gc} =1,0(s-d)	*в)* h_{gc} =2,0(s-d)
C=50 кПа			
C=100 кПа			
C=150 кПа			

Рисунок 2.25 – Оценка влияния **удельного сцепления (*C*)** материала ПРС на конечные осадки и совместность перемещений точек низа фундаментной плиты при высоте ПРС:

а) h_{gc}=0,5(s-d); *б)* h_{gc}=1,0(s-d); *в)* h_{gc}=2,0(s-d)

Таблица 2.8 – Вычисленные минимальные высоты h_{gc}^{M} промежуточного распределительного слоя для различных нагрузок и межосевых расстояний свай для объединения перемещений в уровне подошвы фундаментной плиты в зависимости от угла внутреннего трения (φ)

Угол внутреннего трения ПРС	Нагрузка	Минимальная величина h_{gc}^{M}, м при шаге:		
		3d	*6d*	*9d*
φ=30 град.	100 кПа	0.432	1.104	1.488
	200 кПа	0.576	1.200	1.632
	300 кПа	0.624	1.248	1.632
	400 кПа	0.672	1.344	1.680
	500 кПа	0.672	1.344	1.728
φ=35 град.	100 кПа	0.432	1.104	1.584
	200 кПа	0.576	1.248	1.776
	300 кПа	0.672	1.344	1.920
	400 кПа	0.720	1.392	2.016
	500 кПа	0.720	1.440	2.064
φ=40 град.	100 кПа	0.432	1.104	1.632
	200 кПа	0.576	1.344	1.920
	300 кПа	0.672	1.440	2.064
	400 кПа	0.720	1.488	2.160
	500 кПа	0.720	1.536	2.256
φ=45 град.	100 кПа	0.432	1.152	1.728
	200 кПа	0.576	1.344	2.016
	300 кПа	0.672	1.488	2.160
	400 кПа	0.720	1.536	2.256
	500 кПа	0.720	1.584	2.304

Из полученных результатов видно, что изменение угла внутреннего трения материала ПРС не влияет на получаемый результат по деформациям (≈1,5-2,5%). Таким образом, влияние угла внутреннего трения на получаемый результат практически отсутствует. Аналогичная ситуации выявлена и с другими шагами расстановки свай. Далее проанализировано влияние модуля деформации ПРС на деформации системы «свайное основание-промежуточный распределительный слой-надземное строение» (рис. 2.27) и минимальную величину h_{gc}^{M}, которые были сведены в таблицу 2.9.

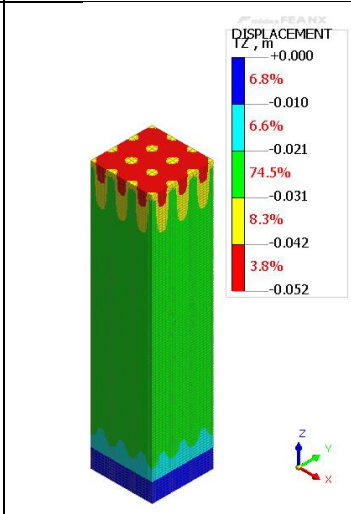
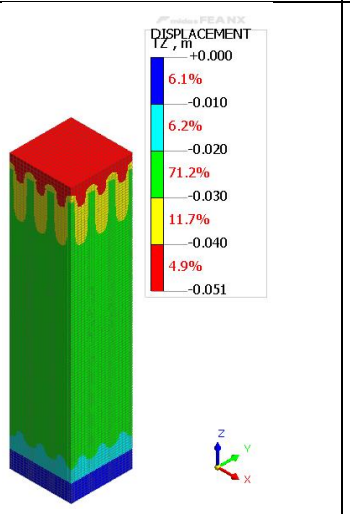
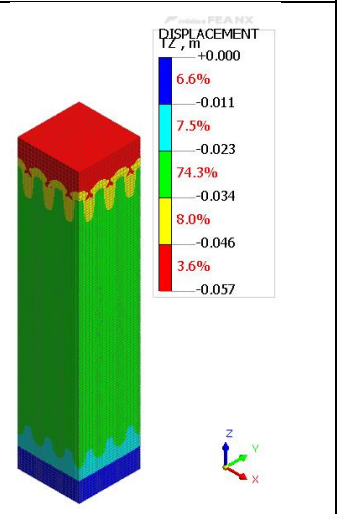
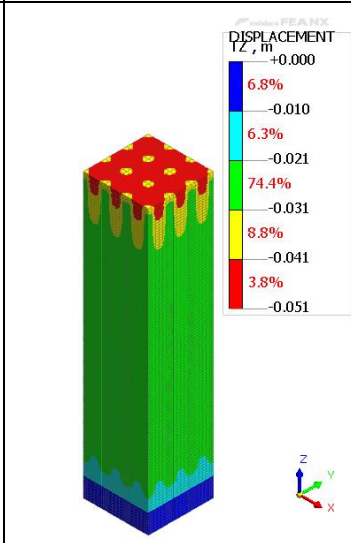
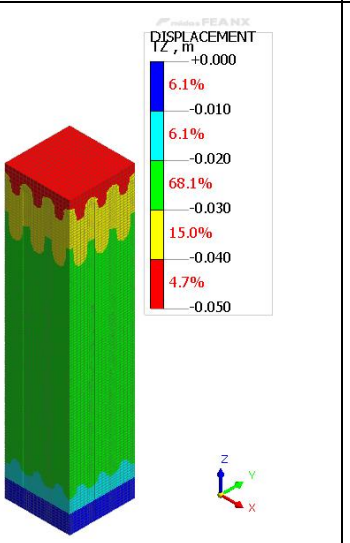
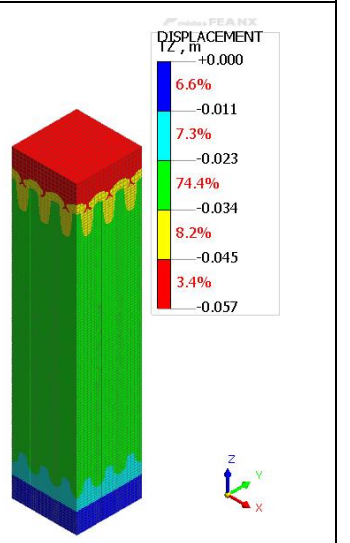
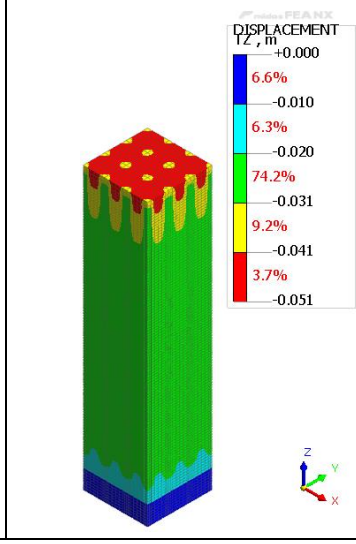
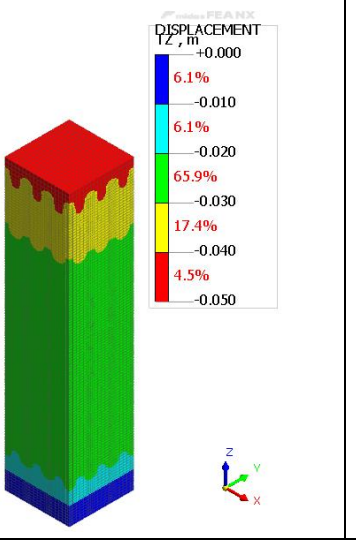
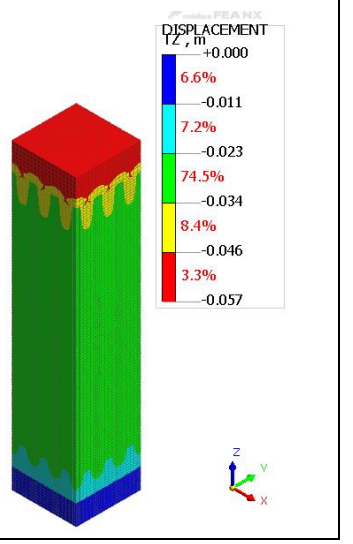
	а) $h=0,5(s-d)$	*б)* $h=1,0(s-d)$	*в)* $h=2,0(s-d)$
φ=35 град.			
φ=40 град.			
φ=45 град.			

Рисунок 2.26 – Оценка влияния **угла внутреннего трения (φ)** материала ПРС на конечные осадки и совместность перемещений точек низа фундаментной плиты при высоте ПРС:

а) $h_{gc}=0,5(s-d)$; *б)* $h_{gc}=1,0(s-d)$; *в)* $h_{gc}=2,0(s-d)$

Таблица 2.9 – Вычисленные минимальные высоты $h_{gc}{}^{M}$ промежуточного распределительного слоя для различных нагрузок и межосевых расстояний свай для объединения перемещений в уровне подошвы фундаментной плиты в зависимости от модуля деформации (E)

Модуль деформации ПРС	Нагрузка	Минимальная величина $h_{gc}{}^{M}$, м при шаге:		
		3d	*6d*	*9d*
E=30 МПа	100 кПа	0.432	1.104	1.488
	200 кПа	0.576	1.200	1.632
	300 кПа	0.624	1.248	1.632
	400 кПа	0.672	1.344	1.680
	500 кПа	0.672	1.344	1.728
E=60 МПа	100 кПа	0.432	1.104	1.632
	200 кПа	0.576	1.344	1.728
	300 кПа	0.576	1.392	1.776
	400 кПа	0.624	1.440	1.776
	500 кПа	0.672	1.488	1.872
E=90 МПа	100 кПа	0.432	1.104	1.632
	200 кПа	0.576	1.344	1.776
	300 кПа	0.576	1.392	1.872
	400 кПа	0.624	1.488	1.920
	500 кПа	0.672	1.488	1.920

Анализируя результаты влияния значения модуля деформации на деформируемость рассмотренного в исследованиях участка свайного фундамента с ПРС, установлено, что его изменение с 30 МПа до 60-90 МПа приводит к снижению осадки от 17,8% до 28,8% при различных соответствующих высотах ПРС. Схожая ситуация наблюдается и при использовании других шагов свай в поле. Для вывода зависимости минимальной высоты промежуточного слоя (h_{gc}^{M}) от угла внутреннего трения (φ), сцепления (C) и модуля деформации (E), были проанализированы полученные таблицы 2.7, 2.8, 2.9.

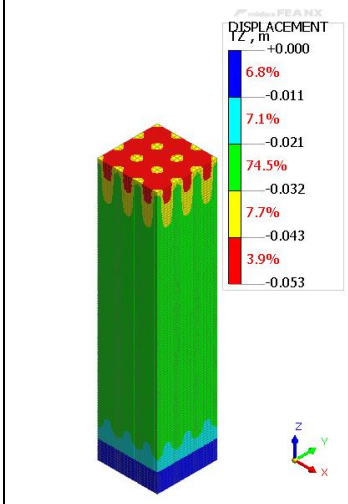
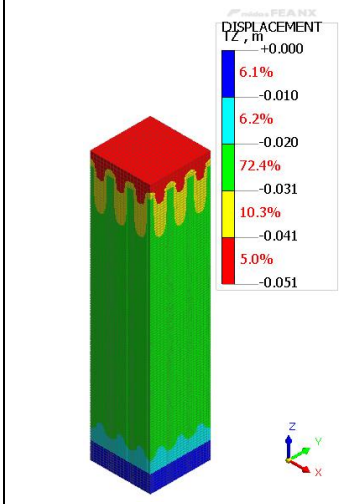
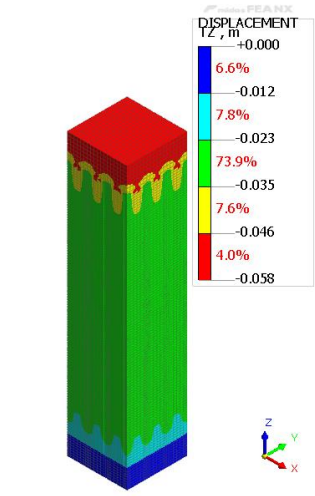
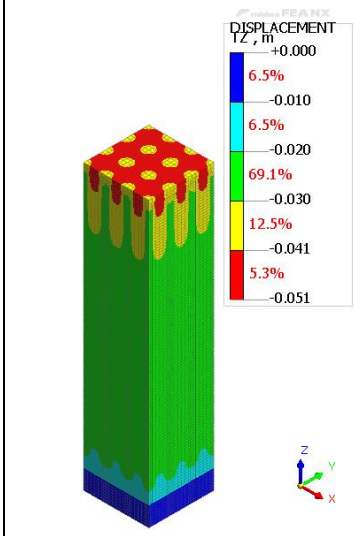
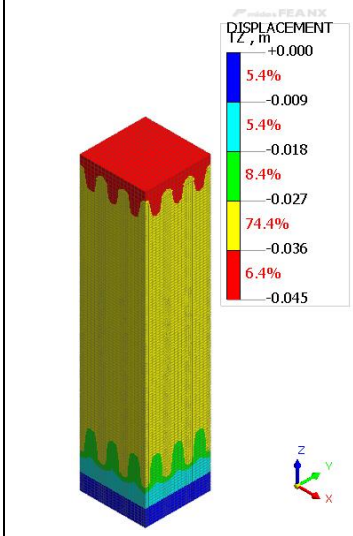
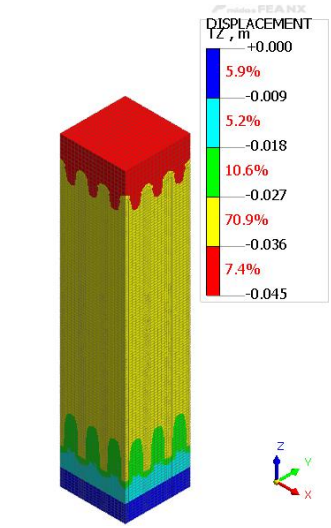
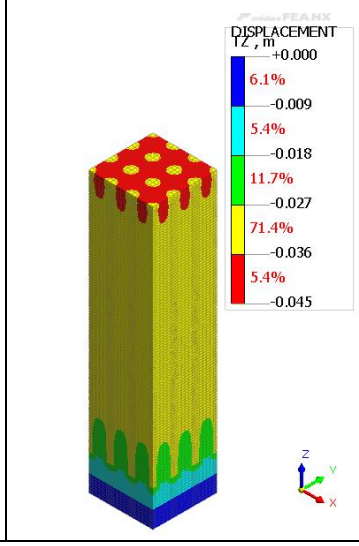
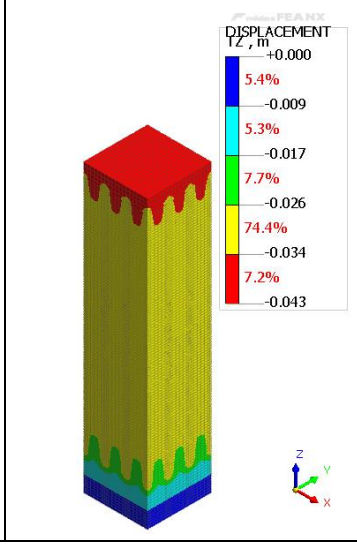
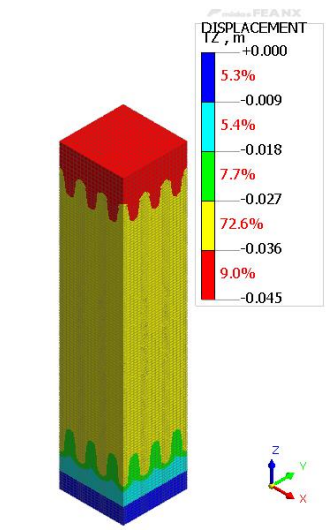
	а) $h=0,5(s-D)$	*б)* $h=1,0(s-D)$	*в)* $h=2,0(s-D)$
E=30 МПа			
E=60 МПа			
E=90 МПа			

Рисунок 2.27 – Оценка влияния **модуля деформации (*E*)** материала ПРС на конечные осадки и совместность перемещений точек низа фундаментной плиты при высоте ПРС:

а) $h_{gc}=0,5(s-d)$; *б)* $h_{gc}=1,0(s-d)$; *в)* $h_{gc}=2,0(s-d)$

а) Анализ зависимости (h_{gc}^{M}) от сцепления (C):

Из таблицы 2.7 видно, что при увеличении (C) от 0 до 150 кПа при постоянной нагрузке и шаге, значения (h_{gc}^{M}) немного увеличиваются. Значит, зависимость между (h_{gc}^{M}) и (C) несущественная.

б) Анализ зависимости (h_{gc}^{M}) от угла внутреннего трения (φ):

Из таблицы 2.8 наблюдается, что при увеличении (φ) от 30° до 45° значения (h_{gc}^{M}) также увеличиваются, особенно при больших нагрузках и шагах.

в) Анализ зависимости (h_{gc}^{M}) от модуля деформации (E):

Таблица 2.9 показывает, что при увеличении (E) от 30 МПа до 90 МПа значения (h_{gc}^{M}) слегка увеличиваются, но эта зависимость менее выражена, чем для (φ).

г) Предложение функциональной зависимости:

Учитывая характер изменения (h_{gc}^{M}) в зависимости от параметров (C, φ, E, q) , можно предположить степенную зависимость вида:

$$h_{gc}^{M} = A \cdot q^{B} \cdot (s-d)^{C} \cdot \left(\tan(\phi)\right)^{D} \qquad (2.8)$$

где: (A), (B), (C), (D) – коэффициенты, которые определяются методом наименьших квадратов; (q) – нагрузка в кПа; ($s-d$) – чистое межосевое расстояние между сваями в метрах; ($\tan(\varphi)$) – тангенс угла внутреннего трения.

д) Логарифмирование для линеаризации:

Чтобы применить метод наименьших квадратов, уравнение было линеаризовано и взяты логарифмы от обеих частей:

$$\ln\left(h_{gc}^{M}\right) = \ln(A) + B \cdot \ln(q) + C \cdot \ln(s-d) + D \cdot \ln\left(\tan(\varphi)\right)$$

Теперь это линейная функция относительно логарифмов, и можно применить множественную линейную регрессию для нахождения коэффициентов $(\ln(A)), (B), (C),$ и(D).

Далее вычислены значения логарифмов для всех данных из таблицы:

Таблица 2.10 – Таблица для выполнения регрессии (частично)

q, кПа	$(s-d)$, м	(ϕ) град.	$tan(\phi)$	h_{gc}^{M}	$ln(q)$	$ln(s-d)$	$ln(tan(\phi))$	$(ln(h_{gc}^{M}))$
100	0.600	30.000	0.577	0.432	4.605	-0.511	-0.549	-0.839
200	0.600	30.000	0.577	0.576	5.298	-0.511	-0.549	-0.552
300	0.600	30.000	0.577	0.624	5.704	-0.511	-0.549	-0.472
400	0.600	30.000	0.577	0.672	5.991	-0.511	-0.549	-0.397
500	0.600	30.000	0.577	0.672	6.215	-0.511	-0.549	-0.397
100	0.600	35.000	0.700	0.432	4.605	-0.511	-0.356	-0.839
200	0.600	35.000	0.700	0.576	5.298	-0.511	-0.356	-0.552
300	0.600	35.000	0.700	0.672	5.704	-0.511	-0.356	-0.397
400	0.600	35.000	0.700	0.720	5.991	-0.511	-0.356	-0.329
500	0.600	35.000	0.700	0.720	6.215	-0.511	-0.356	-0.329
100	0.600	40.000	0.839	0.432	4.605	-0.511	-0.175	-0.839
200	0.600	40.000	0.839	0.576	5.298	-0.511	-0.175	-0.552
300	0.600	40.000	0.839	0.672	5.704	-0.511	-0.175	-0.397
400	0.600	40.000	0.839	0.720	5.991	-0.511	-0.175	-0.329
500	0.600	40.000	0.839	0.720	6.215	-0.511	-0.175	-0.329
… и т.д.	…	…	…	…	…	…	…	…

В результате расчетов были получены коэффициенты регрессии и их стандартные ошибки:

- Коэффициенты: $(B = 0.249)$, $(C = 0.823)$, $(D = 0.218)$;
- Стандартные ошибки: (0.0418), (0.0149), (0.0150);
- Постоянная A: (-1.216) с ошибкой (0.085).

Низкие стандартные ошибки по сравнению с величинами самих коэффициентов говорят о высокой точности оценки коэффициентов. Это свидетельствует о надежности модели в оценке влияния каждой переменной. Коэффициент детерминации (R^2) = 0.9834 показывает, что ~98 % дисперсии зависимой переменной $ln(h_{gc}^{M})$ объясняется изменением независимых переменных в модели. Это очень высокий показатель, указывающий на то, что модель хорошо объясняет данные. Стандартная ошибка оценки функции: (0.0663) указывает на среднюю величину отклонений предсказанных значений от фактических и говорит о том, что прогнозы модели близки к фактическим данным. Высокое значение F-статистики: (1104.248) и очень низкий p-value (< 0.05) указывают на то, что модель

в целом статистически значима, то есть она объясняет зависимую переменную лучше, чем простая средняя без использования независимых переменных. Степени свободы: (56) – это количество наблюдений минус количество коэффициентов плюс один (включая константу). Указывает на достаточное количество данных для надежной оценки модели. Высокая регрессионная сумма квадратов RSS: (14.542) по сравнению с остаточной ESS: (0.246) указывает на то, что большая часть вариации зависимой переменной объясняется моделью.

На основе полученных данных модель выглядит достоверно. Она обладает высокой объяснительной способностью (высокий (R^2)), точностью оценок коэффициентов (низкие стандартные ошибки) и статистической значимостью (высокая F-статистика).

Таким образом, на основе проделанного анализа можно записать зависимость в окончательном виде:

$$h_{gc}^{M} = e^{-1.216} \cdot q^{0.249} \cdot (s-d)^{0.823} \cdot \big(\tan(\varphi)\big)^{0.218}$$

или

$$h_{gc}^{M} = 0.296 \cdot q^{0.249} \cdot (s-d)^{0.823} \cdot \big(\tan(\varphi)\big)^{0.218} \qquad (2.9)$$

На основе зависимости (2.9) можно определить высоту промежуточного распределительного слоя (ПРС) для свайного фундамента, учитывая нагрузку (100–500 кПа), шаг свай ($3d \ldots 9d$) и угол внутреннего трения материала ПРС (30–45°). Расчеты на экспериментальных данных в *ПК MIDAS* показывают запас по высоте ПРС от 5 до 32%, причем наибольший запас наблюдается при шаге свай $9d$ из-за высокой степени нелинейности.

Статистический анализ отклонений подтверждает однородность выборки (коэффициент вариации <33%), со средним значением 16,59% и доверительным интервалом ±1,41%. С вероятностью 95% истинное среднее лежит в диапазоне 15,18–18,00%. Таким образом, минимальный коэффициент запаса, обеспечиваемый зависимостью (2.9), составляет $\gamma_{hgc} = 1.15$, что приемлемо для геотехнических расчетов.

Таким образом, основные параметры, влияющие на деформируемость ПРС без учета жесткости надземной конструкции, – это модуль деформации (E) и высота слоя (h_{gc}). Прочностные характеристики материала важны только для обеспечения несущей способности тела ПРС. Рекомендуется принимать модуль деформации ПРС не менее 30 МПа и высоту не ниже значений, рассчитанных по зависимости (2.9).

2.4. Оценка влияния оголовков свай на напряженное состояние свайных фундаментов с ПРС

С учетом вышеописанных подходов и задач диссертации далее проведен анализ работы свайного фундамента с ПРС при устройстве свайных оголовков. Приводятся результаты теоретических исследований влияния высоты ПРС, шага свай и габаритов оголовков на напряжения, возникающие в уровне голов свай и в уровне низа фундаментной конструкции.

Именно влияние оголовков свай на изменение НДС системы является малоизученным аспектом работы свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем (рис. 2.28). Поэтому первоначально рассмотрен пример свайного фундамента с ПРС для оценки эффективности введения оголовков.

Для рассмотрения зависимостей в численных решениях была подготовлена модель свайного фундамента с ПРС, в которой поверху свай были введены оголовки. Модель состоит из фундаментной плиты размерами 30 м (L) на 15 м (B) и толщиной 1,0 м (H). Оголовки приняты круглыми. Их диаметр зависит от диаметра свай с градацией в диаметр до величины $s - d/2$, таким образом, для диаметра свай $d =$ 600 мм и шага расстановки $s = 5d$ =3,0 м оголовки имеют габариты D_H = 900 мм, 1500 мм, 2100 мм, 2700 мм.

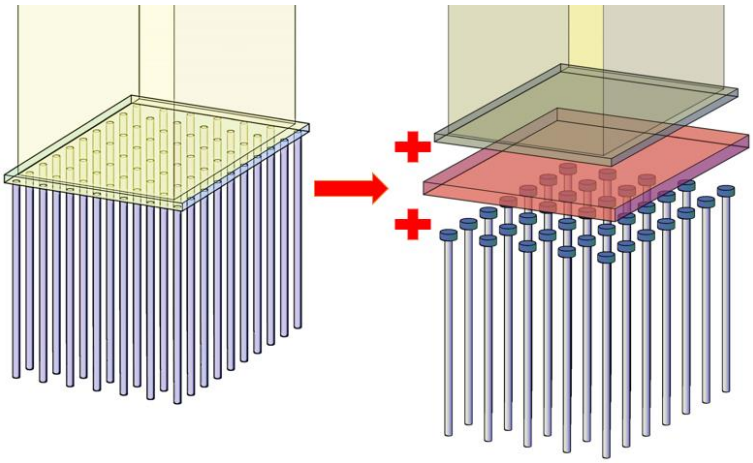
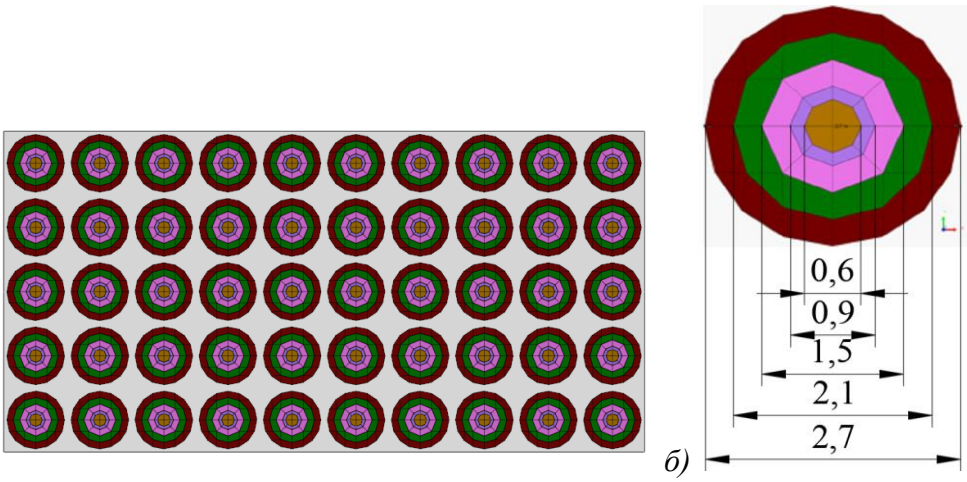


Рисунок 2.28 – Схема фундамента с промежуточным распределительным слоем (ПРС), включающая исследуемое решение с применением дополнительных оголовков на сваях

Также проведен расчет для варианта оголовка, который, при выполнении условия $(s - d/2)$, преобразуется в сплошной плитный элемент, объединяющий все сваи, т.е. условно образуются две плиты с промежуточным распределительным слоем. По толщине оголовка также приняты условия при которых он не может быть тоньше $0{,}5d$, т.е. в данном случае 300 мм и не более $1{,}5d$, т.е. в данном случае 900 мм. Материал и модель описания поведения оголовков приняты аналогично материалу свай и модели работы свай (*B25* и линейно-упругая модель). В результате поэтапного расчета от нагрузки 100 кПа до 500 кПа получены распределения напряжений в уровне голов свай и в уровне подошвы фундамента.



а) *б)*

Рисунок 2.29 – Схема свайного поля с оголовками (*а*), оголовки и их габариты в увеличенном масштабе (*б*)

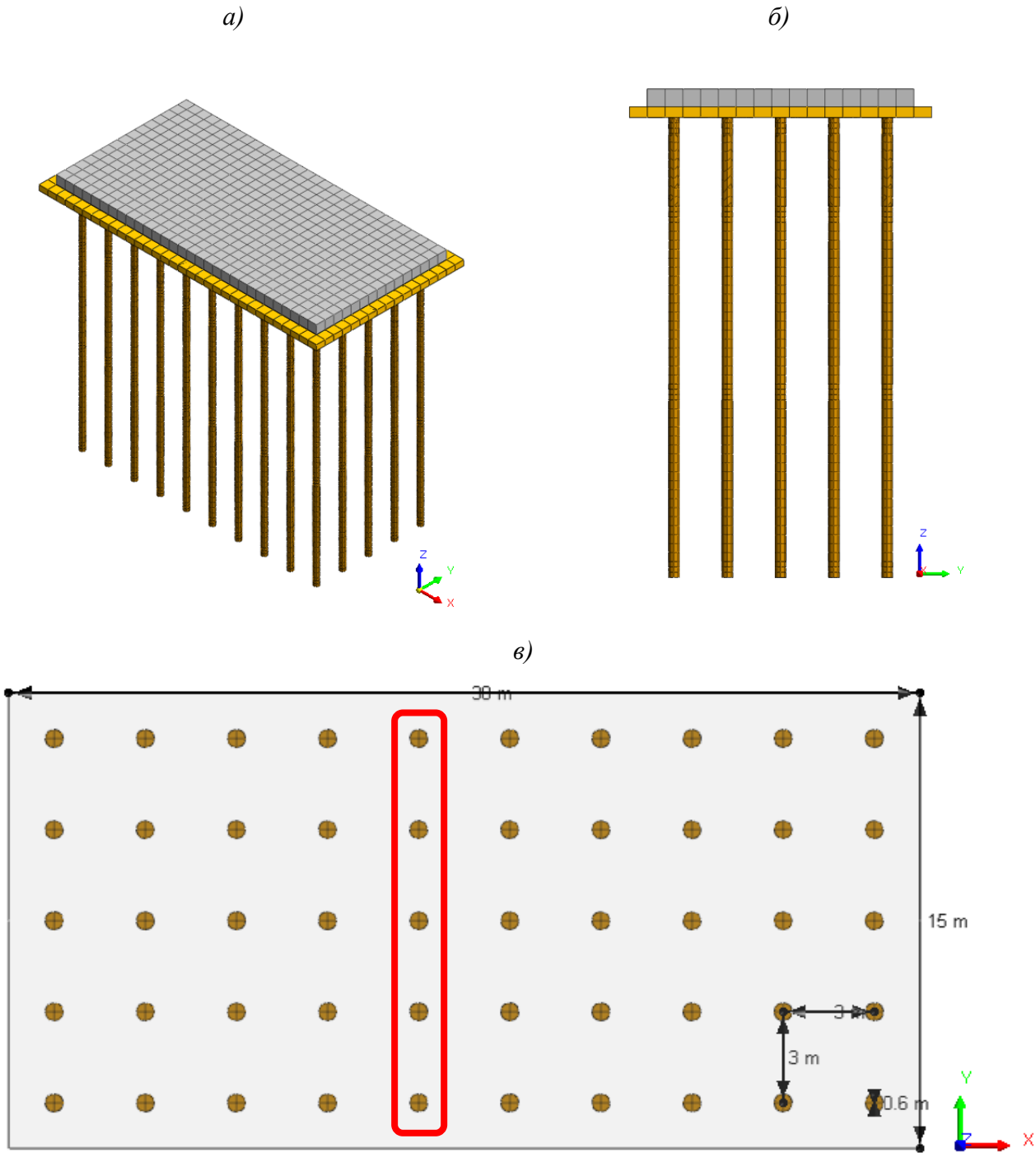


Рисунок 2.30 – Вид на конечно-элементную модель: *а)* изометрический вид; *б)* вид с торца модели; *в)* план свайного поля; красный контур – рассматриваемая группа свай

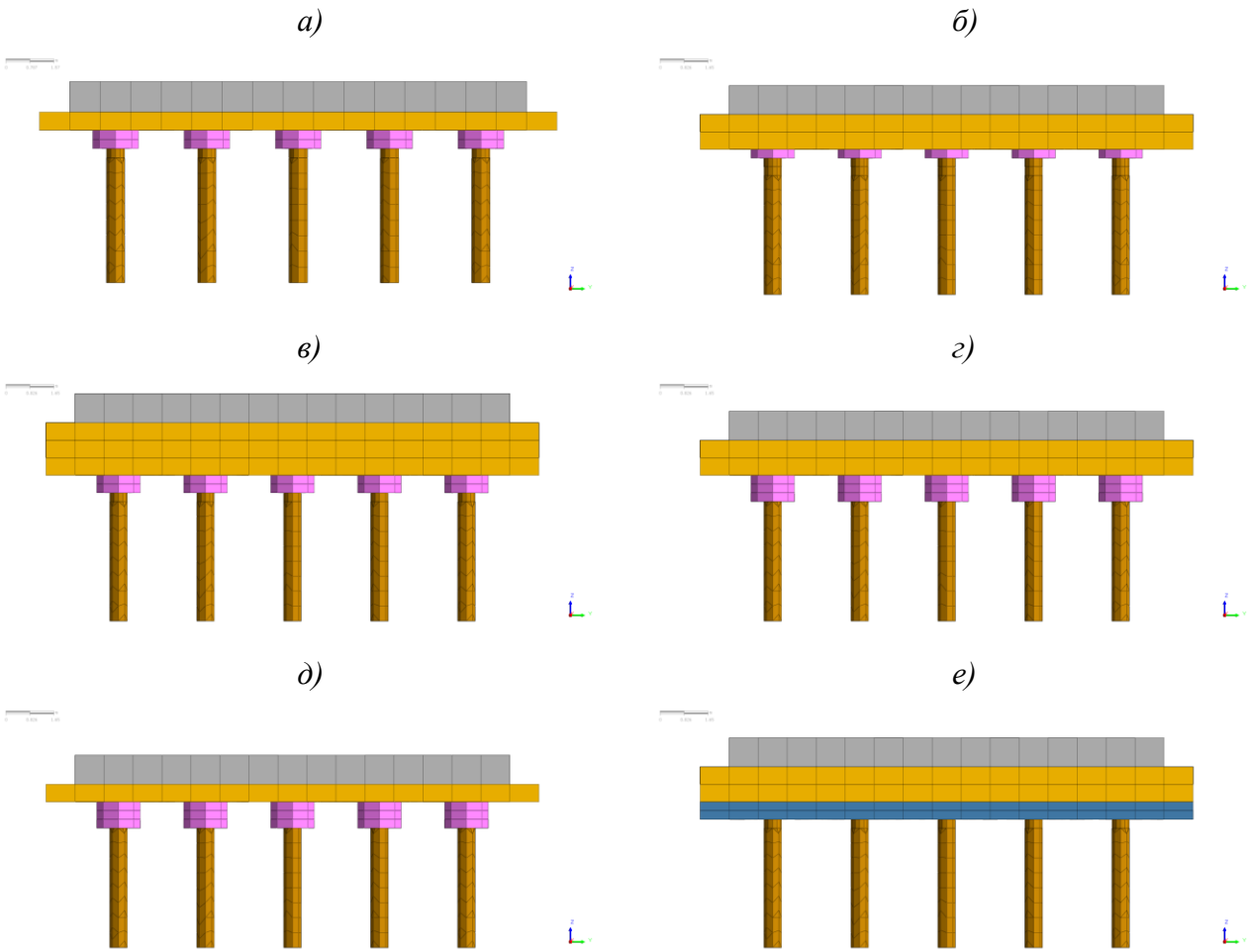


Рисунок 2.31 – Примеры схем свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем в ПК MIDAS FEA NX: *а)* h_{gc}*= 1,0d, H=0,5d; б)* h_{gc}*=2,0d, H=0,5d*; *в)* h_{gc}*=3,0d, H=0,5d*; *г)* h_{gc}*=2,0d, H=1,0d*; *д)* h_{gc}*=0,5d, H=1,0d*; *е)* h_{gc}*=2,0d, комбинированный H = 1,0d.*

Результаты приведены в сечении по ширине фундамента для свай длиной l=15,0 м, нагрузке σ_f = 500 кПа.

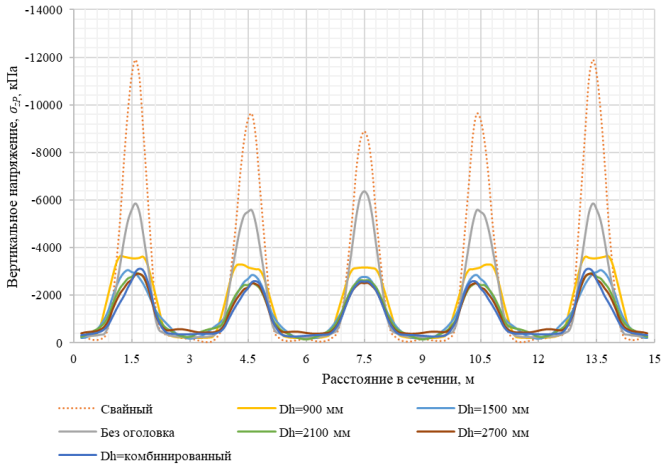


Рисунок 2.32 – Диаграмма распределения напряжений в уровне голов (оголовков) свай

Как видно из построенных диаграмм (рис. 2.32), при σ_f = 500 кПа, вертикальные напряжения над сваей (σ_{ZP}), а соответственно и сжимающие усилия, возникающие в сваях, существенно меняются при введении ПРС, а также при применении различного диаметра оголовков.

Далее проанализированы напряжения для этого же сечения, но для низа фундаментной плиты.

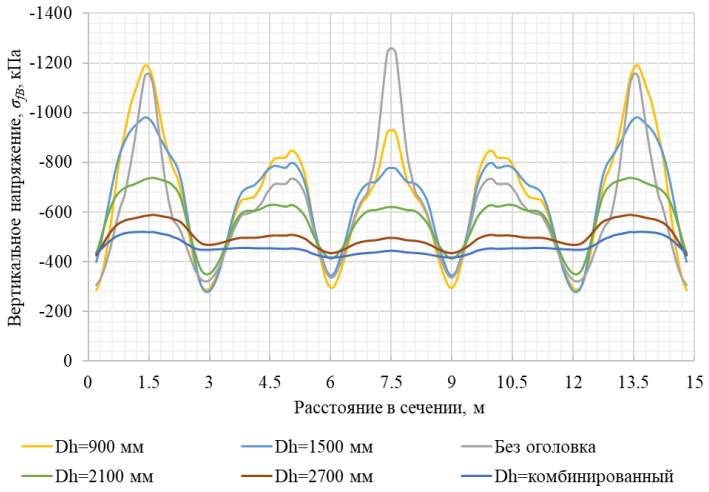


Рисунок 2.33 – Распределение напряжений в уровне низа фундаментной плиты

Построены диаграммы средних напряжений в уровне фундаментной плиты над головой сваи.

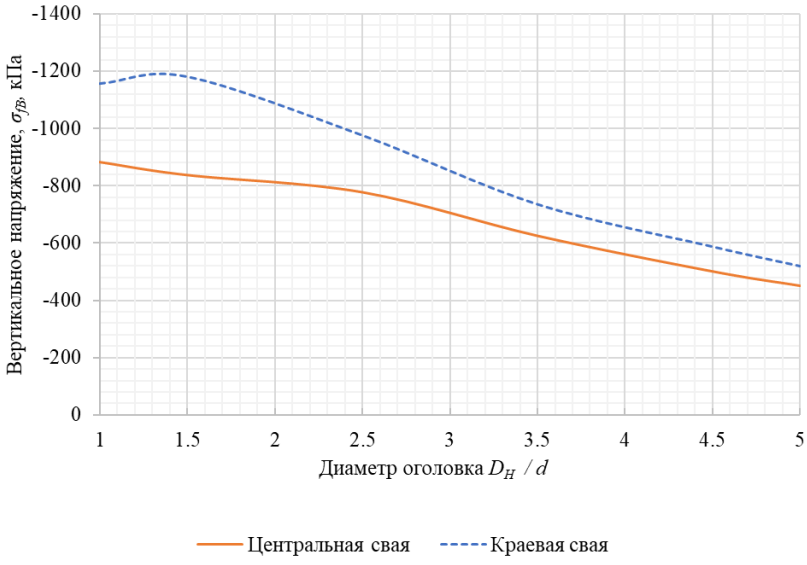


Рисунок 2.34 – Распределение напряжений в уровне низа фундаментной плиты над головой сваи (оголовком) в зависимости от диаметра оголовка

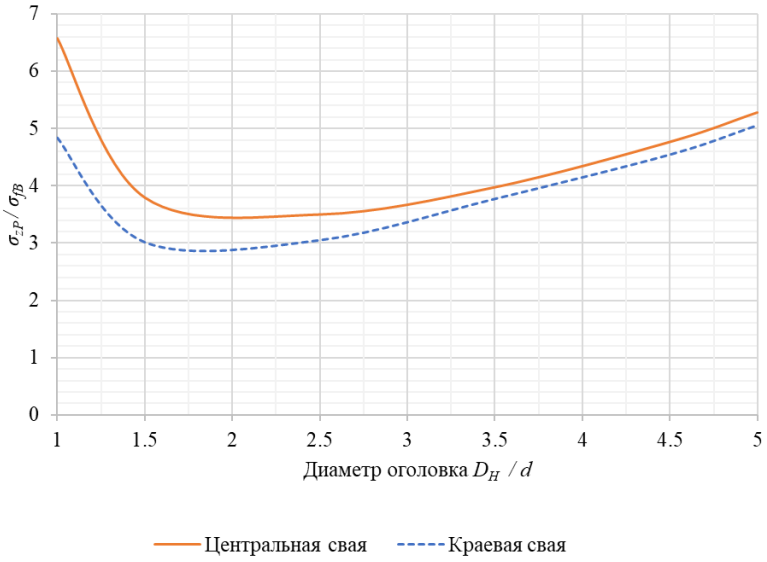


Рисунок 2.35 – Распределение отношения напряжений в уровне голов (оголовков) свай (σ_{zP}) к уровню низа фундаментной плиты над головой сваи (оголовком) (σ_{fB}) в зависимости от диаметра оголовка

Угловая свая в данном случае не рассматривается, поскольку она не попала в исследуемое сечение, однако ожидаемо характер распределения напряжений в ней будет схож с краевой сваей.

Из результатов расчетов при σ_f = 500 кПа установлено, что при толщине ПРС h_{gc}= 600 мм (рис. 2.35), при диаметре оголовка $D_H = 2{,}5d$ отношение вертикальных напряжений над головой сваи и в уровне фундаментной плиты $\sigma_{zP} / \sigma_{fB}$ = 3,05-3,5 в зависимости от положения сваи, что является минимальным показателем и свидетельствует о наибольшей равномерности распределения напряжений в обеих рассматриваемых точках, при дальнейшем увеличении диаметра оголовка $D_H > 2{,}5d$ или применении оголовка в виде сплошной плиты, напряжения в уровне низа фундамента (σ_{fB}) продолжают снижаться, однако снижение напряжений в уровне головы сваи (σ_{zP}) уже не столь интенсивно, в связи с этим наблюдается рост отношения напряжений в уровне головы сваи (σ_{zP}) к уровню низа фундаментной плиты (σ_{fB}), а также повышение материалоемкости и трудоемкости решения. Данный факт позволяет установить рациональную область применения оголовков в свайных фундаментах с ПРС – *1,5…2,5d*. Развитие габаритов оголовков может

быть рассмотрено в индивидуальных случаях, когда присутствуют осложняющие факторы проектирования.

На основании полученных данных сделан вывод о том, что введение оголовков существенно меняет напряженное состояние промежуточного распределительного слоя, а при увеличении ширины оголовка наблюдается перераспределение усилий: часть нагрузки, действующей на сваи, передается через оголовок на окружающий грунт, что приводит к снижению концентрации напряжений в головах свай. Варианты с широкими оголовками демонстрируют более равномерное распределение напряжений в уровне фундаментной плиты, что способствует снижению локальных деформаций в зоне оголовков. Однако такие решения являются более трудоемкими и материалоемкими.

Из вышеприведенных диаграмм установлено, что введение оголовков позволяет больше нагрузить верхнюю часть сваи и включить ее в работу быстрее. При этом оголовки $D_H = 1{,}5…2{,}5d$ наиболее эффективны в распределении напряжений на подошве фундамента.

В ходе изучения работы свайного фундамента с промежуточным распределительным слоем удалось установить существенное влияние оголовков на распределение напряжений по подошве фундаментной плиты, что подтверждает необходимость их дальнейшего изучения.

2.5. Исследование влияния размеров свайных оголовков на деформированное состояние свайных фундаментов с ПРС

В данном разделе приведены результаты численного моделирования и анализа деформированного состояния свайных фундаментов с ПРС при варьировании ширины оголовков свай, шага расстановки свай, высоты ПРС, жесткости фундамента, нагрузки. Основной целью исследования являлось выявление влияния геометрических параметров оголовков на распределение деформаций в центральной, краевой, угловой зонах – в головах свай, оголовках (при их наличии), а также в уровне низа фундаментной конструкции.

Для проведения численного моделирования использовался *ПК MIDAS FEA NX*, позволяющий достаточно точно учитывать нелинейные деформационные характеристики материалов и сложные условия взаимодействия элементов конструкции с грунтовым основанием. Свойства материалов и грунтов приняты аналогично предыдущим разделам.

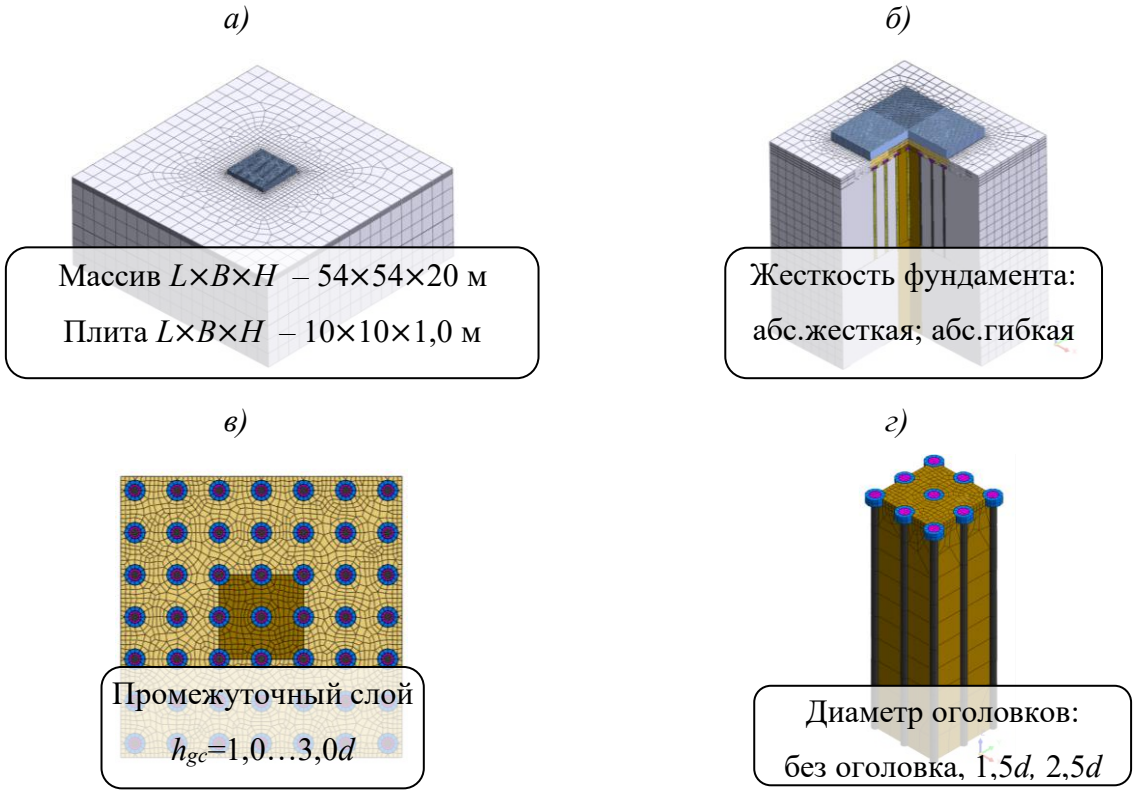


Рисунок 2.36 – Пример рассматриваемой модели свайных фундаментов с ПРС: *а* – общий вид расчетной схемы; *б* – укрупненный вид расчетной модели с показом сечения рассматриваемой ячейки в сечении; *в* – план свайного поля с габаритом и контурами оголовков рассматриваемой ячейки; *г* – рассматриваемая ячейка с шагом свай 5d

Изучены закономерности развития деформаций в точках над головами свай и в пролете между ними в пределах центральной ячейки свайного поля (рис. 2.36 *г*). В рамках исследований выполнено моделирование работы свайно-плитных и свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем с различной жесткостью надземного строения (абсолютно гибкого и абсолютно жесткого).

Всего подготовлено и проанализировано более 180 моделей фундаментов с различными параметрами при использовании модели упрочняющегося грунта при малых деформациях – *Hardening Soil Small-strain (HSS)*.

Плитная часть фундамента моделируется в виде сплошной железобетонной конструкции, геометрические размеры которой в плане – 10×10 м, опирание происходит на однородный суглинистый грунт, аналогично п. 2.1-2.4 настоящей диссертации. Сваи длиной 10 м, а их диаметр 300 мм.

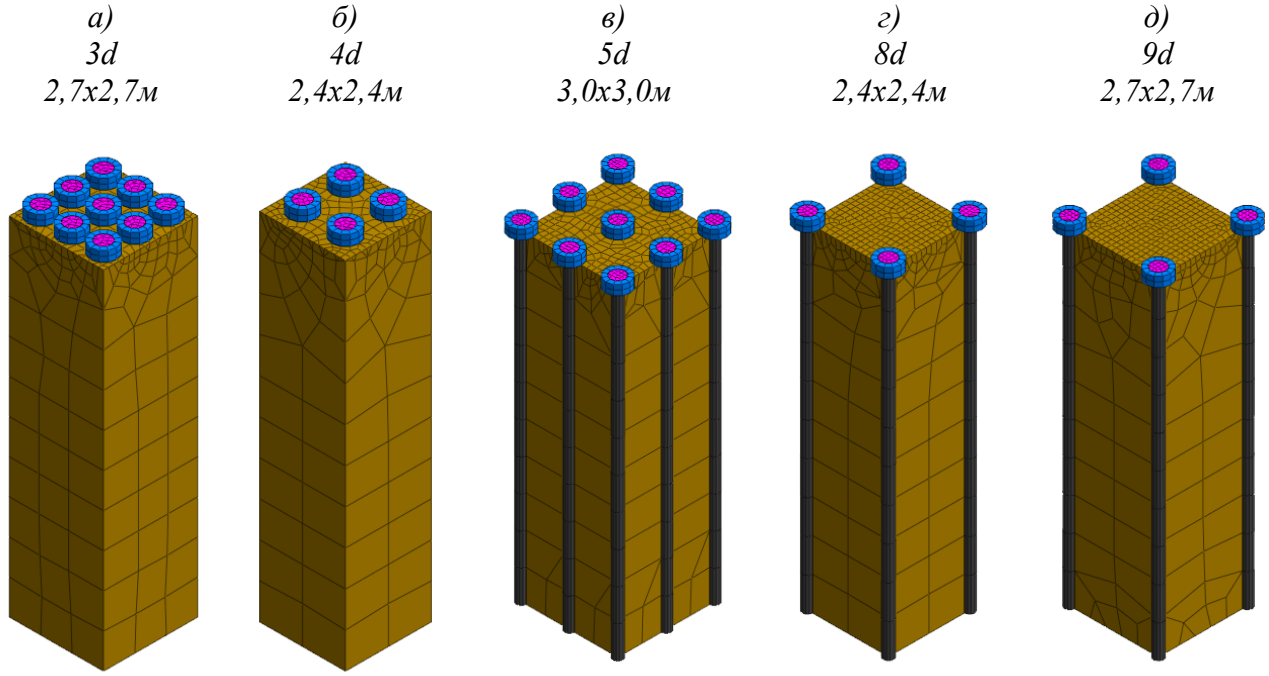


Рисунок 2.37 – Фрагменты расчетных схем (*а* – *д*), соответствующие шагу свай в поле 3*d* – 9*d* (6*d* и 7*d* условно не показаны)

В итоге, на основании выполненных расчетов, проведена оценка деформаций в уровне голов свай, оголовков свай (при их наличии), а также в уровне низа фундаментной конструкции. Обработка этих данных в диссертации позволила установить характерные зависимости деформаций в уровне голов свай, оголовков (при их наличии), низа фундаментной плиты, позволяющих прогнозировать НДС свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем.

Для примера уровня рассматриваемых задач рассмотрены схемы с расстановкой свай 5*d* и показано, как в таком случае распределяются перемещения в уровне низа свай (оголовков) и в уровне низа фундаментной плиты исследуемого фундамента. В диссертации были рассмотрены абсолютно гибкие и абсолютно жесткие фундаменты. Эти два варианта формирования жесткости зданий часто встречаются в практических расчетах. Абсолютно гибкими можно считать днища

цилиндрических резервуаров, а абсолютно жесткими допустимо считать высотные здания с перекрестно-стеновой конструктивной схемой.

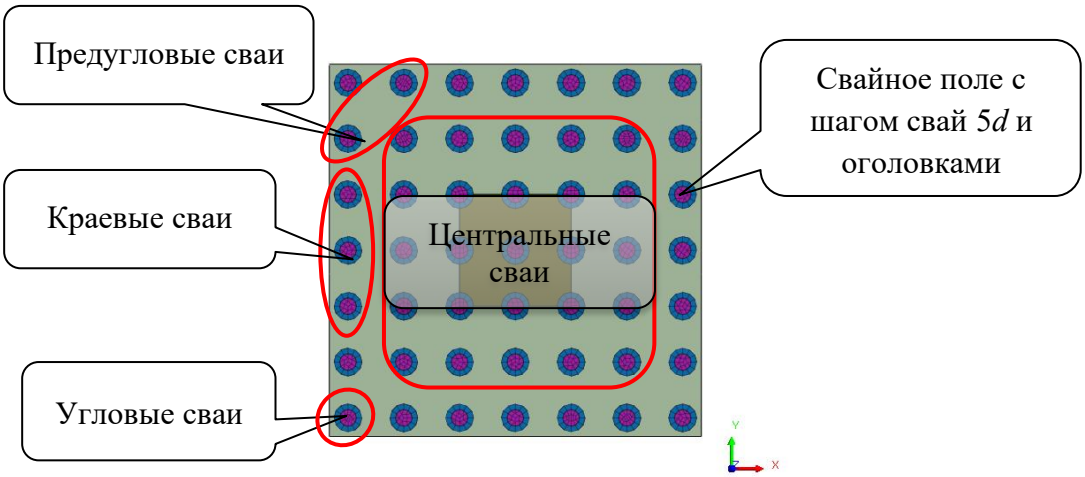


Рисунок 2.38 – Свайное поле с выделением групп свай по характеру работы на сжимающие нагрузки

На основании расчетов в свайном поле выделены четыре основных вида свай (рис. 2.38): угловые, предугловые, краевые и центральные. Эти сваи работают по-разному в составе фундамента, что обусловлено их положением в плане.

а) *б)*

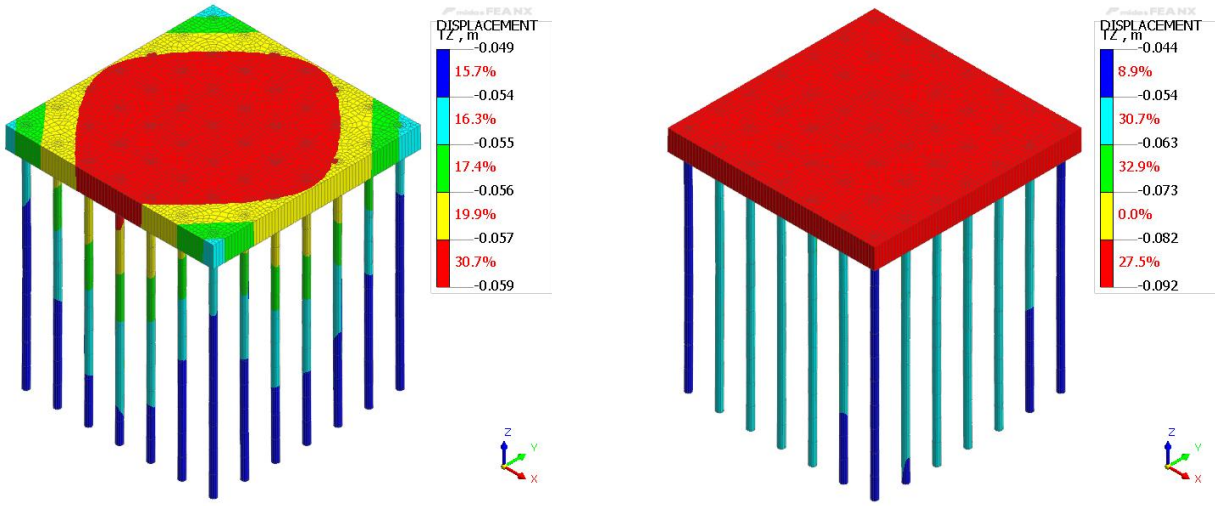


Рисунок 2.39 – Осадки свайно-плитного фундамента (*а*) и свайного фундамента с ПРС (*б*) при σ_f = 500 кПа и абсолютно жестком фундаменте

Угловые сваи работают в условиях максимально неблагоприятного сочетания нагрузок, так как располагаются на углах сооружения. Они воспринимают как вертикальные, так и значительные горизонтальные нагрузки.

Краевые сваи располагаются по периметру фундамента. Предугловые сваи расположены рядом с угловыми и взаимодействуют с ними при передаче сейсмических и динамических нагрузок, перераспределяя пиковые значения усилий. Центральные сваи размещены в середине свайного поля и воспринимают преимущественно вертикальные нагрузки от центральной части надземного сооружения.

а) *б)*

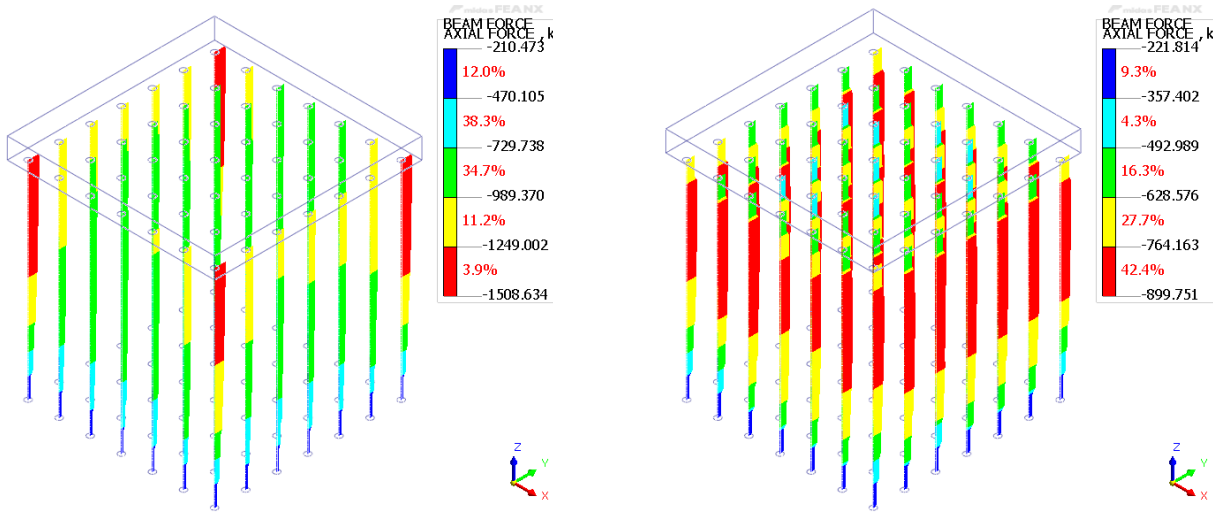


Рисунок 2.40 – Вертикальные усилия в сваях свайно-плитного фундамента (*а*) и свайного фундамента с ПРС (*б*) при σ_f =500 кПа и абсолютно жестком фундаменте

Изучая результаты расчетов на рис. 2.40, отмечено существенное отличие в распределении усилий в свайном поле между двумя вариантами. Видно, что в свайном фундаменте с промежуточным распределительным слоем усилия более равномерны, их предельная величина практически в два раза ниже аналогичного свайного решения, что позволяет снизить материалоемкость конструктивных решений свайных фундаментов. Это достигается за счет включения в работу промежуточного распределительного слоя и фундаментной конструкции. Далее показано, как увеличение размеров оголовков свай может улучшить работу фундаментной конструкции (рис. 2.41).

а) *б)*

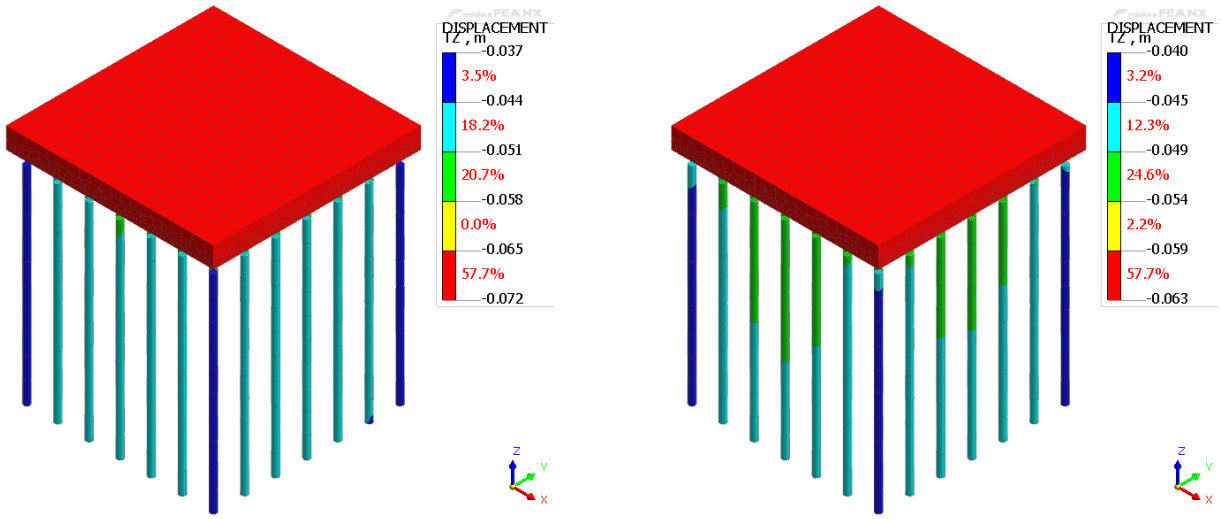


Рисунок 2.41 – *а*) Осадки свайного фундамента с ПРС при $D_h = 1.5d$; *б*) то же, для свайного фундамента с ПРС при $D_h = 2.5d$

а) *б)*

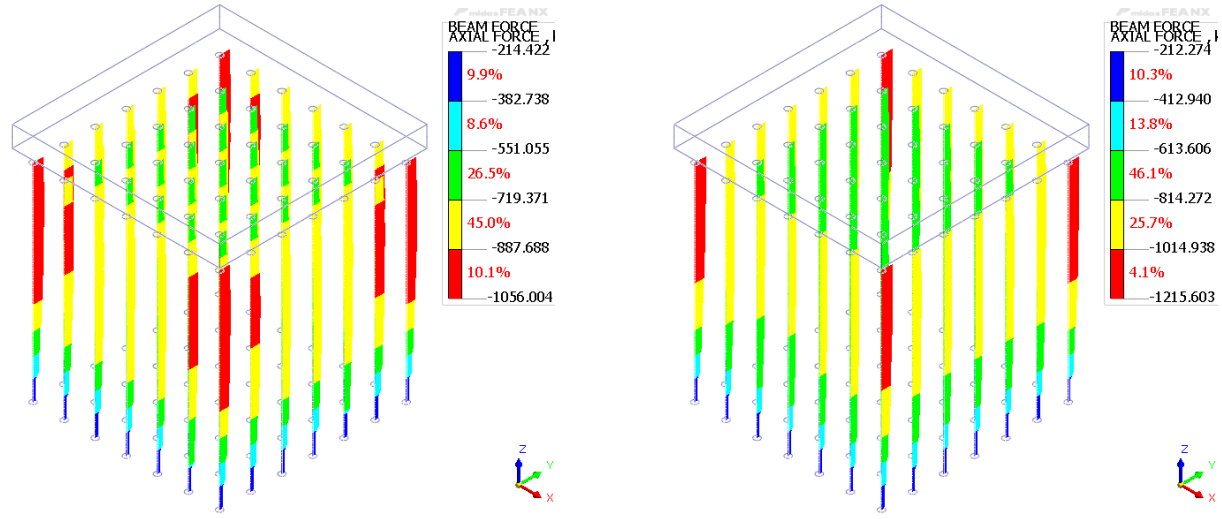


Рисунок 2.42 – *а*) Вертикальные усилия для свайного фундамента с ПРС при $D_h = 1.5d$; *б*) то же, для свайного фундамента с ПРС при $D_h = 2.5d$

В результате расчетов установлено, что добавление свайных оголовков позволяет снижать и регулировать деформации системы, включать в работу верхнюю часть сваи (рис. 2.42), которая в случае свай без оголовков является недогруженной. В конечном итоге, при наибольшем из рассмотренных оголовков ($D_h = 2.5d$) система стремится работать по типу классического свайно-плитного фундамента, но с большей равномерностью распределения нагрузок и деформаций за счет работы промежуточного распределительного слоя.

Далее в работе рассмотрено, как изменяются напряжения и деформации в уровне голов свай (оголовков) и в уровне низа фундамента. Для этого выбрано сечение по центральной свае (рис. 2.43-2.44).

На построенных графиках распределения напряжений и деформаций (рис. 2.43-2.44) показано, что эффективность введения промежуточного распределительного слоя не вызывает сомнения, поскольку вертикальные напряжения на голове сваи снижаются более чем в 2 раза, а при рассмотрении уровня низа фундамента эта разница достигает 3-4 раз. При этом введение оголовков позволяет сделать эту разницу еще более значимой, в конечном итоге приводя к тому, что напряжения в уровне головы сваи (оголовка) становятся сопоставимыми с аналогичными напряжениями в уровне низа фундамента, что говорит о выравнивании НДС промежуточного распределительного слоя.

Анализ графиков деформаций на уровне оголовков свай и фундаментной плиты (рис. 2.44) позволяет сделать вывод о значительном снижении неравномерности деформаций (на 10-17%) как в уровне оголовков, так и в пролетах между сваями при их устройстве. В то же время на уровне низа фундаментной плиты наблюдается более равномерная осадка за счет высокой жесткости конструкции. Таким образом, при рассмотрении абсолютно жесткого фундамента наиболее важным является обеспечение равномерности деформаций в уровне оголовков свай, так как от этого зависит несущая способность и безаварийная эксплуатация ПРС. Устройство свайных оголовков позволяет эффективно регулировать напряженно-деформированное состояние системы за счет назначения размеров оголовков при заданном межсвайном расстоянии.

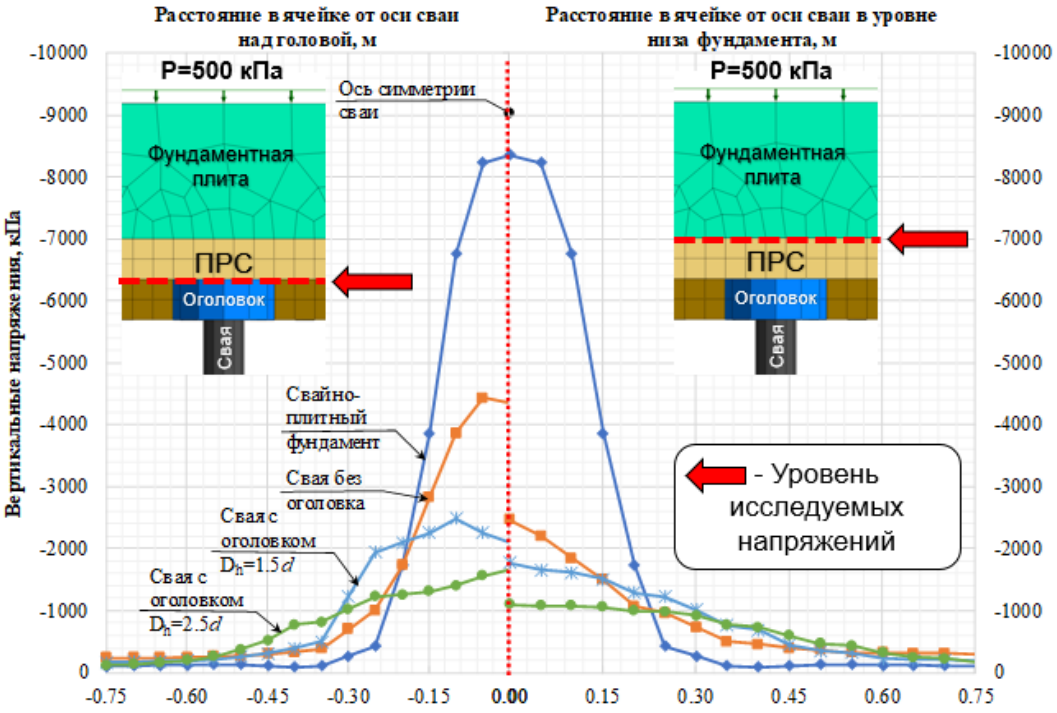


Рисунок 2.43 – Численное определение **напряжений** над сваями с оголовками и без оголовков в уровне голов свай и уровне низа **абсолютно жесткого фундамента** при диаметре d=300 мм; шаге свай L_P=5d; давлении на подошве плиты σ_f=500 кПа

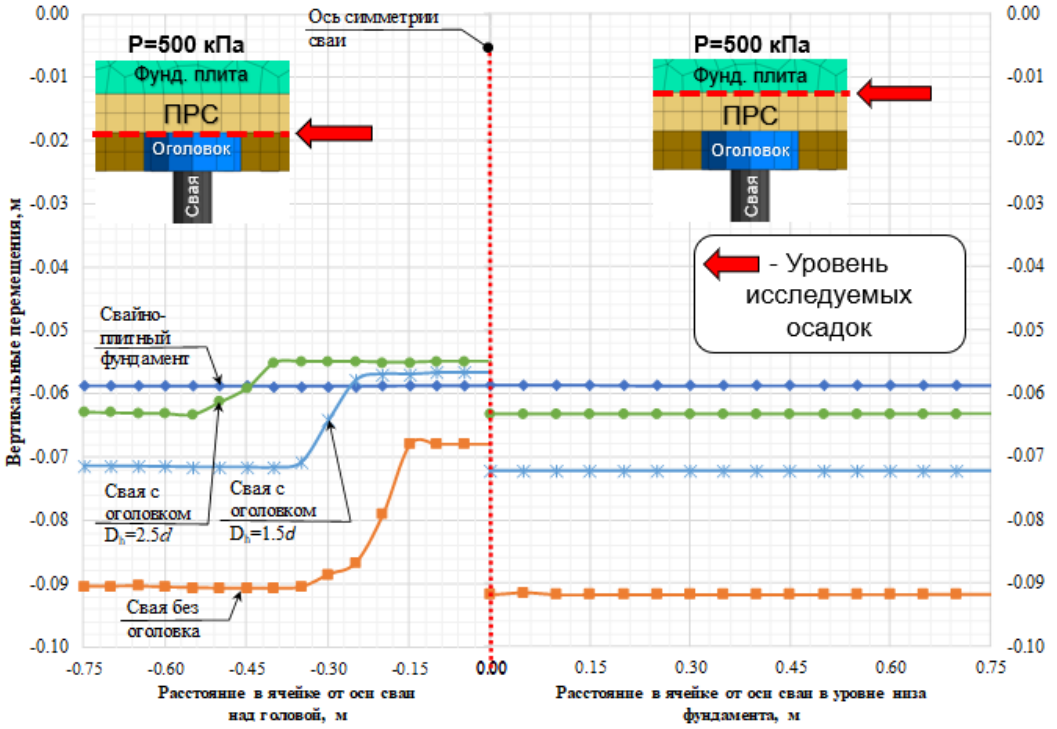


Рисунок 2.44 – Численное определение **деформаций** над сваями с оголовками и без оголовков в уровне голов свай и уровне низа **абсолютно жесткого фундамента** при диаметре d=300 мм; шаге свай L_P=5d; давлении на подошве плиты σ_f=500 кПа

Далее представлена установленная зависимость напряжений и деформаций для того же межсвайного расстояния, но для **абсолютно гибкого фундамента**.

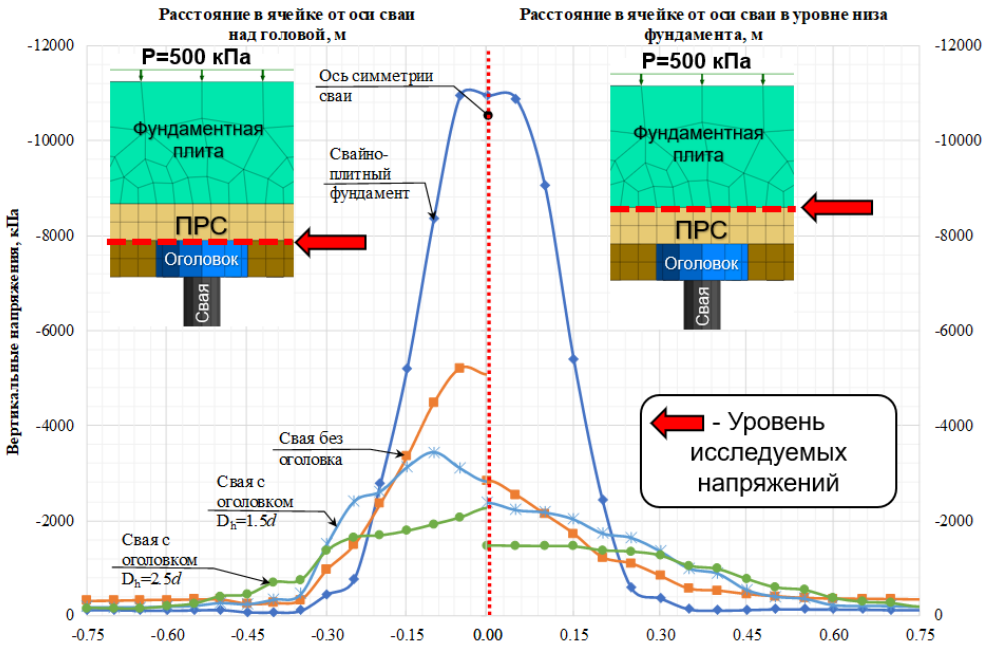


Рисунок 2.45 – Численное определение **напряжений** над сваями с оголовками и без оголовков в уровне голов свай и уровне низа **абсолютно гибкого фундамента** при диаметре d=300 мм; шаге свай L_P=5d; давлении на подошве плиты σ_f=500 кПа

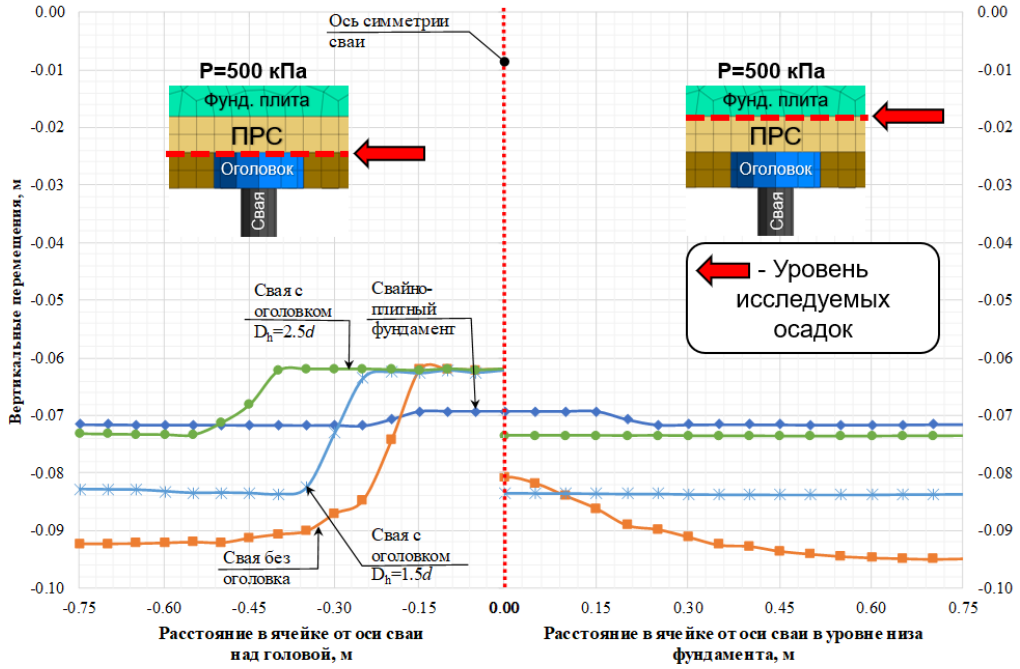
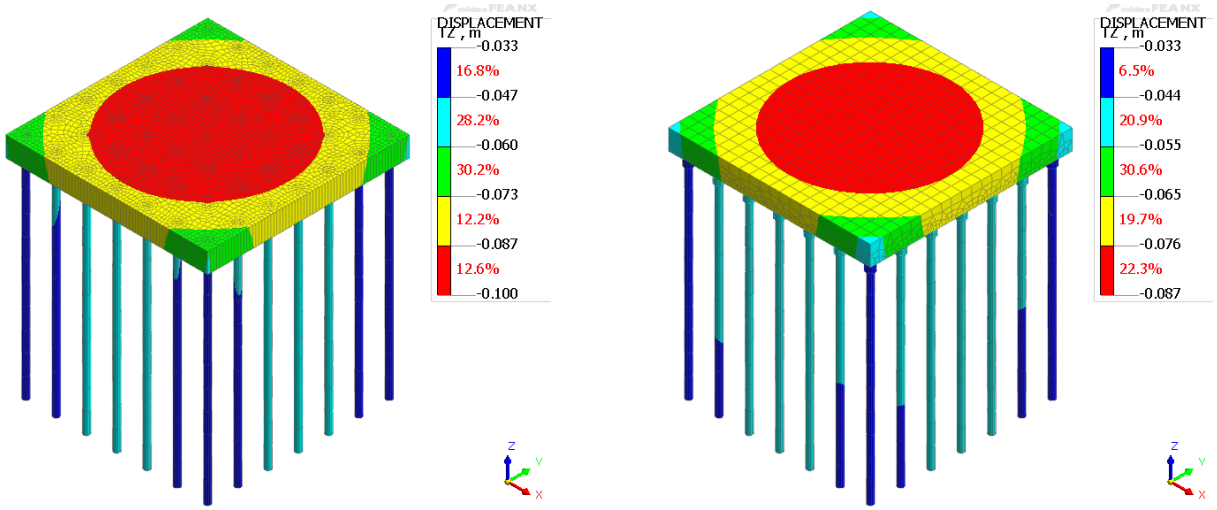


Рисунок 2.46 – Численное определение **деформаций** над сваями с оголовками и без оголовков в уровне голов свай и уровне низа **абсолютно гибкого фундамента** при диаметре d=300 мм; шаге свай L_P=5d; давлении на подошве плиты σ_f=500 кПа

Рассматривая результаты напряжений и деформаций центральной ячейки для абсолютно гибкого фундамента, установлено, что напряжения в уровне головы сваи (оголовков) и в уровне низа фундамента существенно увеличиваются для всех рассмотренных схем (30-50%). При этом, наличие оголовков также (как и при абсолютно жестком фундаменте) значительно влияет на итоговый результат, а также равномерность деформаций и напряжений в пределах тела ПРС в пределах свайного поля.

а) *б)*



в)

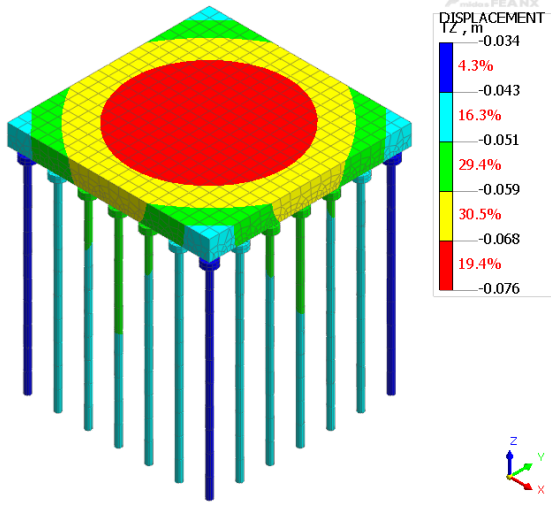


Рисунок 2.47 – *а*) Вертикальные деформации для **абсолютно гибкого** свайного фундамента с ПРС при $D_h = 1.0d$; *б*) то же, для свайного фундамента с ПРС при $D_h = 1.5d$; *в*) то же, для свайного фундамента с ПРС при $D_h = 2.5d$;

Устройство свайных оголовков позволяет регулировать осадки гибких фундаментов – они могут быть снижены до 25%, исходя из полученных результатов.

В итоге 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 1,5–2,5d в сравнении с решениями без оголовков для межсвайного расстояния 5–7d.

2.6. Сопоставление лабораторных экспериментальных исследований и численного моделирования работы свайных фундаментов с ПРС

Численные исследования автора и лабораторные эксперименты, проведенные на кафедре «Основания и фундаменты» Кубанского ГАУ ее сотрудниками [2], позволили оценить работу свайного фундамента с ПРС. Целью исследования являлось изучение распределения напряжений и деформаций в основании, а также подтверждение адекватности математической модели путем сопоставления с экспериментальными данными.

В лабораторных экспериментах использовалась физическая модель свайного фундамента с ПРС, собранная в плоском лотке размером 500×500×100 мм с прозрачной стенкой (рис. 2.48).

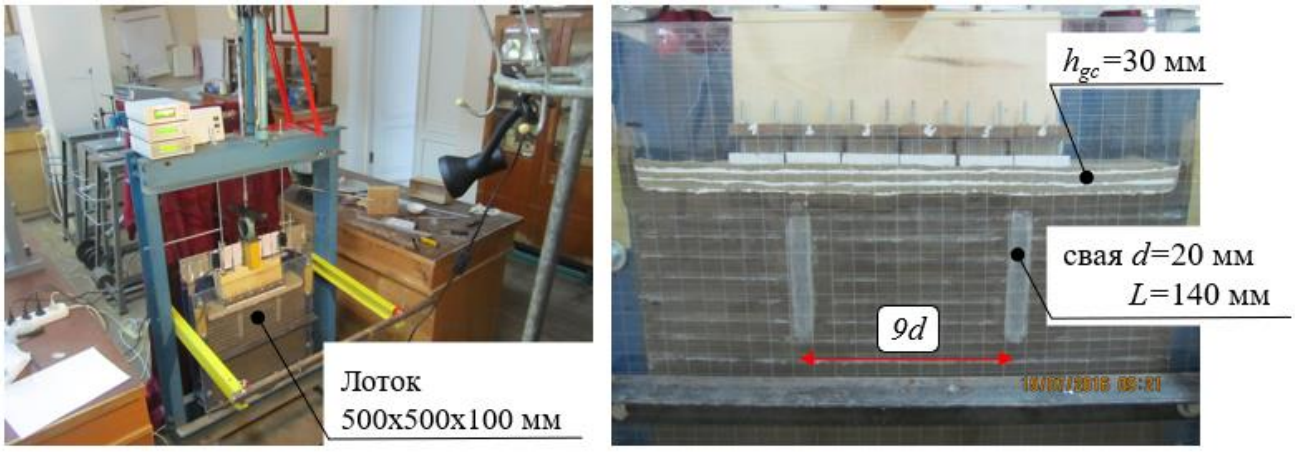


Рисунок 2.48 – Фото лабораторного лотка (слева) для моделирования и свайный фундамент с ПРС (справа)

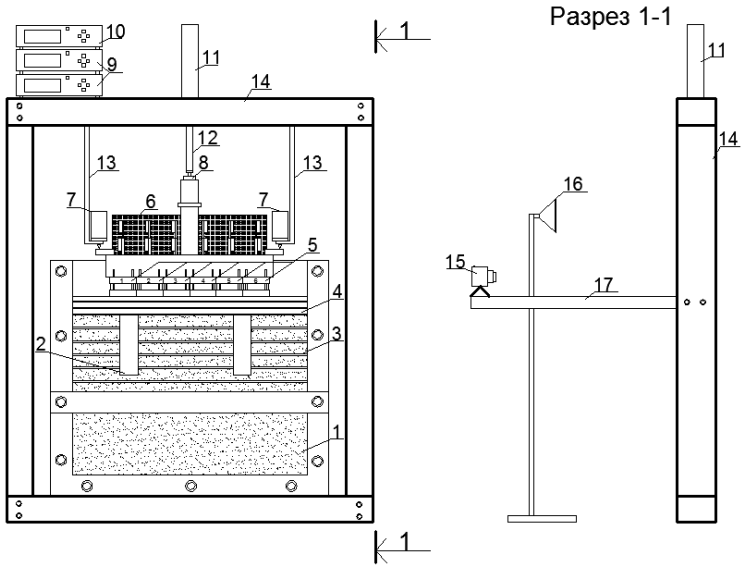


Рисунок 2.49 – Схема лабораторного лотка для моделирования свайного фундамента с ПРС: 1 – суглинок; 2 – сваи; 3 – известковая прослойка; 4 – ПРС из песка с меловой прослойкой; 5 – датчики силы с резиновым элементом ДСР; 6 – экран с миллиметровыми шкалами; 7 – датчик перемещения фотоэлектронный; 8 – динамометр сжатия ДОСМ3-02 с датчиком перемещения фотоэлектронным; 9 – модуль памяти для датчиков перемещения; 10 – модуль памяти для динамометра; 11 – механизм нагружения с электрическим приводом; 12 – шток; 13 – кронштейн; 14 – испытательный стенд; 15 – фотоаппарат; 16– лампа; 17 – держатель для фотоаппарата

Модель включала: суглинок пылеватый (толщина 400 мм, плотностью 1.7 г/см³, влажностью 12%) в качестве основания; ПРС (толщина 30 мм) выполнен из мелкого речного песка, уплотненного давлением 50 кПа; бетонные сваи длиной 140 мм, сечением 20×100 мм, погруженные в суглинок; фундаментную плиту в виде жесткой панели, оснащенной датчиками силы с резиновым элементом (*ДСР*) и фотоэлектронными датчиками перемещений (рис. 2.49).

Нагрузка на модель прикладывалась в три этапа: плавное увеличение силы в течение 5 минут с последующей стабилизацией осадки в течение 10 минут. В эксперименте регистрировались осадка плиты, реакция ПРС в шести точках и общая деформация основания. Датчики *ДСР*, установленные под плитой, позволили измерить распределение сил: наибольшие реакции фиксировались над сваями, а максимальная осадка ПРС – в межсвайном пространстве. Разница в реакциях между сваями и межсвайной зоной достигала 3 раз, что указывает на неравномерное распределение нагрузки и ее характер.

Проведенные численные исследования подтвердили качественную сходимость с экспериментальными данными (см. раздел 2.5 настоящей диссертации). Так, расчетная осадка в пределах промежуточного слоя над сваями и в пролете между ними дает схожий результат в сравнении с физическим моделированием в лотке. Анализ результатов показал, что ПРС эффективно перераспределяет усилия, но неравномерная реакция может привести к локальным деформациям и неравномерным осадкам в основании.

Рисунок 2.50 – Фото свайного фундамента с ПРС в конце лабораторного эксперимента с учетом его деформирования под нагрузками

Выявленные расхождения между результатами численного и лабораторного моделирования объясняются упрощениями в физической лабораторной модели и погрешностями моделирования в плоском лотке, такими как масштабный эффект и свойства грунтов основания при учете граничных условий.

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.

2.7. Исследование работы свайных фундаментов с ПРС и железобетонными оголовками при действии сейсмических нагрузок

Ранее было установлено, что введение промежуточного распределительного слоя между фундаментом здания и свайным основанием существенно изменяет

распределение усилий в сваях [24, 104, 112, 113]. Однако влияние железобетонных оголовков на усилия в сваях до сих пор не изучалось. Для исследования этого эффекта были проведены серии экспериментов на модели реального высотного здания, учитывая наиболее рациональные параметры свайного поля, оголовков и промежуточного распределительного слоя, полученные из предыдущих исследований п. 2.4-2.5.

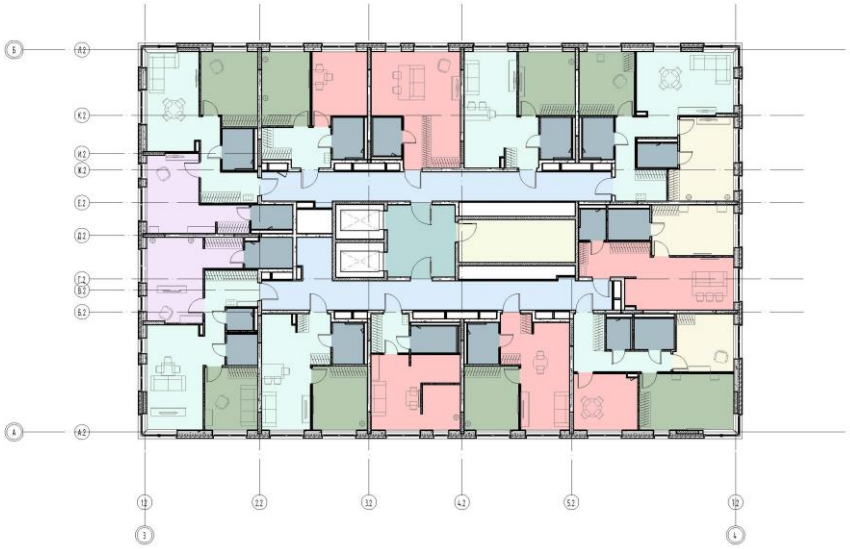


Рисунок 2.51 – Блок-секция высотного здания прямоугольной формы в плане, принятая для проведения численных исследований

В рамках численных исследований, направленных на изучение влияния ПРС при сейсмических воздействиях, выполнялся сравнительный анализ усилий, возникающих в сваях для двух конструктивных решений: с жесткой заделкой свай в фундаментной плите и с применением ПРС, включая вариант с железобетонными оголовками свай.

Для этих целей была разработана подробная численная модель высотного здания, расположенного в сейсмическом районе. Здание имеет 25 этажей надземной части и один подземный уровень, при этом его общая высота от уровня фундаментной плиты составляет 80 метров. В плане строение представляет собой прямоугольник с размерами 21,2×32,6 метра (по сторонам B и L соответственно).

Конструктивные элементы здания, включая стены, перекрытия и сваи, моделировались железобетонными с использованием бетона класса В25,

характеризующегося модулем упругости E=30000 МПа и коэффициентом Пуассона ν=0,2. Свайное поле включает 99 буровых свай длиной 24 метра и диаметром 400 мм, размещенных с переменным шагом. Диаметр свай выбран предварительно для изучения параметров ПРС, оголовков и по результатам расчетов его следует уточнить. Сваи располагаются под основными несущими конструкциями здания. Полная нагрузка от здания моделируется собственным весом железобетонных конструкций таким образом, чтобы среднее давление под подошвой составило 500 кПа.

Отличительной особенностью данной расчетной схемы является моделирование всех основных несущих элементов (свай, промежуточного распределительного слоя (ПРС), фундаментной плиты, оголовков свай, стен и перекрытий) без использования упрощающих предположений о поведении системы стержневых элементов и оболочек. Для постобработки усилий в сваях применялся специальный вид конечных элементов – *Virtual beam*, реализованный в *ПК MIDAS*.

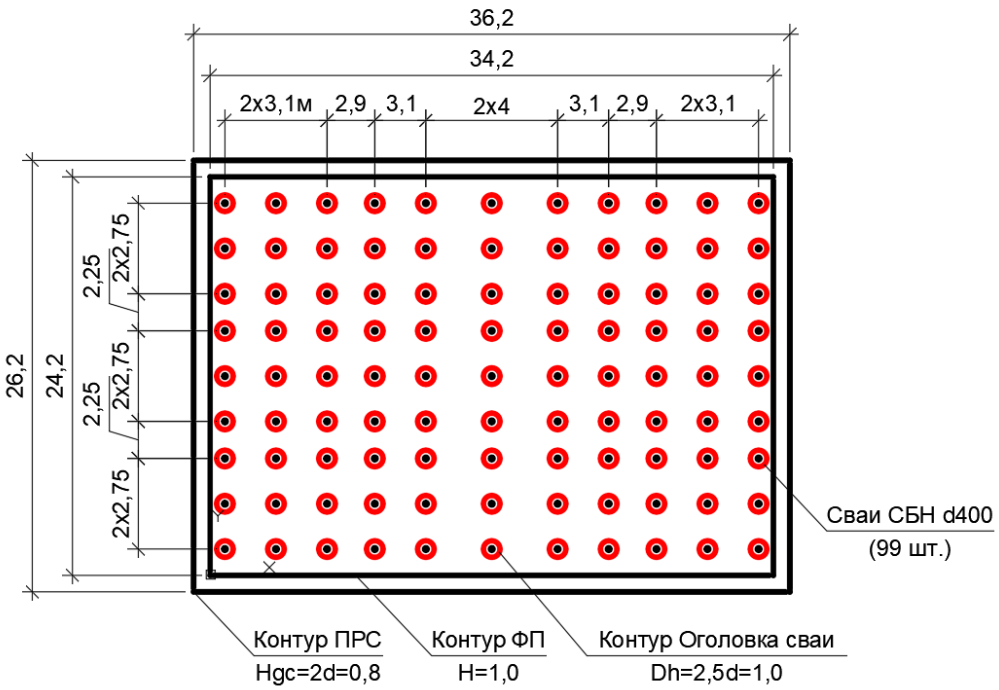


Рисунок 2.52 – Схема фундаментной плиты и расположение свай в фундаменте

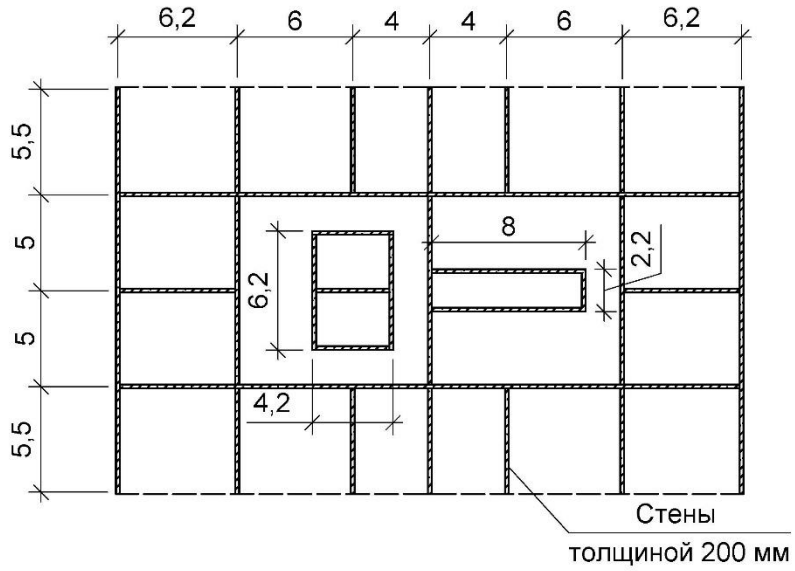


Рисунок 2.53 – Схема расположения стен типового этажа

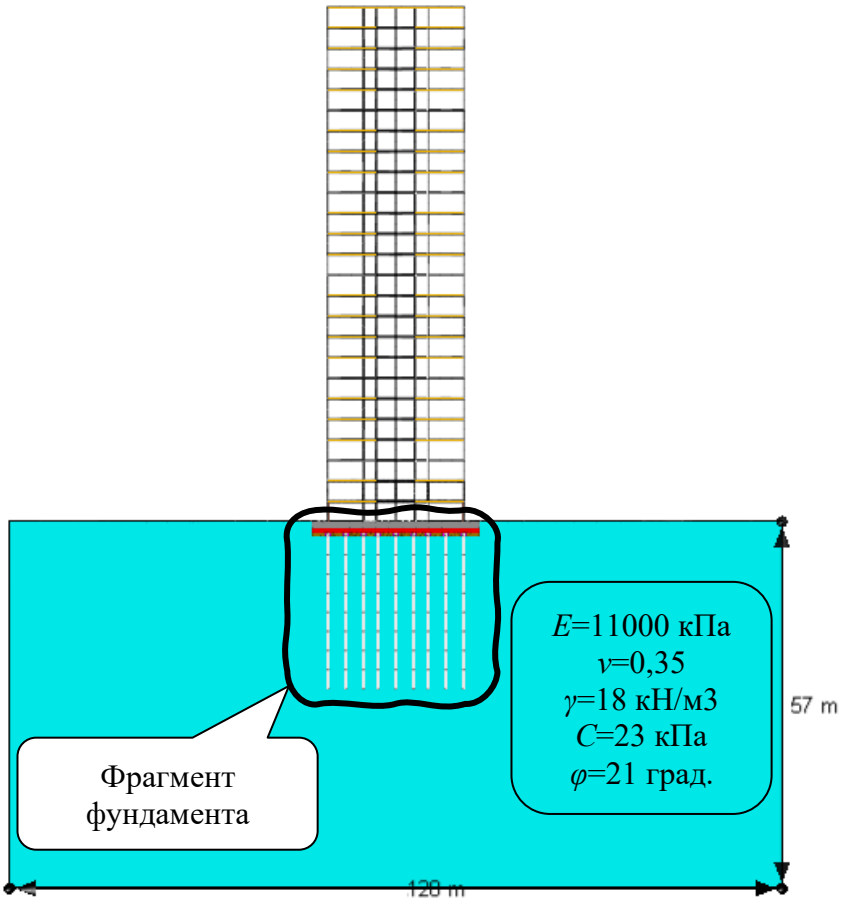


Рисунок 2.54 – Расчетная схема высотного здания в сейсмическом районе

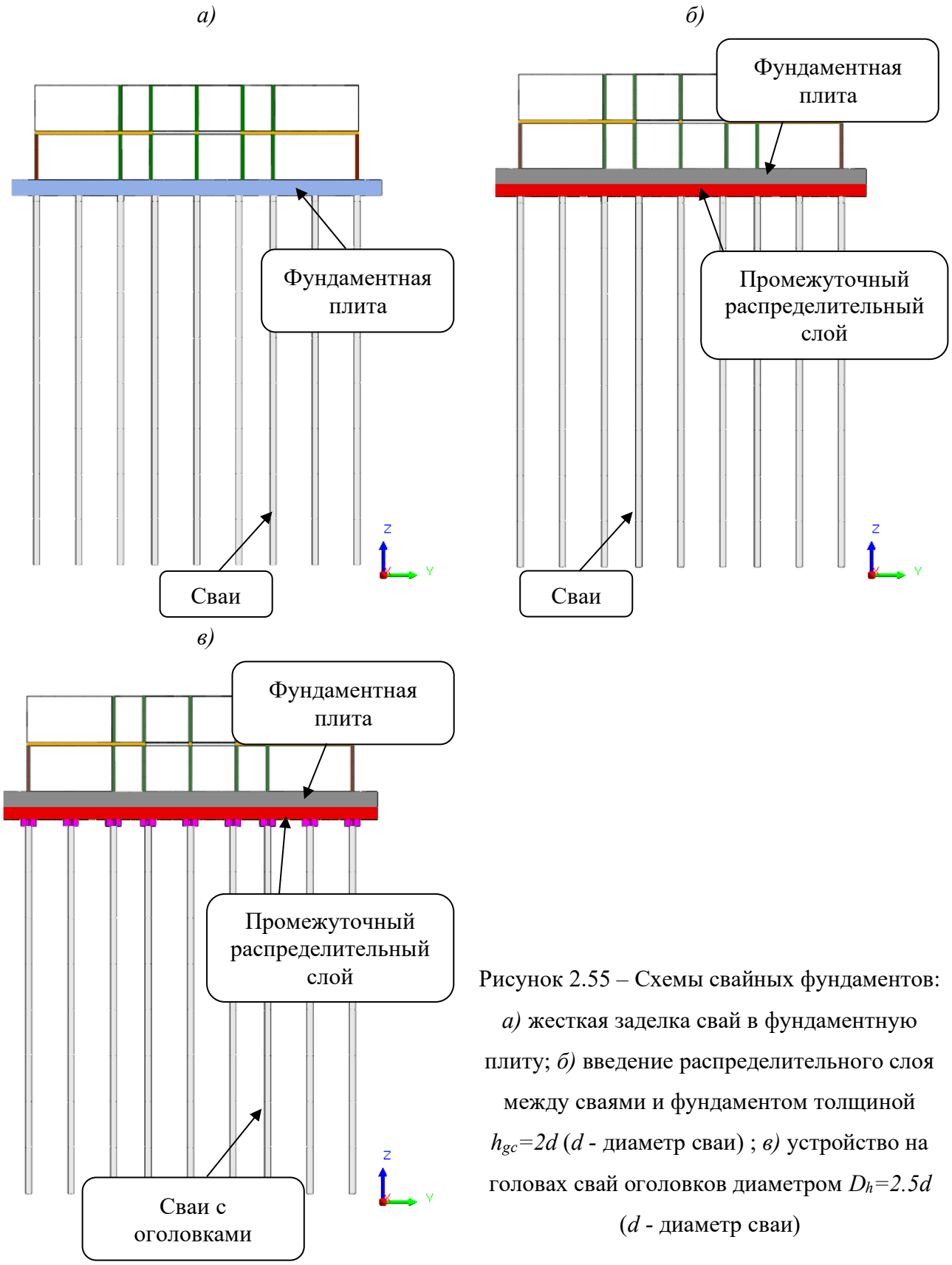


Рисунок 2.55 – Схемы свайных фундаментов: *а)* жесткая заделка свай в фундаментную плиту; *б)* введение распределительного слоя между сваями и фундаментом толщиной $h_{gc}=2d$ (d - диаметр сваи) ; *в)* устройство на головах свай оголовков диаметром $D_h=2.5d$ (d - диаметр сваи)

Для расчетов в *ПК MIDAS FEA NX* была подготовлена модель основания габаритами 120 (B) м *x* 150 (L) м *x* 57 (H) м. Модель грунтового основания

представлена суглинком с физико-механическими свойствами: E=11000 кПа; ν=0,35; γ=18 кН/м^3; C=23 кПа; φ=21 град.

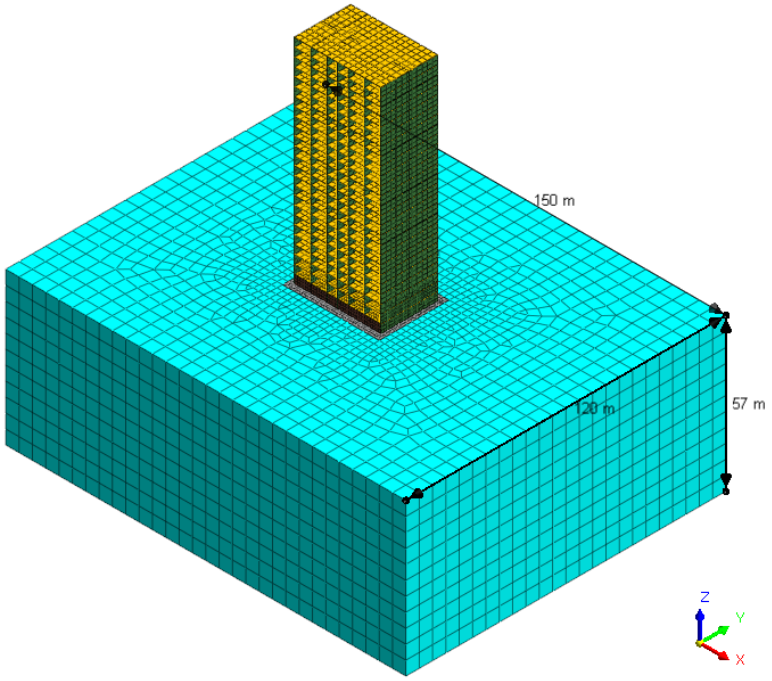
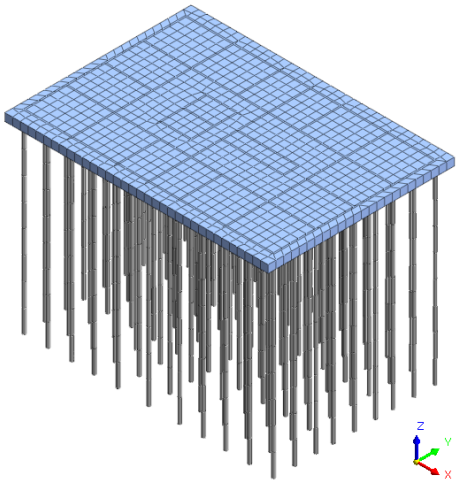


Рисунок 2.56 – Расчетная схема высотного здания совместно с основанием в *ПК MIDAS*

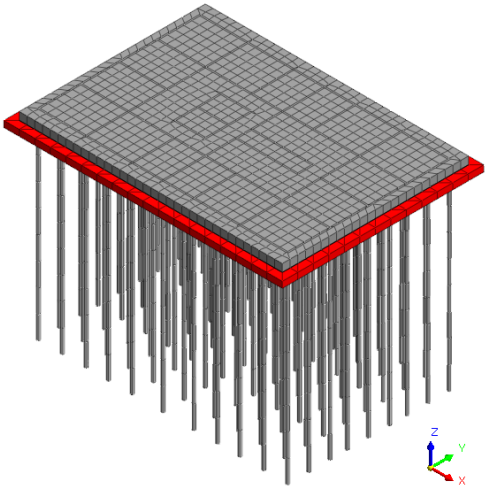
Для случая с промежуточным распределительным слоем описание работы грунта распределительного слоя ведется – упругопластической моделью Мора–Кулона, которая представлена песчаным грунтом с физико-механическими свойствами: E=30 МПа; ν=0,3; γ=20 кН/м^3; C=1 кПа; φ=30 град. При динамическом расчете свойства грунтов принимались с повышенной жесткостью, что обусловлено работой грунтов при кратковременных воздействиях. Данное допущение учитывает реологические особенности грунтов и влияние скорости нагружения, обеспечивая более корректное моделирование взаимодействия конструкций с основанием в условиях сейсмических нагрузок.

Выбор модели описания работы грунта обоснован возможностями программного комплекса и уровнем решаемой задачи, а именно: поэтапное возведение конструкций с последующим учетом стадии приложения сейсмической нагрузки, заданной акселерограммой, при прямом нелинейном динамическом расчете.

а)



б)



в)

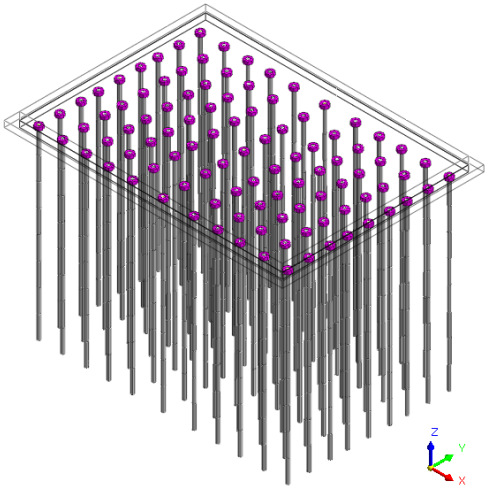


Рисунок 2.57 – Конечно-элементные схемы свайных фундаментов:
а) жесткая заделка свай в фундаментную плиту; *б)* введение распределительного слоя между сваями и фундаментом толщиной $h_{gc}=2d$ (d - диаметр сваи) ; *в)* устройство на головах свай оголовков диаметром $D_h=2.5d$ (d - диаметр сваи)

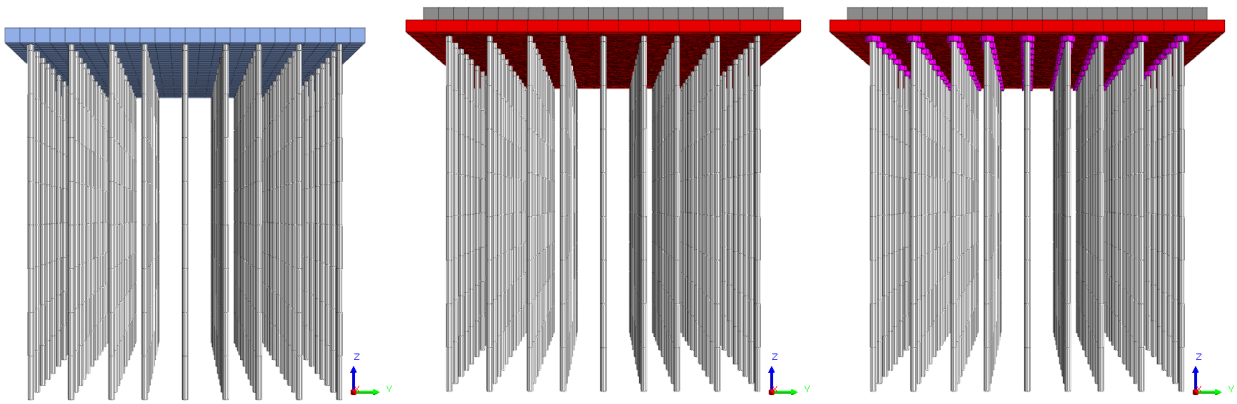


Рисунок 2.58 – Поперечный вид на рассматриваемые фундаменты

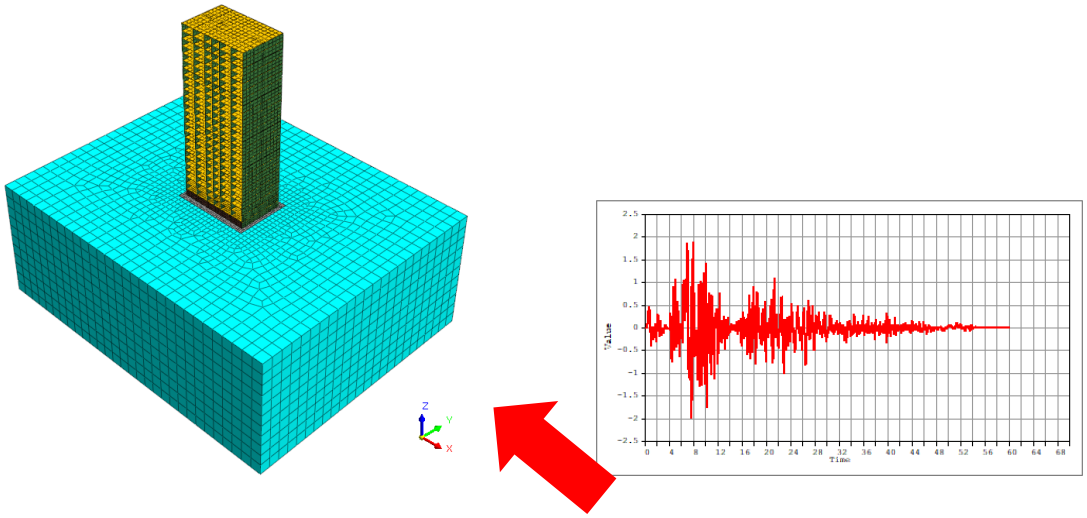


Рисунок 2.59 – Схема приложения сейсмической нагрузки

Сейсмическое воздействие было направлено вдоль оси X. Для нижней границы модели установлены условия неподвижного основания (*Fixed base*), что позволило смоделировать опирание конструкции на несжимаемое основание, такое как скальные грунты, характерные для южной части Краснодарского края. Боковые границы были заданы с использованием элементов свободного поля (*Free-field*), имитирующих естественное распространение сейсмических волн в грунте без влияния отражения колебаний.

Одним из важных этапов проведения расчетов на сейсмические воздействия является исследование собственных частот и форм колебаний сооружения. Модальный анализ позволяет определить важные динамические характеристики системы: формы колебаний, периоды (частоты), коэффициенты участия масс и другие параметры, которые зависят от распределения массы и жесткости конструкции. Собственные периоды определяются как время, необходимое сооружению для совершения колебания от естественного состояния до заданной формы с использованием собственного значения, которое 1:1 соответствует естественной форме.

Обобщенный критерий сейсмостойкого проектирования требует, чтобы в расчете были учтены формы, вовлекающие более 90% от всей массы сооружения. Такой подход позволяет учесть большинство главных форм колебаний, определяющих результаты расчета.

В результате проведенного совмещенного поэтапного расчета с динамическим воздействием на модель высотного здания удалось наиболее корректно установить формирование НДС грунтового массива, выявить различия в работе двух видов фундаментов (*СПФ* и ПРС), а также оценить влияние свайных оголовков на получаемый результат.

Поэтапный расчет имел ряд стадий, которые моделировали сейсмическое события. Первоначально была рассмотрена начальная стадия, где были определены бытовые напряжения в массиве грунта. После начального НДС системы вводились стадии разработки котлована, устройства свай (в том числе с учетом оголовков), фундаментной плиты, а также промежуточного распределительного слоя.

Сейсмическое событие было приложено на протяжении 14 секунд и имело шаг интегрирования по времени 0,02 сек., данный подход позволил в течение заданного времени проанализировать каждое значение ускорения заданной акселерограммы.

Далее приведено сравнение усилий в сваях (абсолютные значения) при их жесткой заделке в фундамент и при использовании промежуточного слоя, в том числе с учетом свайных оголовков (рис. 2.61-2.63). При помощи *Virtual beam* из объемных напряжений сформируем усилия в угловых, краевых и центральных сваях (рис. 2.60) в уровне верха свай.

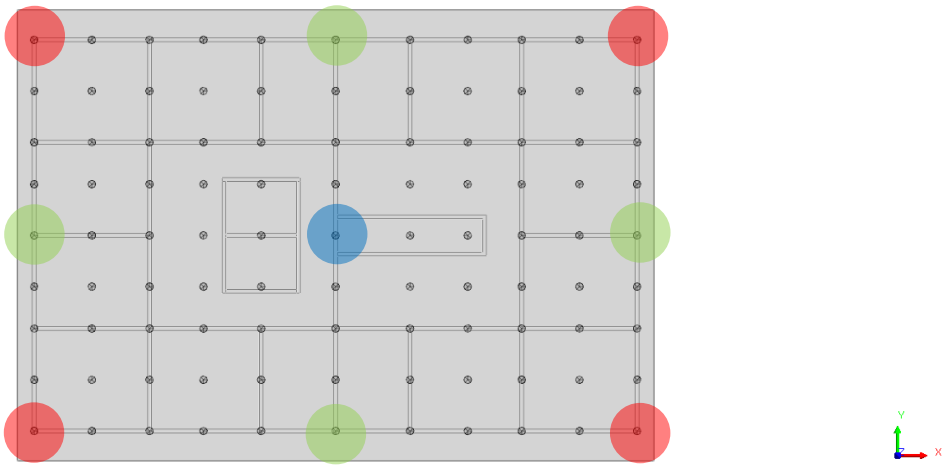


Рисунок 2.60 – Схема рассматриваемых свай: красным – угловые; зеленым – краевые, синим – центральная

Проанализированы усилия во времени в уровне верха угловой, краевой и центральной свай при проявлении сейсмического события.

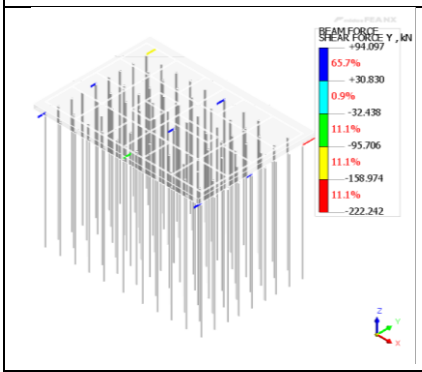
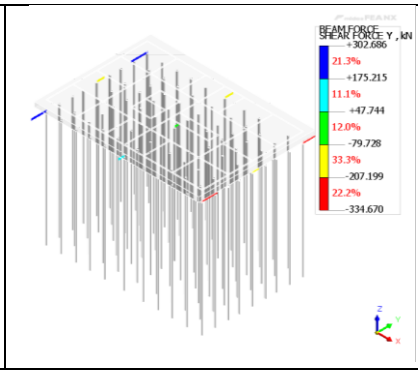
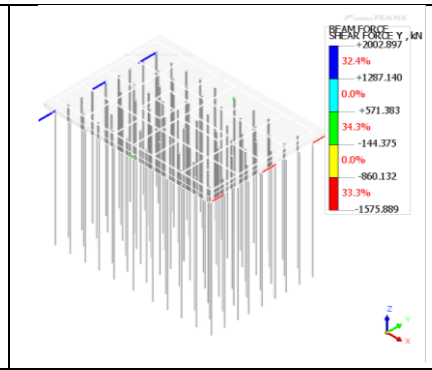
Горизонтальные усилия вдоль OX, кН		
		
ПРС	ПРС с оголовками	*СПФ*

Рисунок 2.61 – Интенсивность 0,1g

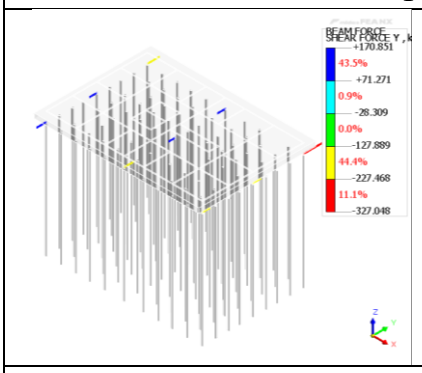
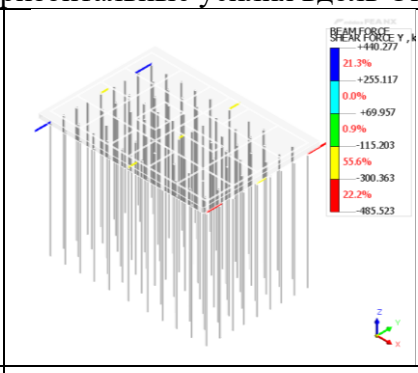
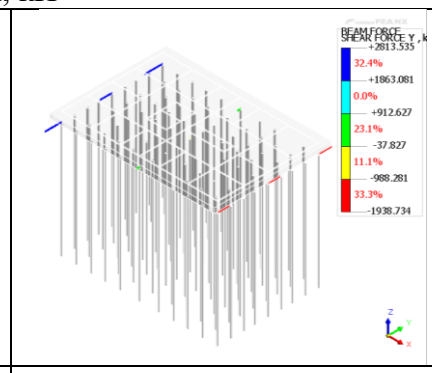
Горизонтальные усилия вдоль OX, кН		
		
ПРС	ПРС с оголовками	*СПФ*

Рисунок 2.62 – Интенсивность 0,2g

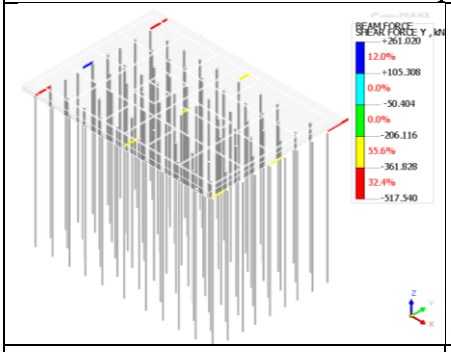
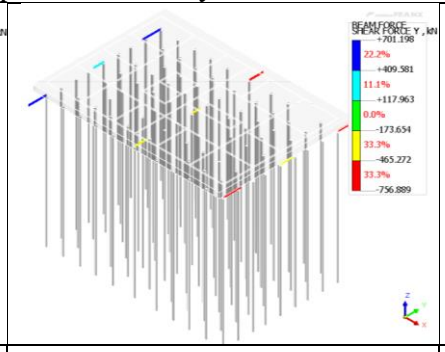
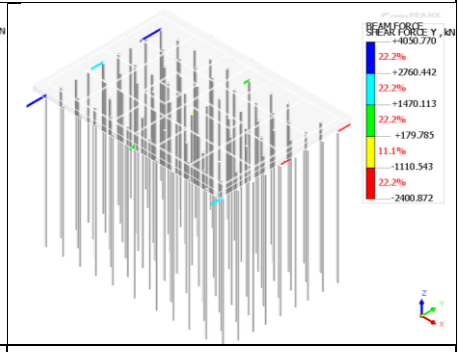
Горизонтальные усилия вдоль OX, кН		
		
ПРС	ПРС с оголовками	*СПФ*

Рисунок 2.63 – Интенсивность 0,4g

2.7.1. Интенсивность сейсмического события 0,1g

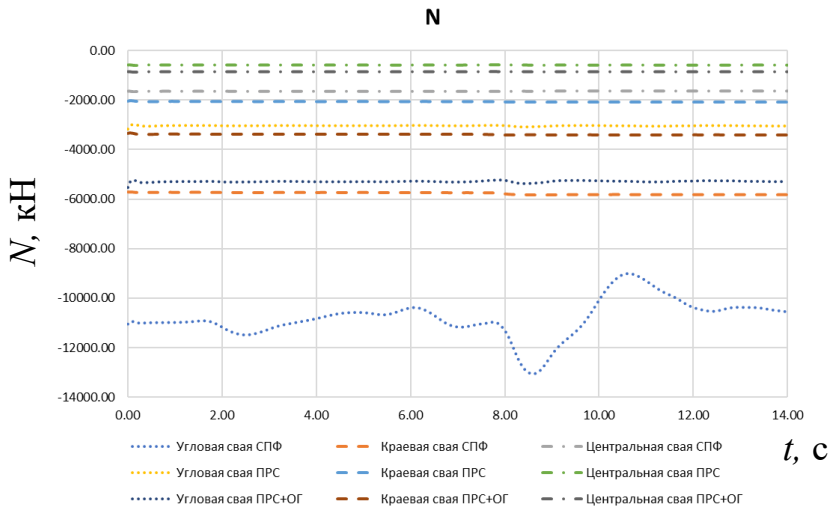


Рисунок 2.64 – Сжимающие усилия *N,* кН в сваях фундамента в заданных точках

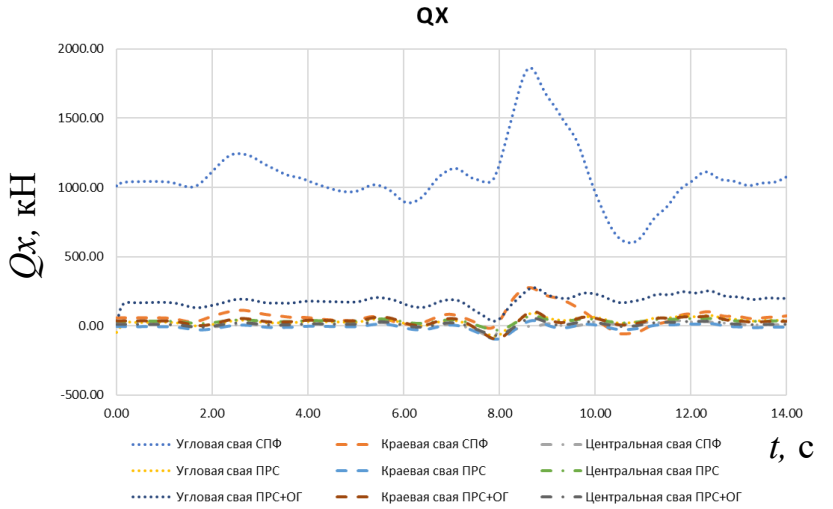


Рисунок 2.65 – Горизонтальные усилия Q_X, кН в сваях фундамента в заданных точках

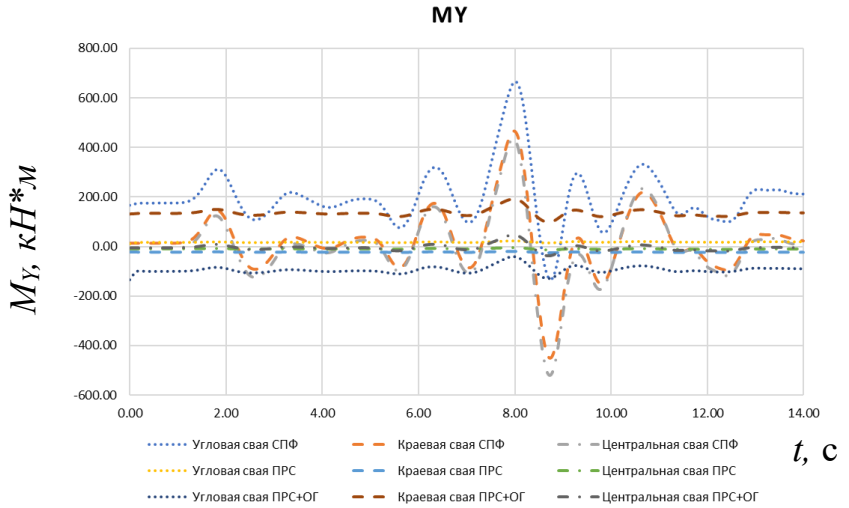


Рисунок 2.66 – Изгибающие моменты M_Y, кН*м в сваях фундамента в заданных точках

Интенсивность сейсмического события 0,2g

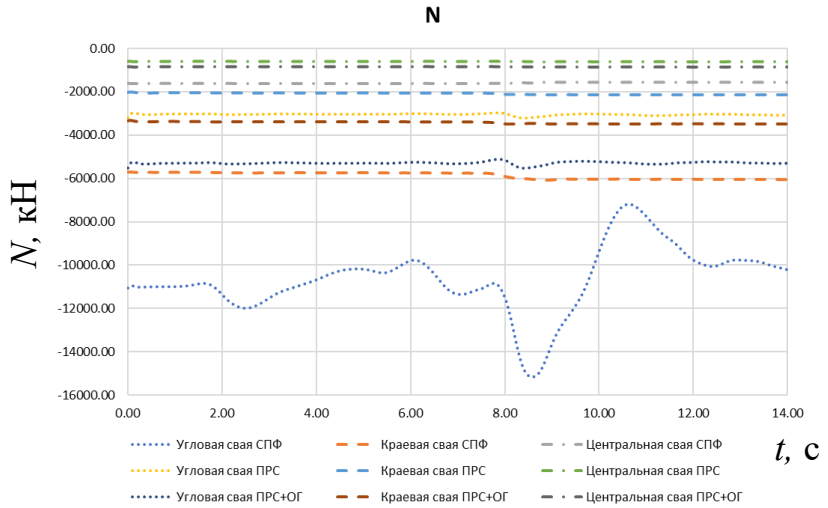


Рисунок 2.67 – Сжимающие усилия *N,* кН в сваях фундамента в заданных точках

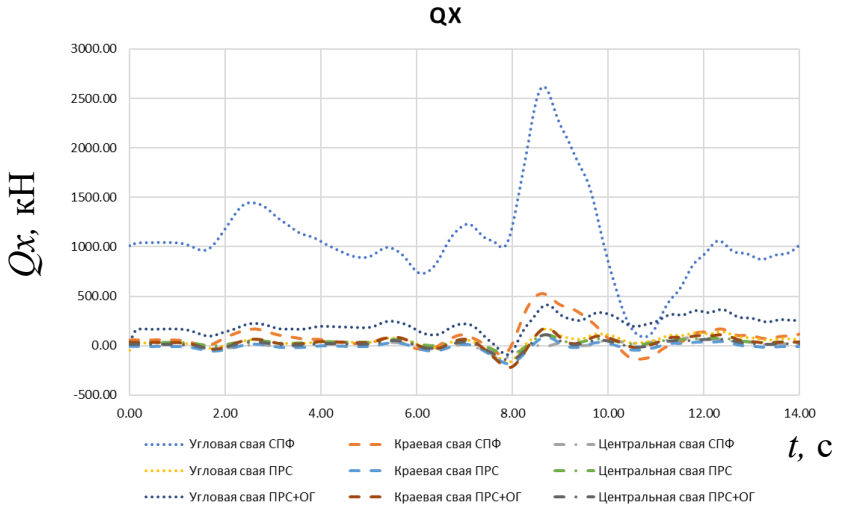


Рисунок 2.68 – Горизонтальные усилия Q_X, кН в сваях фундамента в заданных точках

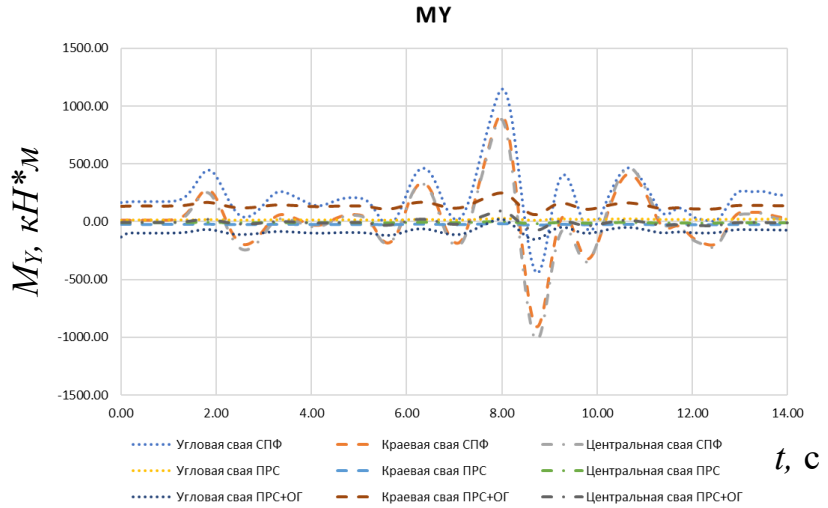


Рисунок 2.69 – Изгибающие моменты M_Y, кН*м в сваях фундамента в заданных точках

2.7.2. Интенсивность сейсмического события 0,4g

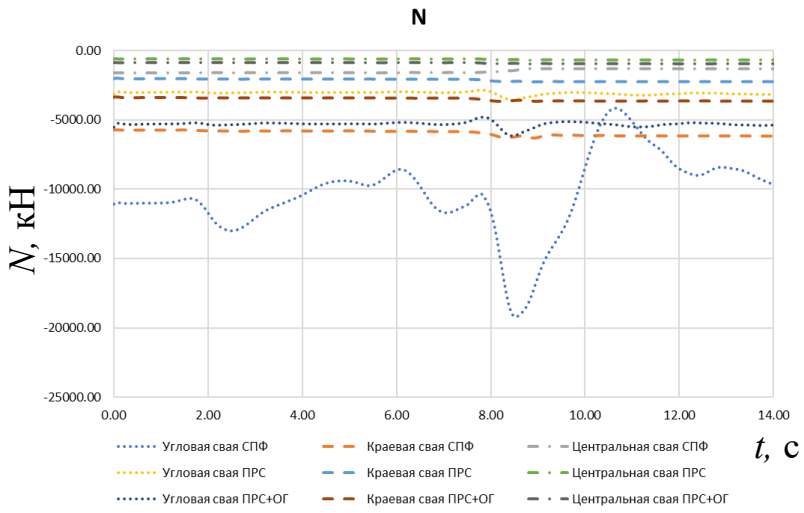


Рисунок 2.70 – Сжимающие усилия *N,* кН в сваях фундамента в заданных точках

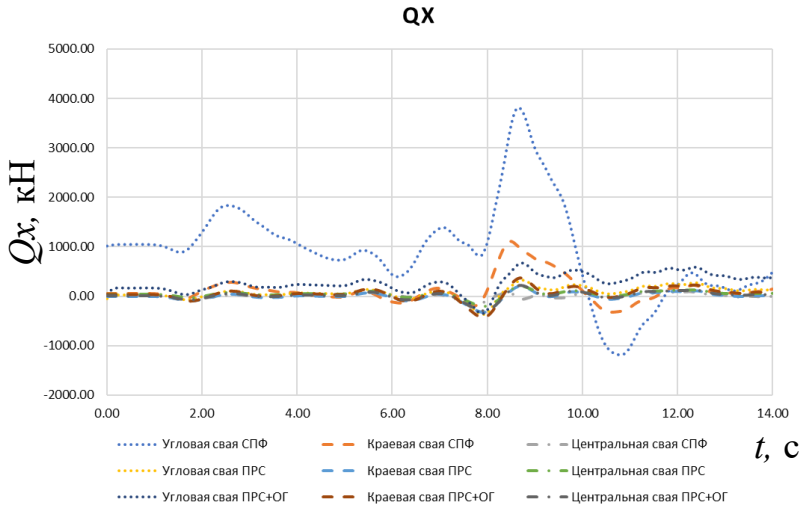


Рисунок 2.71 – Горизонтальные усилия Q_X, кН в сваях фундамента в заданных точках

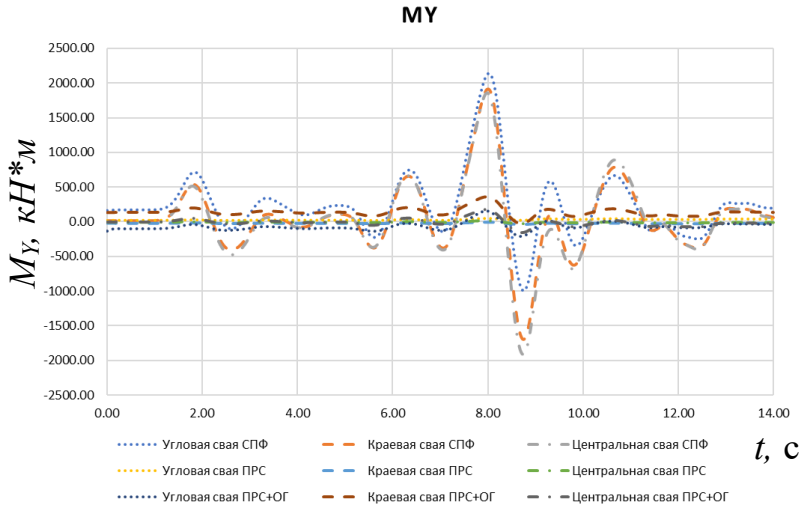


Рисунок 2.72 – Изгибающие моменты M_Y, кН*м в сваях фундамента в заданных точках

В результате построения графиков изменения усилий в сваях при различных технических решениях фундаментов установлено, что введение промежуточного распределительного слоя принципиально меняет усилиях в сваях. Из анализа усилий в сваях можно сделать вывод о высокой эффективности рассматриваемого метода в условиях сейсмических нагрузок (см. табл. 2.11).

Таблица 2.11 – Таблица значений сжимающих сил *N*, кН, в центральной, краевой и угловой сваях для сейсмичности *7-9 баллов*

Сейсмичность	Расположение сваи	Жесткая заделка	ПРС	ПРС+ОГ	Отношение сжимающих усилий N			
		N_{cprf}, *кН*	N_{gc}, *кН*	N_{gc_h}, *кН*	N_{cprf}/N_{gc}, *д.е.**	N_{cprf}/N_{gc_h}, *д.е.**	Ave_N_{cprf}/Ave_N_{gc}, *д.е.***	$Ave\_N_{cprf}/Ave\_N_{gc\_h}$, *д.е.***
7 баллов	Угловая	13070.42	3175.19	5522.70	4.12	2.37	3.56	2.04
	Краевая	5820.02	2077.71	3417.91	2.80	1.70	2.79	1.70
	Центр-ная	1635.57	602.90	871.45	2.71	1.88	2.73	1.91
8 баллов	Угловая	15153.81	3194.43	5536.80	4.74	2.74	3.50	2.01
	Краевая	6078.72	2133.36	3492.93	2.85	1.74	2.81	1.71
	Центр-ная	1635.57	612.17	876.24	2.67	1.87	2.68	1.87
9 баллов	Угловая	19203.85	3577.09	6136.39	5.37	3.13	3.36	1.95
	Краевая	6332.70	2271.99	3683.43	2.79	1.72	2.77	1.69
	Центр-ная	1635.57	672.92	978.19	2.43	1.67	2.40	1.66

* – Соотношение пиковых значений сжимающих усилий в отдельной свае при сравнении типов фундаментов за период сейсмического воздействия (14 секунд, шаг расчёта 0,02 с).
** – Соотношение усреднённых показателей сжимающих усилий в конкретной свае при аналогичных условиях моделирования.

Сравнение возникающих сжимающих сил в сваях для фундаментов с ПРС и тех же фундаментов с учетом устройства оголовков выявляет значительные различия в их значениях для двух вариантов.

Таблица 2.12 – Таблица значений горизонтальных сил *Qx*, кН, в центральной, краевой и угловой сваях для сейсмичности *7-9 баллов*

Сейсмичность	Расположение сваи	Жесткая заделка	ПРС	ПРС+ОГ	Отношение поперечных усилий *Qx*			
		Q_{x_cprf}, *кН*	Q_{x_gc}, *кН*	$Q_{x\_gc\_h}$, *кН*	Q_{x_cprf}/Q_{x_gc}, *д.е.**	$Q_{x\_cprf}/Q_{x\_gc\_h}$, *д.е.**	$Ave\_Q_{x\_cprf}/Ave\_Q_{x\_gc}$, *д.е.***	$Ave\_Q_{x\_cprf}/Ave\_Q_{x\_gc\_h}$, *д.е.***
7 баллов	Угловая	1865.45	91.70	274.86	20.34	6.79	29.68	5.99
	Краевая	275.52	95.09	102.05	2.90	2.70	5.11	1.89
	Центр-ная	68.87	69.77	69.04	0.99	1.00	0.41	0.75
8 баллов	Угловая	2615.70	170.85	410.67	15.31	6.37	18.08	5.05
	Краевая	522.84	180.21	218.93	2.90	2.39	4.14	1.98
	Центр-ная	133.36	111.32	146.91	1.20	0.91	0.64	0.85
9 баллов	Угловая	3804.58	372.36	672.61	10.22	5.66	9.49	3.65
	Краевая	1103.05	330.74	431.44	3.34	2.56	3.48	1.82
	Центр-ная	236.81	207.97	290.63	1.14	0.81	0.61	0.61

* – Соотношение пиковых значений горизонтальных усилий в отдельной свае при сравнении типов фундаментов за период сейсмического воздействия (14 секунд, шаг расчёта 0,02 с).
** – Соотношение усреднённых показателей горизонтальных усилий в конкретной свае при аналогичных условиях моделирования.

При сравнении горизонтальных сил в рассматриваемых сваях было установлено, что введение промежуточного распределительного слоя существенно снижает горизонтальную нагрузку на сваи во время сейсмических событий. Также установлено, что с увеличением сейсмичности, эффективность от устройства ПРС несколько снижается: при сейсмичности 7 баллов горизонтальная нагрузка уменьшается до 20 раз, а при 9 баллах – до 10 раз. Это означает, что промежуточный слой и продолжает оставаться эффективным при более сильных землетрясениях, но степень его влияния становится менее выраженной.

Добавление оголовков к промежуточному распределительному слою изменяет характер распределения нагрузок. Введение оголовков приводит к увеличению горизонтальной силы в головах свай, что снижает эффективность снижения горизонтальных усилий до 5-6 раз по сравнению с вариантом без оголовков.

Таблица 2.13 – Таблица значений изгибающих моментов *My*, кН*м, в центральной, краевой и угловой сваях для сейсмичности *7-9 баллов*

Сейсмичность	Расположение сваи	Жесткая заделка	ПРС	ПРС+ОГ	Отношение изгибающих моментов M_y			
		M_{y_cprf}, *кН*	M_{y_gc}, *кН*	$M_{y\_gc\_h}$, *кН*	M_{y_cprf}/My_gc, *д.е.**	M_{y_cprf}/My_gc_h, *д.е.**	$Ave\_M_{y\_cprf}/Ave\_M_{y\_gc}$, *д.е.***	$Ave\_M_{y\_cprf}/Ave\_M_{y\_gc\_h}$, *д.е.***
7 баллов	Угловая	664.19	22.81	133.06	29.11	4.99	11.23	2.19
	Краевая	464.49	26.82	192.79	17.32	2.41	3.75	0.64
	Центр-ная	519.10	13.86	46.43	37.44	11.18	9.50	9.27
8 баллов	Угловая	1148.29	29.02	153.62	39.57	7.47	12.05	2.83
	Краевая	917.60	31.02	248.77	29.58	3.69	7.23	1.24
	Центр-ная	1021.49	19.00	94.83	53.75	10.77	17.95	10.07
9 баллов	Угловая	2138.69	43.42	208.90	49.25	10.24	13.90	4.67
	Краевая	1915.19	38.93	355.50	49.19	5.39	13.95	2.42
	Центр-ная	1912.78	29.76	177.64	64.28	10.77	30.06	9.53

* – Соотношение пиковых значений изгибающих моментов в отдельной свае при сравнении типов фундаментов за период сейсмического воздействия (14 секунд, шаг расчёта 0,02 с).
** – Соотношение усреднённых показателей изгибающих моментов в конкретной свае при аналогичных условиях моделирования.

При анализе результатов, полученных для изгибающих моментов в сваях, выявлена тенденция, аналогичная распределению горизонтальных сил. Применение промежуточного распределительного слоя (ПРС) приводит к значительному снижению изгибающих моментов в сваях, уменьшая их в 30-60 раз при сейсмичности 7–9 баллов. Это указывает на высокую эффективность ПРС в перераспределении сейсмических нагрузок и снижении воздействия на отдельные сваи. Введение оголовков снижает изгибающие моменты до 5–10 раз при той же сейсмичности. Вероятно, это связано с тем, что оголовки усиливают концентрацию сжимающих нагрузок в верхней части свай, что приводит к увеличению изгибающих моментов в этой зоне. Корректность этих выводов подтверждается публикациями зарубежных ученых на эту тему [104, 112, 113].

Таким образом, использование только ПРС без оголовков является более эффективным для уменьшения изгибающих моментов в сваях при сейсмических воздействиях, но применимо только для случаев с обеспечением условия

продавливания сваей материала ПРС. Добавление оголовков требует дополнительного анализа в ходе дальнейших исследований, так как они могут снизить эффективность ПРС и увеличить нагрузки на сваи во время сейсмических событий.

2.8. Выводы по Разделу 2

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.

2. Устройство железобетонных оголовков свай размером *1,5–2,5d* 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 1,5–2,5d (где d – диаметр свай) в сравнении с решениями без оголовков для межсвайного расстояния 5-7d.

3. 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 сейсмических районах.

3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОМЕЖУТОЧНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО СЛОЯ (ПРС) СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА

Расчет промежуточного распределительного слоя (ПРС), расположенного между фундаментной плитой и грунтовым основанием (ГО), производился на основе уравнений статического равновесия с учетом условий для осадки фундамента.

Основным условием расчета фундамента по деформациям является ограничение осадки основания предельным для данного здания значением [48]:

$$s_f \leq s_u \tag{3.1}$$

где s_f и s_u − осадка фундаментной плиты и ее предельное значение для данного сооружения, соответственно.

Нагрузка от здания на основание фундамента вызывает осадку фундаментной плиты s_f, осадку свай s_P и осадку ГО s_b. Над сваями ПРС возникают области уплотненного грунта [98]. Их осадку обозначим величиной s_{gc}, которая удовлетворяет уравнению совместности осадок:

$$s_f = s_{gc} + s_P + s_b \tag{3.2}$$

где s_Pи s_b – осадки свай и ГО, соответственно, определенные по методике [24].

Аналитический метод реализуется при соблюдении условий:

$$P \leq R_{gc}\,;\; P_b \leq R\,;\; \tau_{max} \leq \tau_{lim} = R_{gc} \cdot tg(45 - \frac{\varphi_{gc}}{2})$$

где:

R_{gc} – предел прочности на одноосное сжатие ПРС*;*

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;

φ_{gc}– угол внутреннего трения материала ПРС.

3.1. Описание модели деформации материала ПРС

Нагружение фундаментной плиты весом здания приводит к сжатию ПРС, расположенному между плитой и грунтовым основанием (ГО). Поверхность основания принимаем на одном уровне с головой сваи, обозначенной отрезками AB и A_1B_1 на рисунке 3.1.

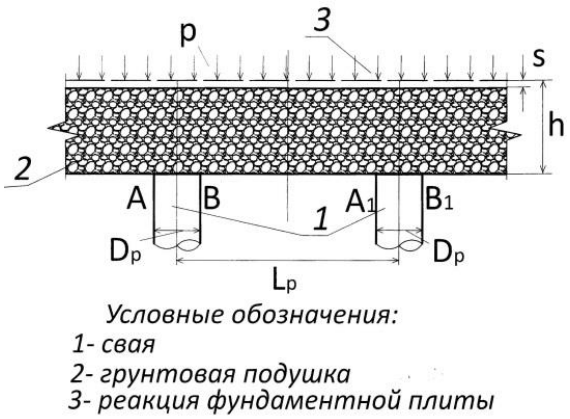


Рисунок 3.1 – Сечение вертикальной плоскостью свайного фундамента с промежуточным распределительным слоем (ПРС) по [24]

При нагружении материал ПРС разрушается по схеме пробоя полосы [58]. Роль полосы выполняет ПРС, штампа – голова сваи. Материал ПРС разрушается сдвигом при сжатии в области, огибающие поверхности скольжения которой образуют криволинейный треугольник (в разрезе), или криволинейный конус – в пространственном изображении. При росте нагрузки область разрушения трансформируется в «несущий столб» уплотненного материала ПРС (рис. 3.2) [4, 10, 98].

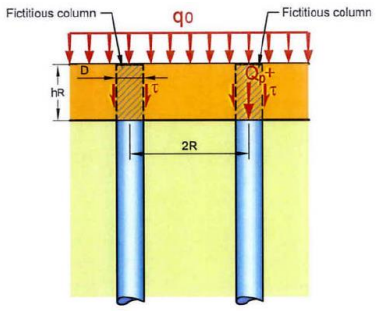


Рисунок 3.2 – Схема «несущего столба» грунта по [98]:
q_0 – вертикальная нагрузка на ПРС; h_R – высота ПРС; D – диаметр «несущего столба»; Q_p – нагрузка на оголовок сваи; τ – касательные силы на границах «несущего столба»

«Несущий столб» расширяется в стороны, по мере роста нагрузки [4], причем это расширение имеет больший размер в той его части, которая ближе к свае, как и в случае с действием штампа на ограниченный по толщине слой (рис. 3.3).

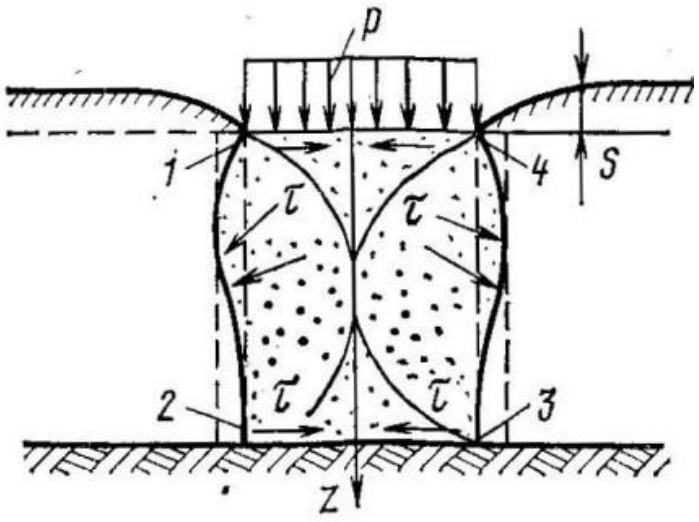


Рисунок 3.3 – Идея «несущего столба» грунта по [4]:
P − вертикальная нагрузка на ПРС; S – осадка «несущего столба»; τ – касательные силы на границах «несущего столба».

Описанные выше представления позволяют построить инженерный метод описания распределения усилий в ПРС и обосновать способ воздействия на него путем применения оголовков на сваях.

«Несущий столб» расширяется до размеров, при которых он способен воспринять нагрузку от фундаментной плиты на части ее площади. При этом напряжения в нем уменьшаются по направлению к периферии «несущего столба», в соответствии с распределением напряжений в грунте под штампом [29, 56] (рис. 3.4).

Одновременно с этим, вблизи головы сваи, под действием концентрации напряжений от сваи, возникают области предельного равновесия в ПРС и ГО. Они могут быть описаны схемами действия штампа, в роли которого выступает голова сваи, на упругое полупространство [10, 51, 56, 57,59].

Строгое решение такой задачи сложно математически и затруднено из-за недостаточного экспериментального обоснования. В настоящей работе она

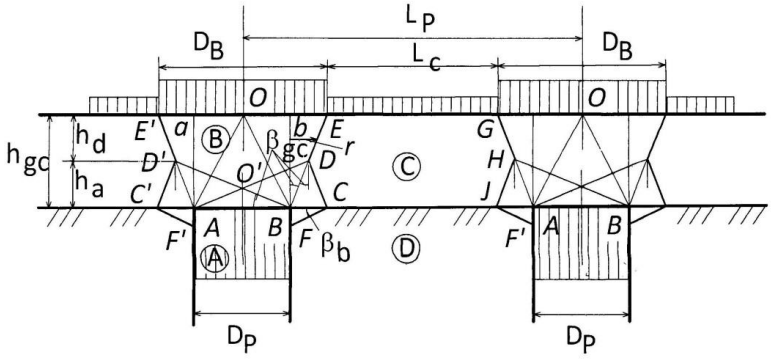
решается приближенным методом, заключающимся в том, что области предельного равновесия ограничиваются кинематически возможными огибающими, имеющими форму прямых линий [10]. Действующие на огибающих поверхностях усилия выражены, в итоге, в силах.

Примем по [24], что расчетная ячейка фундамента состоит из 4-х буровых висячих 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 сваей, область (*C*) уплотненного материала ПРС между 4-мя областями (*B*), область (*D*) грунта ГО между сваями (рис. 3.4). Эти области ограничены возможными кинематически огибающими, имеющими форму прямых линиями. Введенные обозначения других элементов ячейки фундамента соответствуют таковым в [24].

Примем, что размеры «несущего столба» определяются лучами *AE′* и *BE*, отклоняющимися от вертикали на угол β_{gc} [98], где $\beta_{gc} = \pi/4 - \phi_{gc}/2$, а ϕ_{gc} − угол внутреннего трения материала ПРС. «Несущий столб» приобретает форму усеченного конуса, на нижнем основании которого действует нормальное напряжение от сваи $\sigma_{z.P}$, на верхнем – напряжение реакции $\sigma_{z.f}^{(P)}$ фундаментной плиты. Распределение обоих напряжений по основаниям примем равномерным, равным среднему значению. Напряжения в горизонтальных сечениях между основаниями распределены по эпюре с максимумом на оси «несущего столба», а периферии уменьшаются до значений, определяемых коэффициентом $k_\sigma < 1$.

Одновременно происходит разрушение материала ПРС и грунта ГО вблизи углов головы сваи − точек *A* и *B*. Вокруг этих точек, вследствие концентрации в них напряжений, образуются области предельного равновесия: *ABD′C′F′A* и *ABFCDA*, инициированные областью *ABO'* над головой сваи. Границами областей являются огибающие поверхности скольжения, представленные на сечении отрезками прямых: *AO'* и *BO'* − под углом $(\pi/2 - \beta_{gc})$ к оси сваи, *CD* и *C′D′* – под углом β_{gc} к оси сваи, *BC* и *C′F′* – под углом $(\beta_b = \pi/4 - \phi_b/2)$ к поверхности ГО, где ϕ_b− угол внутреннего трения грунта ГО.

а)



б)

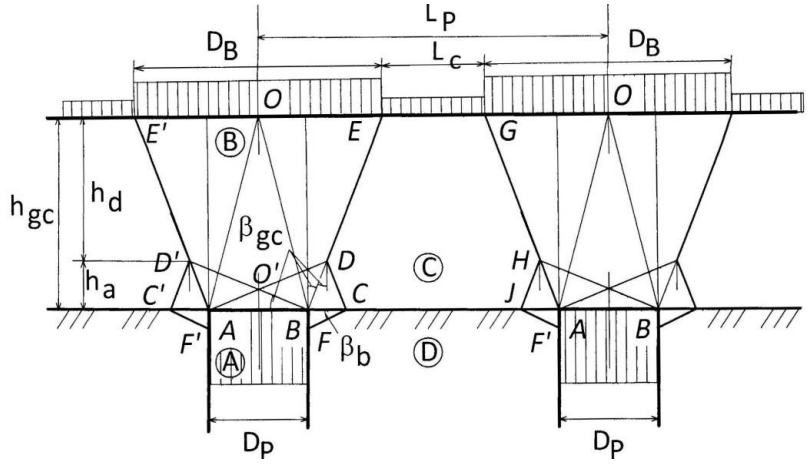


Рисунок 3.4 – Схема к расчету ПРС для значений h_{gc}/D_P: *а) 1,0; б) 2,0:*

L_p – межосевое расстояние между сваями; L_c – расстояние между следами верхних оснований «несущих столбов»; D_B – диаметр верхнего основания «несущего столба»; D_p – диаметр головы сваи; h_{gc} – высота ПРС

Области предельного равновесия вблизи головы сваи сохраняют свои размеры для разных значений толщины ПРС (рис 3.4 *б*), как было показано в [98]. Область ПРС между «несущими столбами» (на сечении ограничена отрезками прямых *CDEGHJ*) находится в состоянии всестороннего сжатия под действием напряжения $\sigma_{z.f}^{(b)}$ от фундаментной плиты. Это напряжение примем как равномерно распределенное на участке плиты между бо̀льшими основаниями усеченных конусов.

3.2. Условия равновесия ПРС свайного фундамента

Основное условие равновесия фундамента выражается уравнением сил, действующих на выделенную ячейку [98]:

$$N_f = N_P + P_b \tag{3.3}$$

где N_f – вертикальная сила, действующая на выделенную ячейку фундамента от здания,

$$N_f = \sigma_f L_P^2 \tag{3.4}$$

σ_f – среднее напряжение на подошве фундаментной плиты от веса здания;

L_P – расстояние между осями свай в квадратной сетке плана свайного поля;

N_P и P_b – силы сопротивления сваи и грунта основания между сваями, приходящиеся на выделенную ячейку фундамента, соответственно.

Выделим четыре взаимодействующих грунтовых тела (рисунок 3.5):

(*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.

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

$$N_f = N_{f.B} + N_{f.C} \tag{3.5}$$

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. 3.5).

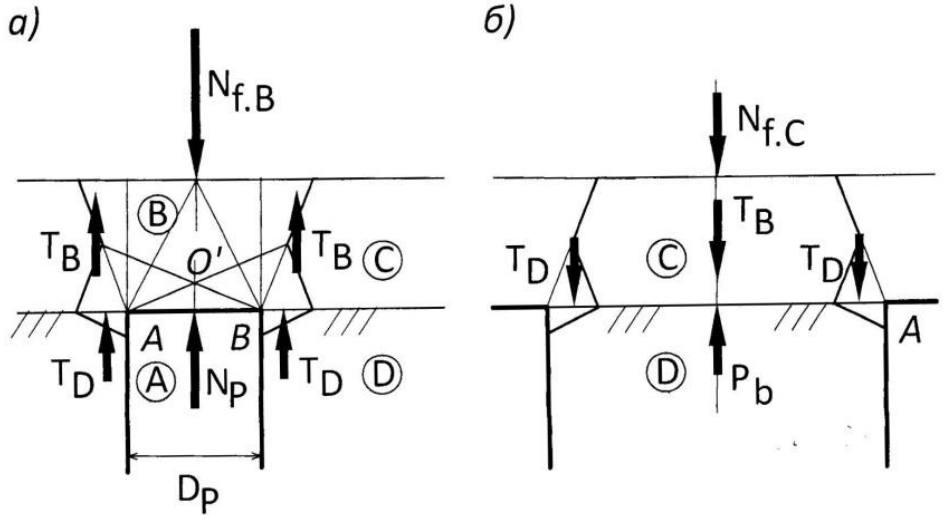


Рисунок 3.5 – К расчету ПРС схема сил, действующих на: *а)* тело (*B*), *б)* тело (*C*): N_P – равнодействующая реакции сваи на площадке *AB*; T_B – равнодействующая реакции внутреннего трения на поверхности конуса *CD*; T_D – равнодействующая реакции ГО на кольцевой площадке *BC*

Условие равновесия тела (*B*) запишем в виде:

$$N_{f.B} - N_P - T_B - T_D = 0 \qquad (3.6)$$

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. 3.5 *а*).

Силы T_B и T_D показаны двумя векторами, чтобы обозначить на сечении места приложения распределенных усилий. Их равнодействующие располагаются по оси сваи, как это сделано для T_B на рисунке 3.5б.

Условие равновесия тела (*C*) (рисунок 3.5б) запишем в виде:

$$N_{f.C} - P_b + T_D + T_B = 0 \qquad (3.7)$$

Суммирование уравнений (3.6) и (3.7) дает, с учетом уравнения (3.5), уравнение (3.3), т. е. условие равновесия фундамента, в целом, сохраняются, а силы T_B и T_D являются внутренними для него, их алгебраическая сумма равна нулю.

3.3. Расчет сил, действующих в ПРС свайного фундамента

Величины T_B и T_D вычисляются как вертикальные составляющие результирующих предельных сдвигающих сил на конических поверхностях в области (B) (рисунок 3.5). Для их вычисления необходимо сделать ряд допущений.

1. Примем, что «несущий столб» материала ПРС представляет собой цилиндр с образующими Aa и Bb (рис. 3.4), на стенки которого действует внутреннее боковое давление $\sigma_r(D_P/2)$, вызванное сжатием виртуального цилиндра напряжениями $\sigma_{f.B}$ и σ_P [4]. При этом боковое давление имеет радиальное направление и определяется как производное от осевого давления, с учетом его уменьшения к периферии «несущего столба», т. е. $r = D_P/2$:

$$\sigma_r = \sigma_z \xi_{gc}, \tag{3.8}$$

а осевое давление изменяется вдоль оси цилиндра по закону:

$$\sigma_z(z) = k_\sigma[\sigma_{f.B} + (a_2/h_{gc})z], \quad z \in [0; h_{gc}] \tag{3.9}$$

где $\sigma_z(z)$ − осевое давление внутри «несущего столба»,

$$a_2 = \sigma_P - \sigma_{f.B} \tag{3.10}$$

ξ_{gc} − коэффициент бокового давления материала ПРС в предельном по прочности состоянии [59],

$$\xi_{gc} = tg^2\phi_{gc} \tag{3.11}$$

φ_{gc} − угол внутреннего трения материала ПРС,

k_σ − коэффициент формы эпюры напряженийσ_zв горизонтальном сечении «несущего столба». Примем, что на периферии «несущего столба» k_σ=0,0095.

2. Боковое давление вызывает разрушение материала ПРС вокруг «несущего столба» поверхностями скольжения, напряжения на которых описаны в [29] в плоской постановке, в сечении, перпендикулярном оси цилиндра. В цилиндрических координатах r и θ эти напряжения имеют вид:

− радиальное напряжение

$$\sigma_r = c_1 r^{-m}(1 + sin\,\phi_{gc}) \tag{3.12}$$

− тангенциальное напряжение

$$\sigma_\theta = c_1 r^{-m}(1 - sin\,\phi_{gc}) \tag{3.13}$$

− среднее напряжение

$$\sigma = c_1 r^{-m} \tag{3.14}$$

где r – расстояние по радиусу от стенки «несущего столба» до рассматриваемой точки, θ − угол поворота радиуса от горизонтальной оси координат,

$$c_1 = \frac{\sigma_r}{1 + sin\,\phi_{gc}} \left(\frac{D_P}{2}\right)^m \tag{3.15}$$

$$m = \frac{2\,sin\,\phi_{gc}}{1 + sin\,\phi_{gc}} \tag{3.16}$$

Среднее напряжение вычисляется по формуле:

$$\sigma = (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)/3 \tag{3.17}$$

откуда получаем выражение для вертикального напряжения:

$$\sigma_z(r;\theta;z) = 3\sigma - \sigma_r - \sigma_\theta \tag{3.18}$$

Таким образом, формулы (3.8)–(3.18) связывают вертикальные напряжения $\sigma_z(r;\theta)$ на горизонтальных площадках, отстоящих от стенки «несущего столба» на расстоянии r, на глубине z от подошвы фундаментной плиты, с вертикальным напряжением (3.8) $\sigma_z(z)$ на той же глубине по оси «несущего столба». Напряжение $\sigma_z(z)$ в ПРС определяется параметрами свайного фундамента: диаметром свай D_P, их сопротивлением N_P, расстоянием между ними L_P – и нагрузкой от здания N_f [24]. Напряжение $\sigma_z(r;\theta)$ позволяет определить вертикальные составляющие внутреннего трения материала ПРС и грунта ГО на периферии области предельного состояния, созданной совместным действием фундаментной плиты и сваи.

3. Область предельного равновесия (ОПР) локализована вблизи головы сваи. Как показывают расчеты на численной модели [98], ОПР начинается вблизи

поверхностей сваи и окружает угол сваи между горизонтальной плоскостью головы и ее боковой поверхностью (рис. 3.6).

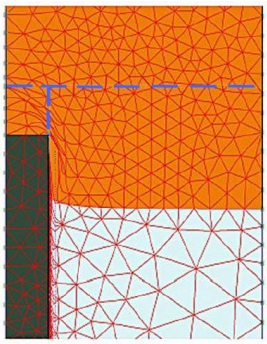


Рисунок 3.6 – Численная модель *МКЭ* к расчету деформаций материала ПРС и грунта ГО вокруг головы сваи по [98]

Примем, что ОПР материала ПРС ограничена ломаной *BCDO′D′C′A*, (рис. 3.4) причем отрезки *BD′* и *AD* наклонены к плоскости головы сваи под углом β_{gc}, ($\beta_{gc} = \pi/4 - \phi_{gc}/2$), а отрезки *BD* и *CD*, а также *AD'*и *C′D′* наклонены к вертикали под углом β_{gc}. Примем также, что ОПР в ГО вблизи головы сваи ограничена на сечении ломаными *DCF* и *AC′F′*, причем отрезки *DC* и *C′F′* наклонены к горизонтальной поверхности ГО под углом β_b, ($\beta_b = \pi/4 - \phi_b/2$), где ϕ_b – угол внутреннего трения грунта ГО.

Среднее вертикальное напряжение на горизонтальной площадке головы сваи рассчитывается по формуле:

$$\sigma_P = N_P/F_P \tag{3.19}$$

где F_P − площадь горизонтальной площадки головы сваи,

$$F_P = \pi D_P^2 \tag{3.20}$$

Среднее вертикальное напряжение на участке фундаментной плиты, являющемся верхним основанием «несущего столба», рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{f.B} = N_{f.B}/F_{f.B} \tag{3.21}$$

где $F_{f.B}$ − площадь горизонтальной площадки головы сваи, (рис. 3.4):

$$F_{f.B} = \pi D_{f.B}^2 \tag{3.22}$$

Диаметр площадки вычисляется по формуле:

$$D_{f.B} = D_P + 2h_{gc}tg\beta_{gc} \tag{3.23}$$

Напряжение на участке фундаментной плиты, между верхними основаниями «несущего столба», рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{f.C} = N_{f.C}/F_{f.C} \tag{3.24}$$

где $F_{f.C}$ − площадь горизонтальной площадки между верхними «несущего столба», (рис. 3.4):

$$F_{f.C} = L_P^2 - \pi D_{f.B}^2 \tag{3.25}$$

Грунтовое тело (*B*) формируется более интенсивно, чем грунтовое тело (*C*), так как в нем выше концентрация напряжений. Поэтому граница между этими телами определяется разрывом перемещений по поверхностям скольжения, следы которых в сечении представлены отрезками *CD* и *DE*, а также *C′D′* и *D′E′* (рис. 3.4). Напряжения сохраняют при этом непрерывность, поэтому перемещению по этим поверхностям препятствуют силы внутреннего трения T_B и T_{DE}. Первые намного больше, чем вторые, потому что в области *BDC* происходит более упорядоченное движение по поверхностям скольжения, чем в области *BOE*, и силой T_{DE} на поверхности *DE* можно пренебречь, по сравнению с силой T_B на поверхности *DC*.

Сила T_B вычисляется интегрированием напряжений $\sigma_z(r;\theta)$ на горизонтальных площадках, проходящих через точки отрезков *CD* и *C′D′*, т. е. на коническом поясе, образованном этими отрезками:

$$T_B = \int_{r_a}^{r_P} c_1 b_1 r^{-m} \pi (D_P + 2r) dr \tag{3.26}$$

или

$$T_B = \pi b_1 \left(\frac{D_P}{2}\right)^m \int_{r_a}^{r_P} (\sigma_{f.B} + \frac{a_2}{h_{gc}} z) r^{-m} (D_P + 2r) dr \tag{3.27}$$

где:

$$b_1 = \frac{tg^2\beta_{gc}k_\sigma}{1+sin\,\beta_{gc}} \tag{3.28}$$

$$r_a = \overline{BD}\,sin\,\beta_{gc} = D_P\frac{sin^2\,\beta_{gc}}{cos\,2\,\beta_{gc}} \tag{3.29}$$

$$r_P = 2r_a \tag{3.30}$$

Подстановкой

$$z = \frac{r-r_a}{tg\beta_{gc}} + h_d \tag{3.31}$$

или

$$z = rctg\beta_{gc} + a_1 \tag{3.32}$$

где $a_1 = h_d - h_a$,

$$h_a = r_a ctg\beta_{gc} \tag{3.33}$$

приводим подынтегральное выражение в (3.27) к функции r.

Получаем из (3.27):

$$T_B = \pi b_1\left(\frac{D_P}{2}\right)^m \int_{r_a}^{r_P}(a_3 D_P r^{-m} + A_o r^{1-m} + \frac{2a_2}{h_{gc}tg\beta_{gc}}r^{2-m})dr \tag{3.34}$$

где

$$A_o = \frac{a_2 D_P}{h_{gc}tg\beta_{gc}} + 2a_3$$

$$a_3 = \sigma_{f.B} + \frac{a_1 a_2}{h_{gc}} = \sigma_P - \frac{a_2 D_P tg2\beta_{gc}}{2h_{gc}}$$

После интегрирования в формуле (3.34) получаем:

$$T_B = \pi b_1\left(\frac{D_P}{2}\right)^m [A_P - A_a] \tag{3.35}$$

где:

$$A_P = \frac{a_3 D_P r_P^{1-m}}{1-m} + \frac{A_o r_P^{2-m}}{2-m} + \frac{2a_2 r_P^{3-m}}{h_{gc} tg\beta_{gc}(3-m)},$$
$$A_a = \frac{a_3 D_P r_a^{1-m}}{1-m} + \frac{A_o r_a^{2-m}}{2-m} + \frac{2a_2 r_a^{3-m}}{h_{gc} tg\beta_{gc}(3-m)} \quad (3.36)$$

Грунтовое тело (*B*) создает давление на тело (*D*) на поверхности *BC* (рис. 3.4 и 3.5) через ОПР в теле (*B*), частично уравновешивая нагрузку $N_{f.B}$. Результирующая этого давления T_D рассчитывается интегрированием напряжений на горизонтальной кольцевой площадке, следами которой в сечении являются отрезки *BC* и *AC'*:

$$T_D = \pi b_1 \left(\frac{D_P}{2}\right)^m \int_0^{r_P} \xi_b \sigma_P r^{-m} 2r dr \quad (3.37)$$

где

$$\xi_b = tg^2\beta_b = tg^2(\pi/4 - \phi_b/2) \quad (3.38)$$

φ_b – угол внутреннего трения грунта ГО.

Получаем после интегрирования в формуле (3.37):

$$T_D = \pi b_1 \xi_b \sigma_P \left(\frac{D_P}{2}\right)^m \left(\frac{D_P r_P^{1-m}}{1-m} + \frac{2r_P^{2-m}}{2-m}\right) \quad (3.39)$$

Уравнения (3.6) и (3.7) позволяют вычислить равнодействующие силы $N_{f.B}$ и $N_{f.C}$ действия фундаментной плиты на ПРС при заданных значениях N_P и P_b. Их отношение характеризует неравномерность реакции ПРС в фундаментной плите на вес здания. Введем это отношение формулой:

$$k_{f.N} = N_{f.C}/N_f \quad (3.40)$$

где $k_{f.N}$ – доля реакции ПРС между сваями на подошве фундаментной плиты.

Увеличение толщины ПРС приводит к уменьшению величины $k_{f.N}$, т. е. более толстый слой распространяет влияние сваи на бо̀льшую площадь фундаментной

плиты. При этом напряжения непосредственно над сваей уменьшаются. ПРС сглаживает распределение напряжений по фундаментной плите.

Из уравнения (3.6) получаем формулу для расчета силы реакции ПРС над сваей:

$$N_{f.B} = N_P + T_B + T_D \tag{3.41}$$

по формуле (3.21) рассчитывается среднее напряжение на подошве фундаментной плиты над сваей $\sigma_{f.B}$. Оно уменьшается при увеличении толщины ПРС (рис. 3.7). Зависимость от толщины сильнее выражена для бо̀льших значений нагрузки от здания.

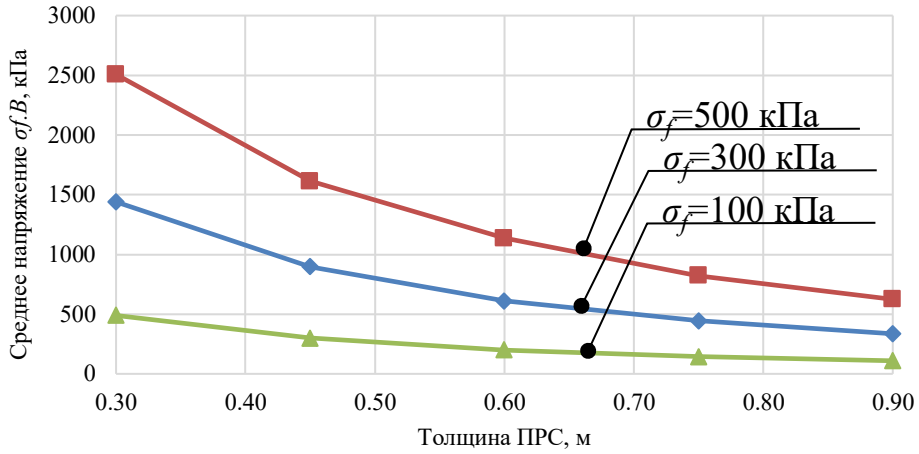


Рисунок 3.7 – Сила реакции ПРС на подошве фундаментной плиты над сваей при диаметре d = 0,3 м; шаге свай $L_P = 5d$

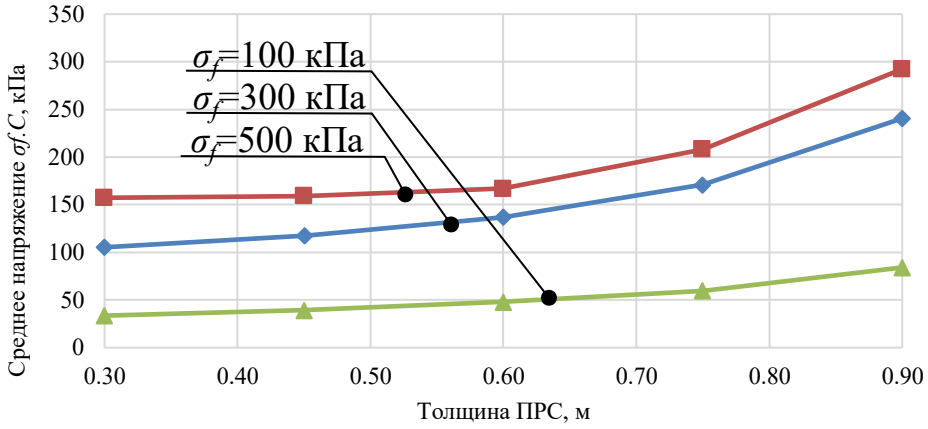


Рисунок 3.8 – Сила реакции ПРС на подошве фундаментной плиты между сваями при диаметре d = 0,3 м; шаге свай $L_P = 5d$

Из уравнения (3.7) получаем формулу для расчета силы реакции ПРС между сваями:

$$N_{f.C} = P_b - T_D - T_B \tag{3.42}$$

По формуле (3.24) рассчитывается среднее напряжение на подошве фундаментной плиты между сваями $\sigma_{f.C}$. Оно практически не зависит от толщины ПРС (рис. 3.8) на участке толщин от *1,0 до 2,0*D_P. С увеличением толщины промежуточного слоя начинает возрастать интенсивнее.

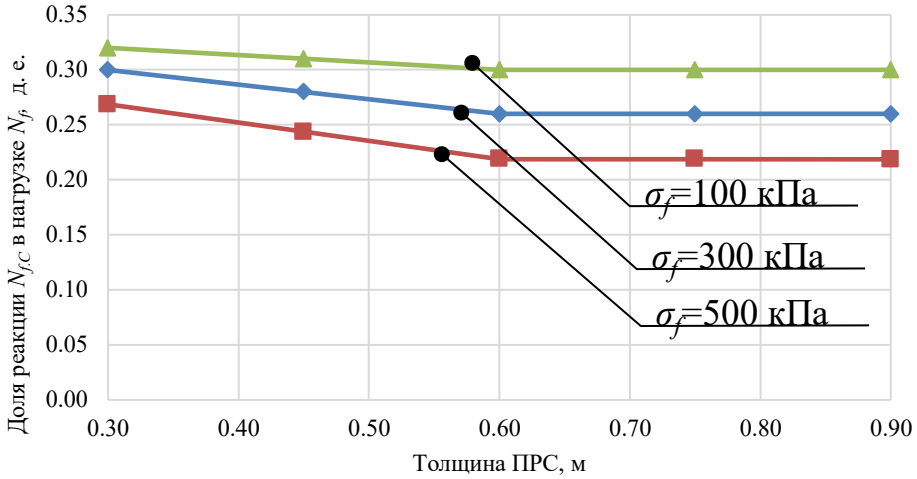


Рисунок 3.9 – Доля реакции ПРС на подошве фундаментной плиты между сваями в полной нагрузке от здания при диаметре d = 0,3 м; шаге свай $L_P = 5d$

Доля реакции ПРС между сваями на подошве фундаментной плиты в полной нагрузке от здания $k_{f.N}$ существенно уменьшается с увеличением толщины ПРС (рис. 3.9).

3.4. Расчет усилий в ПРС свайного фундамента на подошве фундаментной плиты при устройстве железобетонных оголовков

Оголовок, устраиваемый на свае, шире сваи в плане и имеет свою высоту. Верхняя грань оголовка «съедает» часть толщины ПРС. Оголовок, вне зависимости от способа крепления к свае, можно считать ее частью. Поэтому для анализа влияния оголовка на работу ПРС под нагрузкой примем за основу предыдущие расчеты.

Высота слоя ПРС над оголовком сокращается до величины $h_{gc.H}$:

$$h_{gc.H} = h_{gc} - H_H \tag{3.43}$$

где H_H − высота оголовка.

Размер горизонтальной площадки оголовка D_H больше, чем головы сваи, следовательно, больше площадь:

$$F_{P.H} = \pi D_H^2/4 \tag{3.44}$$

а среднее давление на материал ПРС, соответственно, меньше и вычисляется по формуле:

$$\sigma_{P.H} = N_P/F_{P.H} \tag{3.45}$$

Площадь верхнего основания «несущего столба»,

$$F_{f.BH} = \pi(D_{P.H} + 2H_H tg\beta_{gc})^2\ /4 \tag{3.46}$$

а среднее напряжение на верхнем основании «несущего столба» задается формулой:

$$\sigma_{f.BH} = N_{f.BH}/F_{f.BH} \tag{3.47}$$

Расстояние между эпюрами напряжений на подошве фундаментной плиты:

$$L_{ch} = L_P - D_{B.H} \tag{3.48}$$

Среднее напряжение на участке фундаментной плиты над ГО рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{f.CH} = N_{f.CH}/F_{f.CH} \tag{3.49}$$

где $F_{f.CH}$ − площадь горизонтальной площадки между верхними основаниями «несущего столба», $F_{f.CH} = L_P^2 - F_{f.BH}$ (рис. 3.10).

Устройство оголовков позволяет снизить напряжения на подошве фундаментной плиты над сваями, они также уменьшаются с увеличением толщины ПРС (рис. 3.11).

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

$$L_{ch} = 0 \qquad (3.50)$$

можно рассматривать как предельный случай использования распределительной функции ПРС.

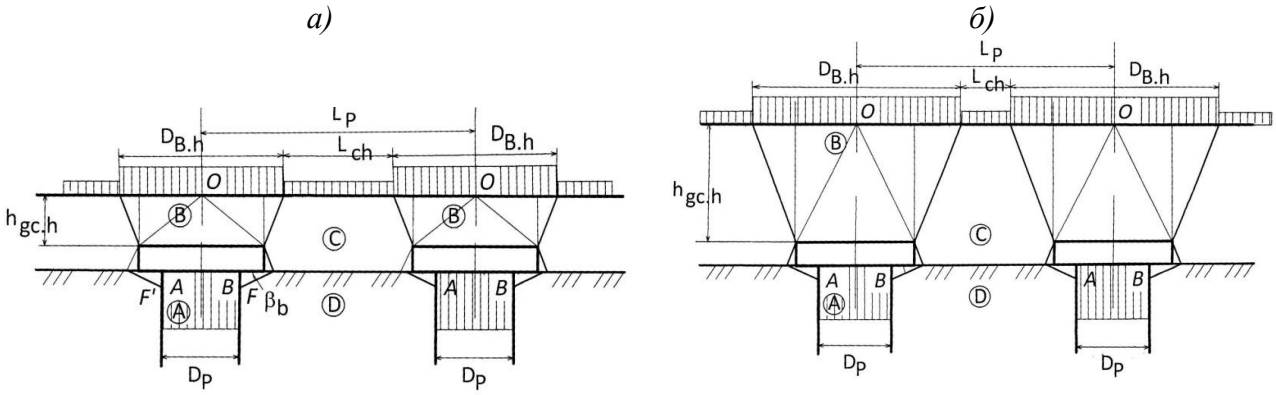


Рисунок 3.10 – Схема к расчету ПРС по сваям с оголовками для значений h_{gc}/D_P: *а)* 1,0*; б)* 2,0
L_p – межосевое расстояние между сваями; L_c – расстояние между следами верхних оснований «несущих столбов»; $D_{B.h}$ – диаметр верхнего основания «несущего столба»; D_p – диаметр головы сваи; $h_{gc.h}$ – высота ПРС

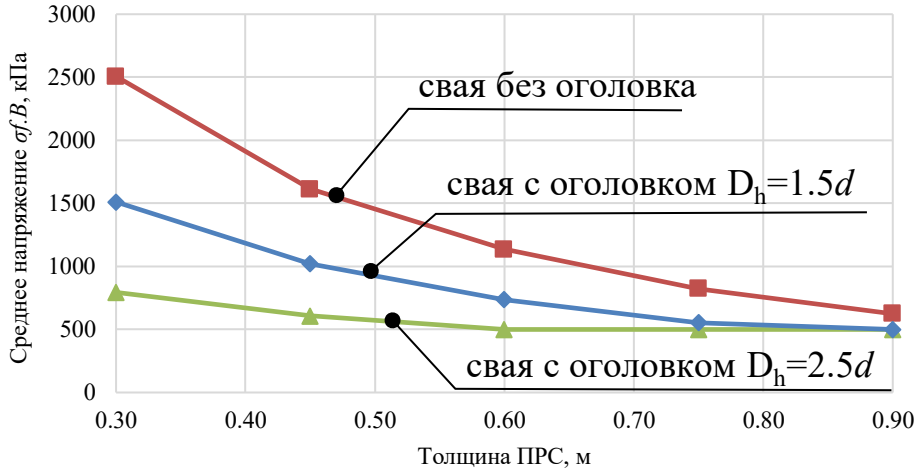


Рисунок 3.11 – Напряжения в ПРС на подошве фундаментной плиты над сваями с оголовками и без оголовков при диаметре d = 0,3 м; шаге свай L_P = 5d; давлении на подошве плиты σ_f = 500 кПа

Напряжения на подошве фундаментной плиты между сваями меньше, чем при отсутствии оголовков. Эти напряжения несколько увеличиваются с увеличением толщины ПРС, особенно, при больших нагрузках от здания (рисунок 3.12).

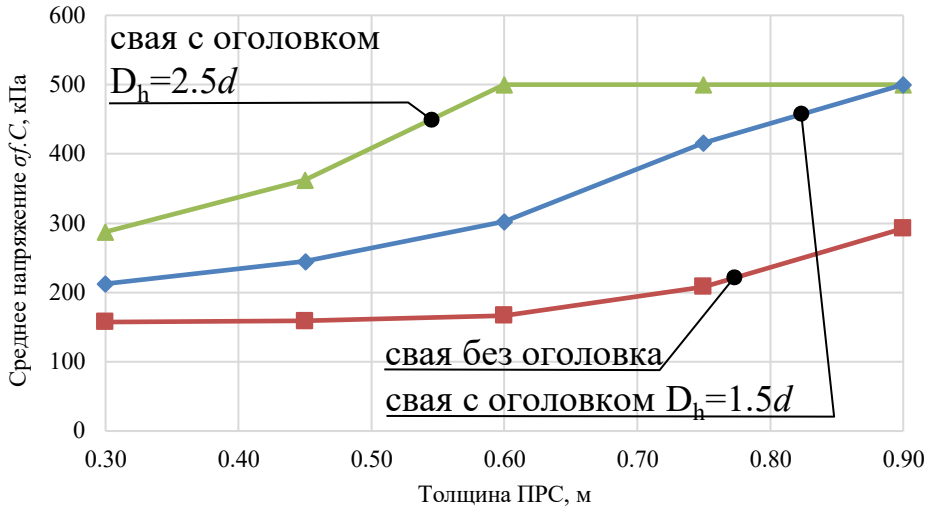


Рисунок 3.12 – Напряжения в ПРС на подошве фундаментной плиты между сваями с оголовками и без оголовков при диаметре d = 0,3 м; шаге свай L_P = 5d; давлении на подошве плиты σ_f = 500 кПа

Доля реакции ПРС на подошве фундаментной плиты между сваями в полной нагрузке от здания для случая свай с оголовками больше, чем в случае без оголовков, и она существенно не зависит от толщины ПРС (рисунок 3.13).

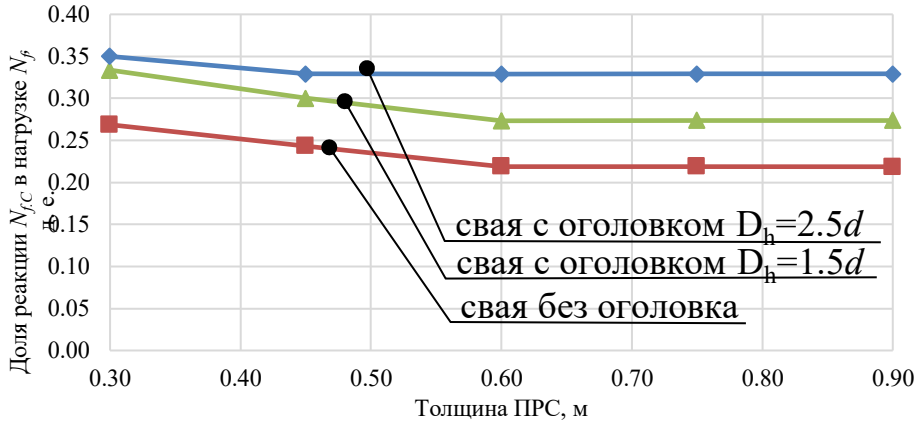


Рисунок 3.13 – Доля реакции ПРС на подошве фундаментной плиты между сваями в полной нагрузке от здания при диаметре d = 0,3 м; шаге свай L_P = 5d; давлении на подошве плиты σ_f = 500 кПа

Давление ПРС на ГО практически не зависит ни от наличия оголовков, ни от толщины ПРС, а определяется общей нагрузкой от здания.

3.5. Блок-схема усовершенствованного аналитического метода

На основании усовершенствований и преобразований базового метода расчета ПРС в составе свайных фундаментов была подготовлена блок-схема последовательности его применения (рис. 3.14).

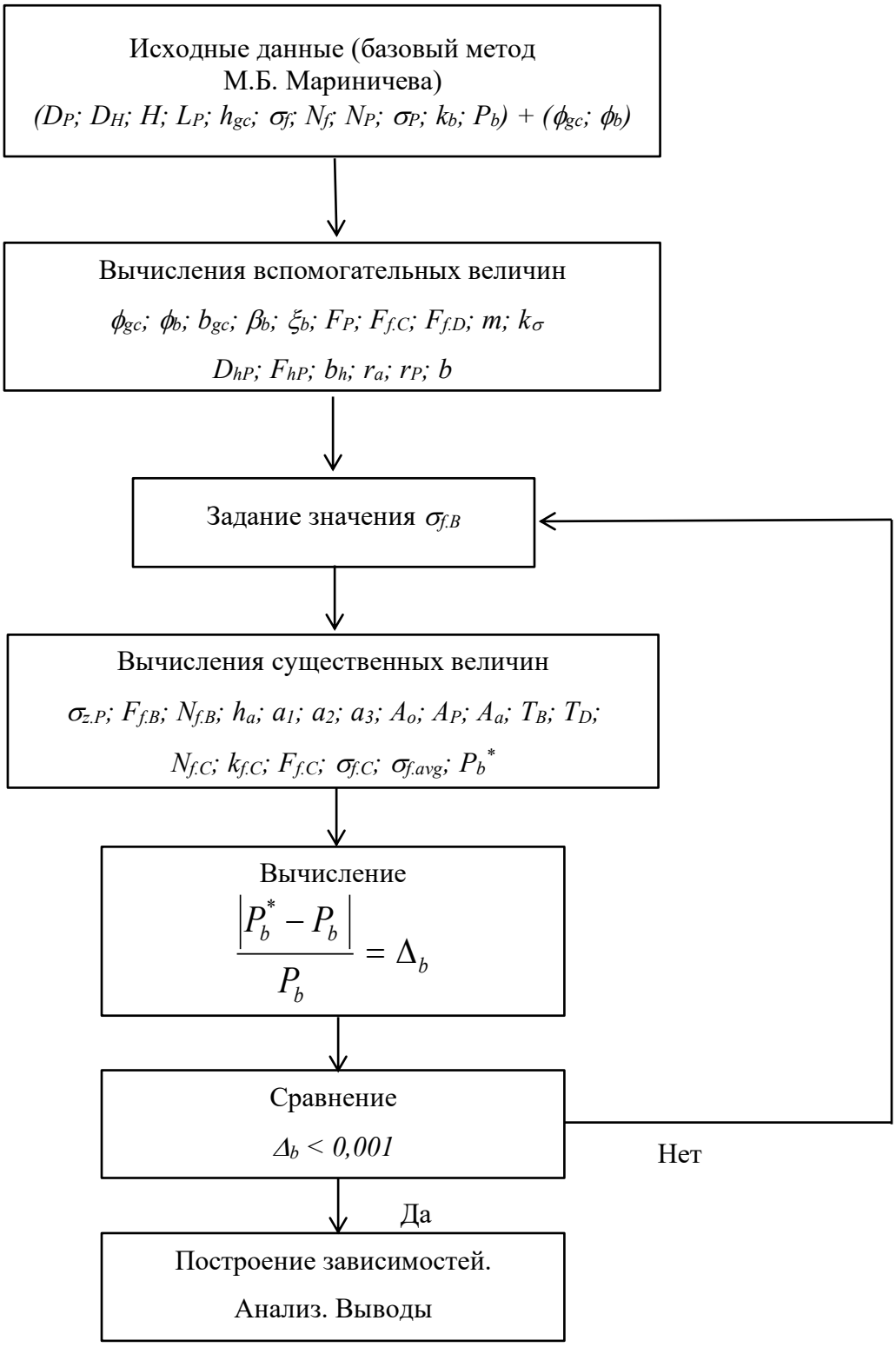


Рисунок 3.14 – Блок-схема усовершенствованного аналитического метода

Блок-схема представляет собой последовательность действий усовершенствованного аналитического метода. Она включает несколько этапов, которые можно описать следующим образом:

1. **Исходные данные.**

На начальном этапе вводятся исходные данные, включая параметры конструкции и нагрузки (например, $D_P, D_H, H, L_P, h_{gc}, \sigma_f, N_P, k_b, P_b$ и другие), а также характеристики материалов и геометрические параметры.

2. **Вычисление вспомогательных величин**

На основе исходных данных рассчитываются вспомогательные параметры ($\varphi_{gc}, \varphi_b, \delta_b, b_{gc}, \beta_{gc}, F_P, F_{fc}, F_{fD}, m, k_\sigma, D_{hP}, F_{hP}$ и другие), которые используются в дальнейшем анализе.

3. **Задание значения $\boldsymbol{\sigma_{fB}}$**

Устанавливается текущее значение для одного из ключевых параметров, $\boldsymbol{\sigma_{fB}}$, который участвует в расчетах.

4. **Вычисление существенных величин**

Рассчитываются основные показатели, необходимые для оценки работы конструкции, такие как напряжения, силы, работы и другие параметры ($\sigma_{zP}, F_{gc}, N_{fB}, h_a, a_1, a_2, A_0, A_c, A_p, T_B, T_D$, и др.).

5. **Проверка сходимости**

Рассчитывается разница между рассчитанным и ожидаемым значением $\Delta_b = \frac{|P_b* - P_b|}{P_b}$. Если $\Delta_b < 0.001$, то переходят к следующему этапу. В противном случае выполняется повторный цикл с уточнением параметров.

6. **Сравнение результатов**

Проверяется критерий сходимости. Если он выполняется, то можно переходить к финальным расчетам.

7. **Построение зависимостей, анализ и выводы**

Завершающий этап включает построение графиков или зависимостей, анализ полученных результатов и формулирование выводов по работе конструкции.

3.6. Сопоставление аналитических и численных исследований

Далее в работе выполнено сопоставление значений напряжений, возникающих на уровне подошвы фундамента, определенных численно в *MIDAS FEA NX* и при помощи усовершенствованного аналитического метода расчета (рис. 3.11, 3.12). Для проведения сравнительного анализа были рассмотрены различные геометрические и физико-механические параметры системы, включая толщину промежуточного распределительного слоя, его деформационные характеристики, а также нагрузки, приложенные к конструкции.

Таким образом, использование усовершенствованного аналитического метода представляется целесообразным для задач, где требуется оперативная оценка напряженно-деформированного состояния системы при сохранении достаточной точности расчетов. В то же время для случаев, требующих повышенной точности или при больших толщинах ПРС, рекомендуется применение численных методов, позволяющих учесть более сложные граничные условия и нелинейные эффекты.

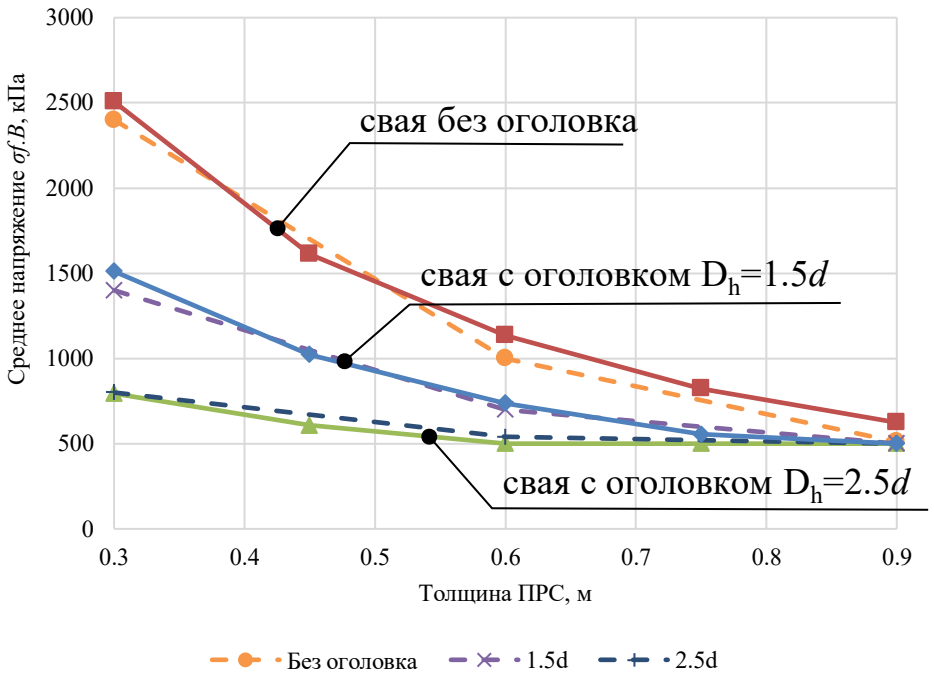


Рисунок 3.15 – Аналитическое вычисление напряжений на подошве фундаментной плиты над сваями с оголовками и без оголовков в сопоставлении с численными исследованиями при диаметре d = 0,3 м; шаге свай $L_P = 5d$; давлении на подошве плиты σ_f = 500 кПа

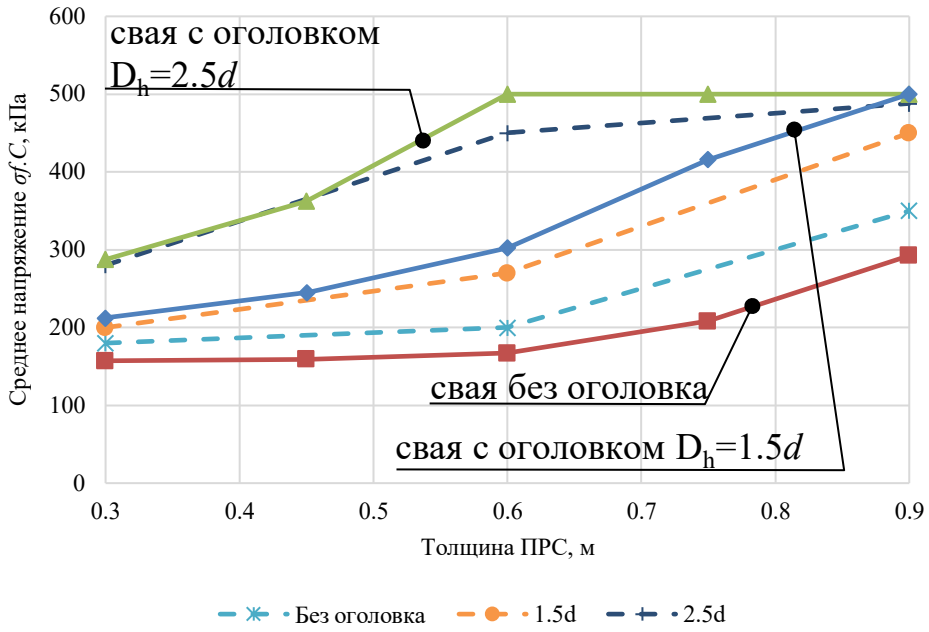


Рисунок 3.16 – Аналитическое вычисление напряжений на подошве фундаментной плиты между сваями с оголовками и без оголовков в сопоставлении с численными исследованиями при диаметре d = 0,3 м; шаге свай L_P = 5d; давлении на подошве плиты σ_f = 500 кПа

Анализ полученных результатов показал, что значения напряжений, вычисленные с использованием обоих подходов, демонстрируют качественную и количественную согласованность. Максимальная разница между результатами, полученными численным и аналитическим методами не превышает 15–20%. Наибольшее соответствие наблюдается для случаев с минимальной толщиной ПРС (до 2,0d), где влияние граничных условий и концентрации напряжений снижено.

На основании проведенного анализа установлено, что предложенный усовершенствованный аналитический метод обладает достаточной точностью для практического применения, особенно в области малых толщин ПРС. Это позволяет рекомендовать данный диапазон в качестве области применимости аналитического метода расчета.

3.7. Выводы по Разделу 3

1. 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.

2. Применен подход к оценке напряженно-деформированного состояния ПРС, основанный на модели «несущего столба», учитывающей взаимодействие всех элементов системы (свай, плиты, грунта), в результате которого удается определить неравномерность деформации ПРС для ячейки свайного фундамента.

3. Сопоставление аналитических расчетов с численными исследованиями подтвердило достоверность предложенной методики, хотя при увеличении высоты ПРС наблюдаются расхождения, связанные с принятыми упрощениями. Предложенный метод позволяет инженерным путем описать работу ПРС и обосновать способы его совершенствования за счет конструктивных решений (применения оголовков).

4. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАСЧЕТУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ (ПРС)

4.1. Методика конструирования свайных фундаментов с ПРС

В четвертом разделе разработана методика конструирования свайных фундаментов с ПРС, предназначенная для применения в многоэтажном и высотном строительстве. Данная методика основана на результатах теоретических исследований, посвященных изучению влияния геометрических параметров свайного фундамента с ПРС на его осадки.

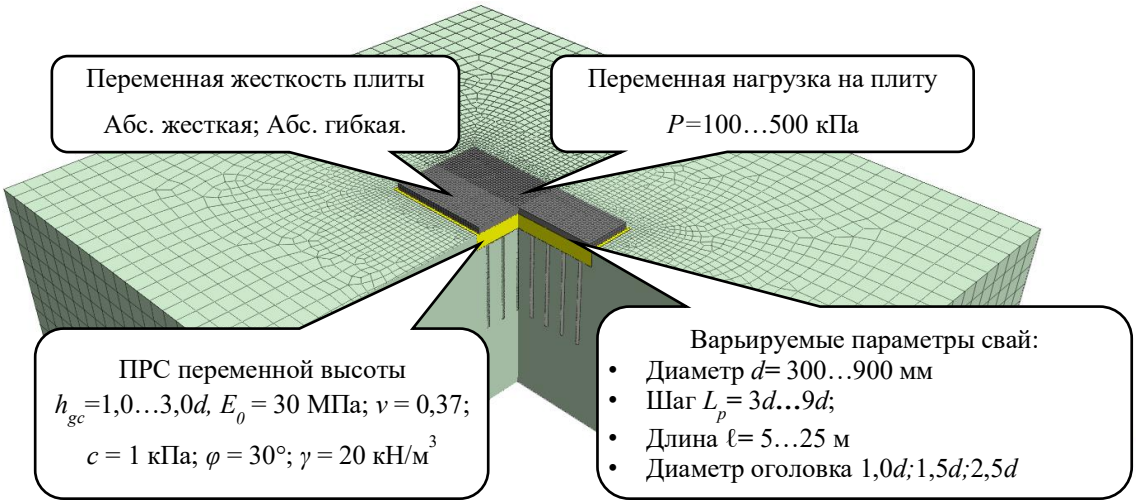


Рисунок 4.1 – Пример расчетной модели для разработки методики конструирования свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем

Наиболее важными параметрами, рассматриваемыми в рамках исследования, являются диаметр свай (d), межсвайное расстояние (L_p), длина свай (l) и толщина ПРС (h_{gc}). Разработанная методика приведена в виде блок-схемы на рис. 4.2, а основные этапы ее использования приведены далее по тексту:

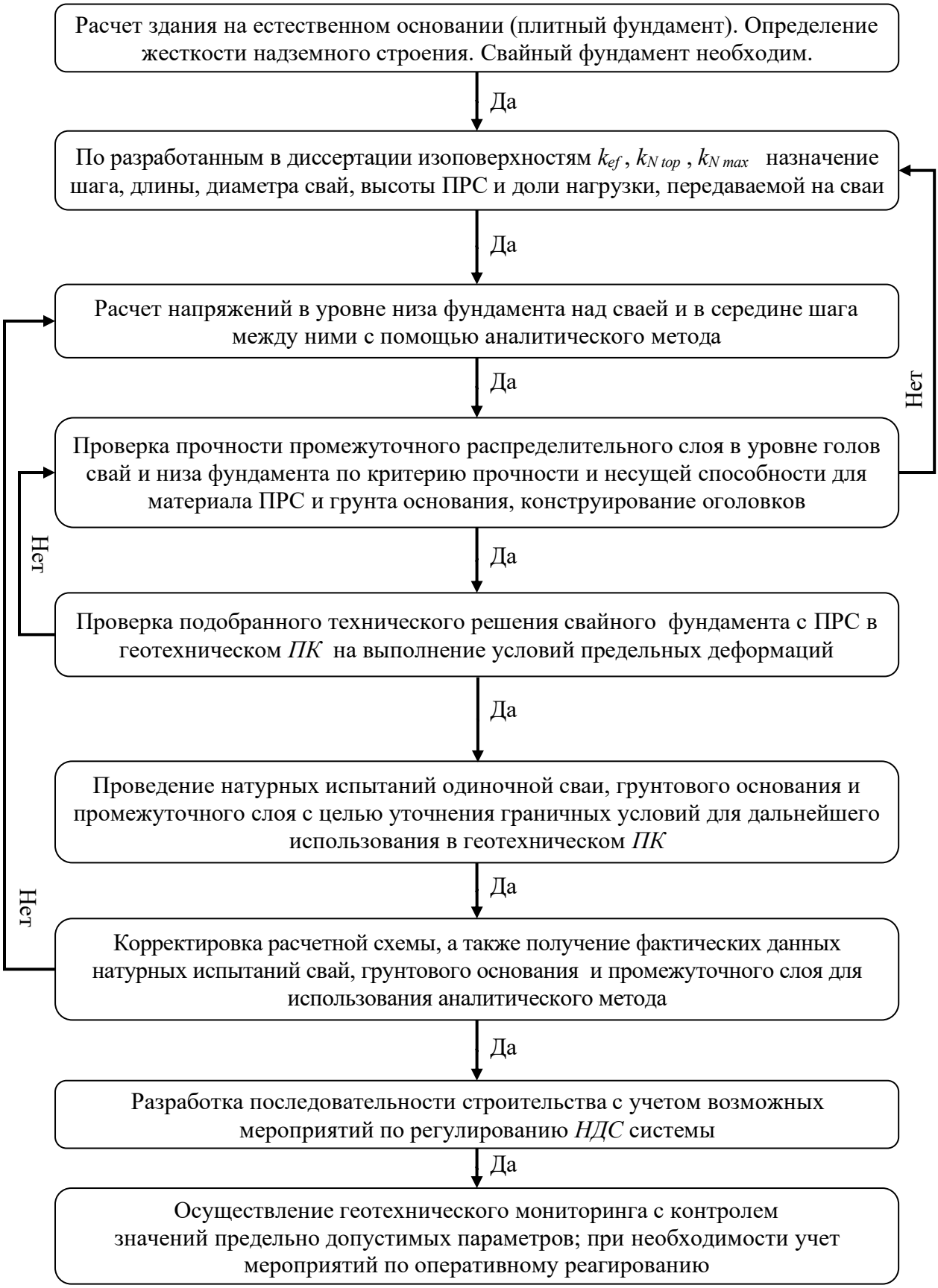


Рисунок 4.2 – Методика конструирования свайных фундаментов с ПРС

1. Определение исходных данных, жёсткости надземного строения, необходимости применения свай

- Выполнить инженерно-геологические изыскания для определения типа грунта, его физико-механических свойств, несущей способности и сжимаемости. Установить категорию инженерно-геологических условий площадки строительства.
- Установить глубину залегания несущих слоёв, уровень грунтовых вод, агрессивность среды по отношению к бетону свай и материалу ПРС.
- Определить расчётные нагрузки (постоянные, временные и динамические) от надземной части здания.
- Установить конфигурацию здания (план, этажность, высоту), а также предполагаемую конструктивную схему (монолитный каркас или перекрестные стены).
- Принять жёсткость надземного строения, исходя из проектных решений (абсолютно жесткое или абсолютно гибкое).
- Для оценки целесообразности применения свайного фундамента определить осадку фундаментной плиты на естественном основании (S_{slab}) с учётом заданной жёсткости надземного строения.
- Если осадка S_{slab} превышает допустимые значения по СП 22.13330, либо не удовлетворяет требованиям по неравномерности деформаций, принять решение о необходимости устройства свай.

2. Предварительное назначение параметров свай и ПРС

2.1. Определить длину и сечение свай:

- На основании геотехнических данных и предварительных расчётов выбрать длину свай, обеспечивающую достаточную несущую способность и глубину заделки в прочные грунты.
- Назначить диаметр свай d с учётом расчётных нагрузок и требованиям по предельно допустимым осадкам.

2.2. Использовать изоповерхности по коэффициенту эффективности k_{ef}. Коэффициент эффективности k_{ef} определяется как отношение осадки свайного фундамента с ПРС (S_{pile}) к осадке фундаментной плиты на естественном основании (S_{slab}), который показывает, насколько варьирование параметров (длина, диаметр, шаг свай, толщина ПРС) снижает осадку; чем меньше k_{ef}, тем эффективнее решение, при условии, что фундамент на естественном основании неприменим.

По разработанным в диссертации изоповерхностям зависимости $k_{ef} = f\left(\frac{L_p}{D_p}, \frac{h_{gc}}{D_p}\right)$, (где L_p – межсвайное расстояние, D_p – диаметр свай, h_{gc} – толщина ПРС) выбрать рациональные значения шага, диаметра и длины свай, а также высоты ПРС (пример для P=500 кПа и длины свай 15 м приведен на рис. 4.3). Изоповерхности для других нагрузок и длин свай приведены в приложении Б.

а) *б)*

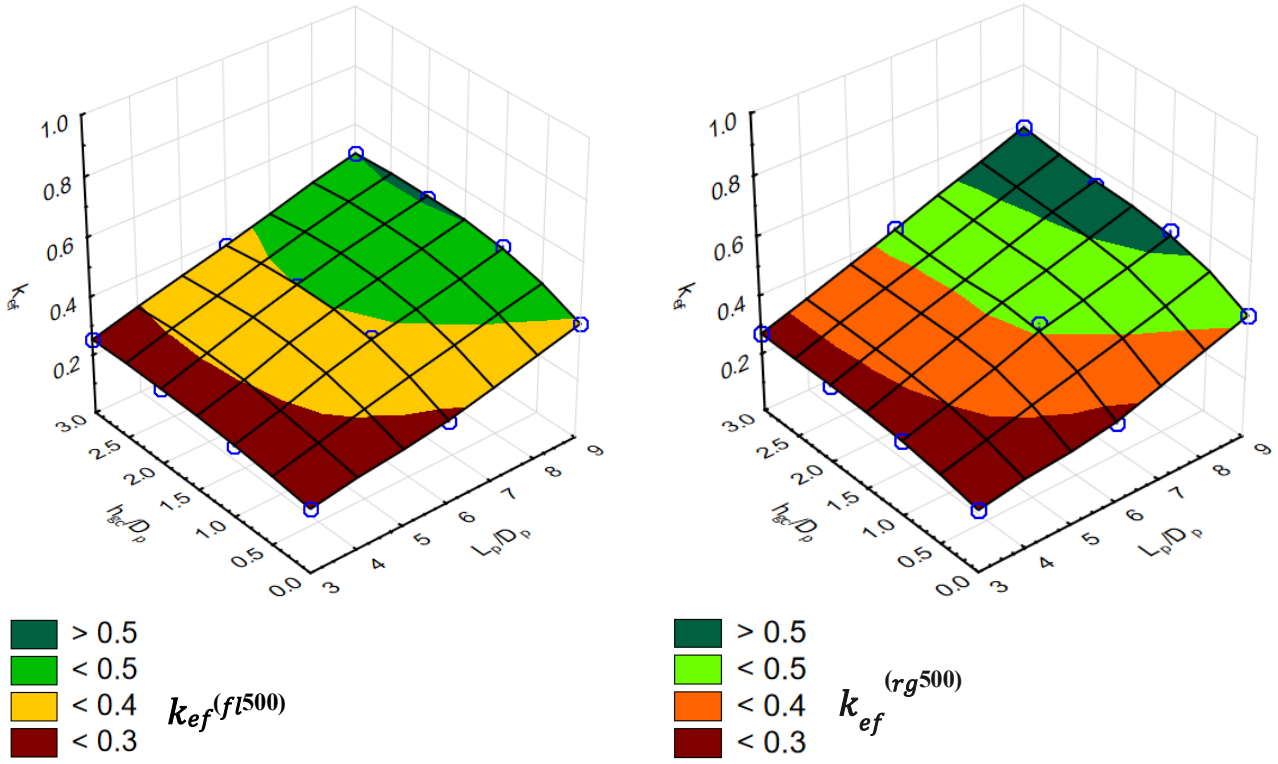


Рисунок 4.3 – Пример диаграмм коэффициента эффективности k_{ef} при P=500 кПа для: *а)* гибкой плиты $k_{ef}^{(fl500)}$, *б)* жесткой плиты $k_{ef}^{(rg500)}$

2.3. Назначить толщину промежуточного распределительного слоя h_{gc}:

- Использовать предложенные изоповерхности для определения толщины ПРС, влияющей на перераспределение нагрузок и величину осадок системы.
- Учесть технологические ограничения (минимально допустимая толщина, прочность, возможность послойной укладки и уплотнения и т.д.).

2.4. Предварительное определение доли нагрузки на сваи и плиту:

- По изоповерхностям, построенным для двух уровней (головы свай ($k_{N_{top}}$) и уровня суммарных максимальных усилий ($k_{N_{max}}$) оценить процент нагрузки, который будет передаваться непосредственно на сваи, а какой – на их оголовки от фундаментной плиты через ПРС. Пример изоповерхностей ($k_{N_{top}}$) и ($k_{N_{max}}$) для абсолютно жесткой плиты $P = 500$ кПа, d =300 мм, ℓ =15 м для показан на рис. 4.4. Для других параметров системы изоповерхности приведены в Приложении Б. Эти данные в дальнейшем уточняются расчётами и опытно-экспериментальными работами.

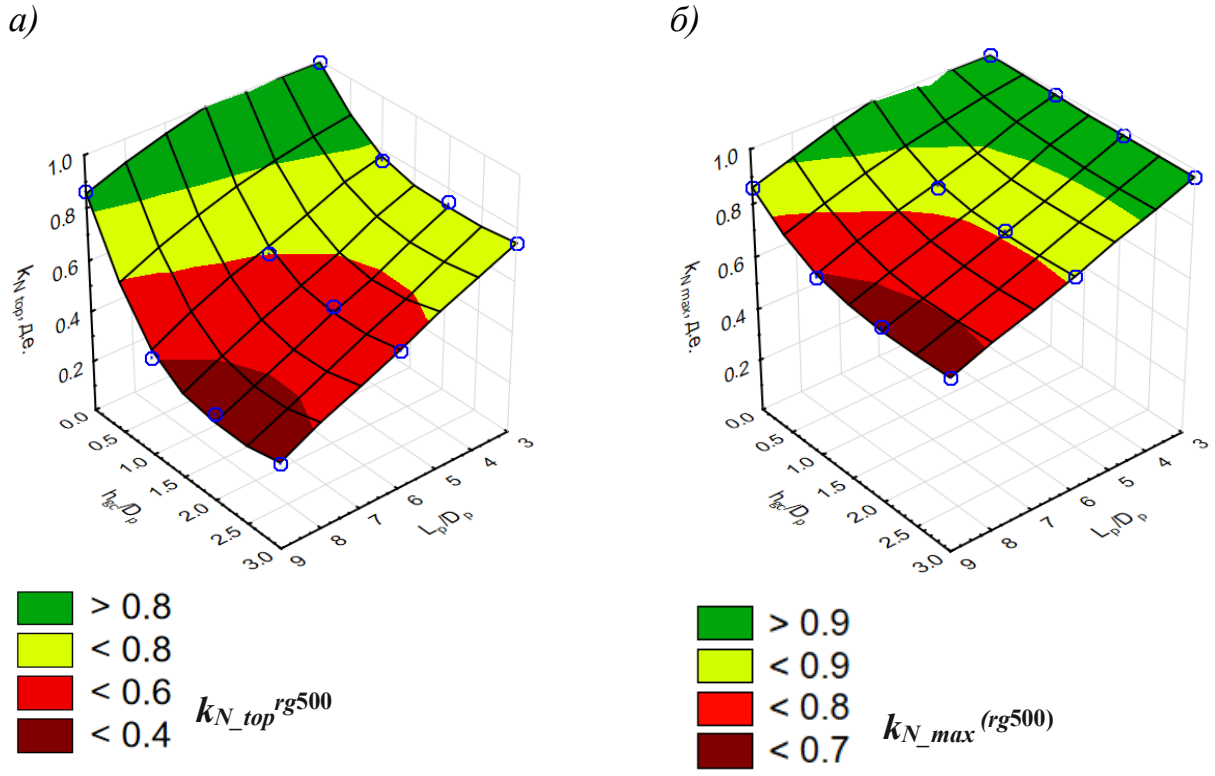


Рисунок 4.4 – Пример диаграмм для назначения шага свай в поле и высоты ПРС по подошве абсолютно жесткой плиты P = 500 кПа, d=300 мм, ℓ =15 м для: *а*) уровня голов свай $k_{N\_top}^{rg500}$; *б*) уровня суммарных максимальных усилий $k_{N\_max}^{rg500}$

3. Расчёт напряжений в фундаменте и проверка прочности ПРС

3.1. Аналитический расчёт напряжений:

- Рассчитать напряжения в уровне низа фундаментной плиты (или ростверка) над сваей и в середине плиты, используя принятые параметры свай, толщину и характеристики ПРС.

3.2. Проверка прочности и несущей способности ПРС:

- Оценить напряжённо-деформированное состояние промежуточного слоя в зоне над сваями (где возможны максимальные локальные усилия) и в межсвайном пространстве. Критерий отказа слоя определяется достижением одного из двух лабораторно установленных условий. Первое условие связано с разрушением образца в процессе его деформации в условиях трехосного сжатия в испытательной камере. Второе условие характеризуется деформацией образца до предельных значений, которые составляют 15% согласно российским стандартам [5], и 20% – в соответствии с международными нормами [63, 66, 82].
- При необходимости изменить конструктивное решение ПРС (введение свайных оголовков) в соответствии с расчётными требованиями.

3.3. Проверка ограничений по осадкам:

- Выполнить расчёт суммарных и неравномерных осадок (S_{pile}) подобранного технического решения в геотехническом *ПК MIDAS* или *PLAXIS*.
- Сопоставить полученные значения с максимально допустимыми для данного типа сооружения в соответствии с действующими нормами СП 22.13330.

4. Корректировка проектных решений и уточнение нагрузки

4.1. Анализ результатов натурных испытаний:

- Сопоставить полученные значения осадок, напряжений и усилий в сваях с требованиями надёжности и долговечности в процессе натурных испытаний на строительной площадке.
- При несоответствии нормативам либо при избыточном запасе по несущей способности пересмотреть параметры свайного поля (длину, диаметр, шаг), толщину ПРС.

- Уточнить распределение нагрузки на основании данных натурных испытаний свай/грунта/ПРС, учесть данные о жёсткости надземного строения. Натурные испытания выполняются по [24]. При необходимости внести изменения в расчётные модели в геотехническом *ПК* (*MIDAS* или *PLAXIS*).
- После окончательного выбора геометрии свай, параметров ПРС с учетом натурных испытаний, подготовить комплект рабочих чертежей с учетом возможных мероприятий по регулированию НДС системы.

5. Геотехнический мониторинг и контроль качества

5.1. Разработка программы геотехнического мониторинга:

- Определить перечень контролируемых параметров (осадки, крены, изменение уровня грунтовых вод).
- Установить периодичность измерений и точки наблюдений (в том числе за конструкцией здания и прилегающей территорией).

5.2. Контроль осадок:

- Во время возведения здания и на стадии эксплуатации проводить измерения осадок в характерных точках (центральные зоны, углы, зоны под наибольшей нагрузкой).
- Сопоставлять фактические значения с расчётными и предельно допустимыми. При превышении – оперативно анализировать причины и принимать корректирующие меры.

4.2. Классификация технических решений свайных фундаментов с ПРС

В современных условиях проектирования и строительства объектов различного назначения особую актуальность приобретает разработка обоснованных технических решений свайных фундаментов, в том числе с ПРС, отнесенных к конкретным инженерно-геологическим условиям (ИГУ) площадки. В рамках данного исследования разработана классификация технических решений свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем (ПРС), учитывающая наличие простых, средних, сложных и особо сложных инженерно-геологических условий.

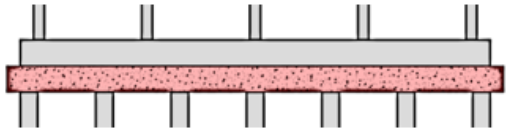
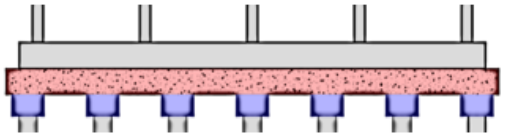
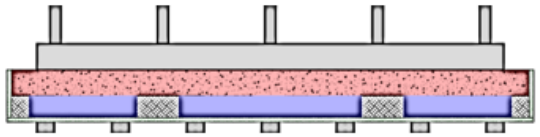
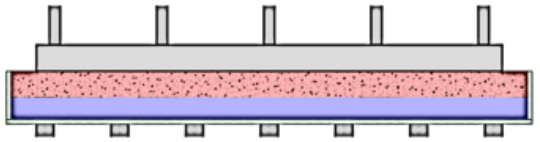
Классификация основана на комплексном анализе совокупности факторов, определяющих условия строительства. К таким факторам относятся:

- **Геоморфологические характеристики**, включая рельеф местности, наличие и выраженность геологических форм, а также их влияние на устойчивость основания;
- **Геологические условия**, характеризующие состав, состояние и свойства грунтов, их неоднородность;
- **Гидрогеологические параметры**, такие как уровень грунтовых вод, их агрессивность по отношению к материалам фундамента, наличие напорных грунтовых вод;
- **Негативные процессы**, включая сейсмичность, подтопление, карстово-суффозионные явления, оползневые процессы, деформации пучения грунтов и другие неблагоприятные факторы.

В таблице 4.1 представлена разработанная классификация, в которой для четырёх категорий инженерно-геологических условий – простых (I категории), средних (II категории), сложных (III категории) и особо сложных (IV категории) – указаны рекомендуемые схемы свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем (ПРС), а также их основные эксплуатационные параметры и условия применения.

Особо сложные инженерно-геологические условия, рассматриваемые в данной работе, сформулированы на основании исследований, проведенных в рамках работы [24]. Дополнительно, они были детально описаны и проанализированы в статьях [18, 21, 95]. В результате особая категория сложности была предложена как дальнейшее развитие категорий инженерно-геологических условий (ИГУ), представленных в Приложении Г СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 (с Изменением №1)».

Таблица 4.1 – Классификация технических решений свайных фундаментов с ПРС в зависимости от категории инженерно-геологических условий

Инженерно-геологические условия	Рекомендуемое техническое решение (схема свайного фундамента с ПРС)	Примечание
Простые (I категория) **Геоморфология**: Один элемент, ровная поверхность; **Геологическая структура**: ≤2 слоя, горизонтальные/слабонаклонные, мощность постоянна, незначительная неоднородность; **Гидрогеология**: Нет или 1 выдержанный горизонт **Негативные геопроцессы:** Отсутствуют		**Нагрузка на основание:** 100-200 кПа; **Сейсмичность:** 7 баллов и менее; **Высота ПРС:** 1,0-1,5d (d – диаметр свай); **Оголовки:** не применяются; **Бетонная подготовка:** конструктивная; **Защита от УГВ:** отсутствует или защита геотекстилем
Средние (II категория) **Геоморфология**: Несколько эл-тов одного генезиса, слабое расчленение, наклон; **Геологическая структура**: ≤4 слоя, наклон/выклинивание, существенные изменения свойств, неровная кровля скальных; **Гидрогеология**: ≥2 горизонта, местами неоднородный состав, напор; **Негативные геопроцессы:** Ограниченные, несущественное влияние		**Нагрузка на основание:** 200-300 кПа; **Сейсмичность:** 7-8 баллов; **Высота ПРС:** 1,0-2,0d; **Оголовки:** одиночные диаметром 1,5-2.5d; **Бетонная подготовка:** конструктивная **Защита от УГВ:** защита геотекстилем
Сложные (III категория) **Геоморфология**: Разные генезисы, сильное расчленение; **Геологическая структура**: >4 слоя, резкие изменения, линзы, значительная неоднородность, разломы; **Гидрогеология**: Невыдержанные горизонты, сложная структура, неоднородный состав, изменяющиеся напоры; **Негативные геопроцессы:** Широкие, решающее влияние		**Нагрузка на основание**: 300-500 кПа; **Сейсмичность:** 8-9 баллов; **Высота ПРС**: 1,5-2,5d; **Оголовки:** применяются ленточные или кустовые; **Бетонная подготовка:** силовая; **Защита от УГВ:** введение вертикальных ограждающих элементов в конструкцию силовой бетонной подготовки
Особо сложные (IV категория) **Геоморфология**: Несколько разногенезных элементов с уклонами >15% в двух направлениях, поверхность сильно расчленена.; **Геологическая структура**: Более 5 слоев с углами >10°, незакономерное чередование, линзы, разломы, сильно выветрелые трещиноватые скальные грунты, специфические грунты глубже 5 м; **Гидрогеология**: Два и более взаимосвязанных водоносных горизонта с фильтрационными окнами и Кф >50 м/сут; **Негативные геопроцессы**: Повсеместное сочетание двух и более негативных процессов, определяющих технические решения, строительство и эксплуатацию		**Нагрузка на основание:** более 500 кПа; **Сейсмичность:** 9 баллов и более; **Высота ПРС:** 2,5-3,0d; **Оголовки:** в виде сплошной плиты + система регулирования деформаций (**RU 2731969**); **Бетонная подготовка:** силовая; **Защита от УГВ:** введение вертикальных ограждающих элементов в конструкцию силовой бетонной подготовки

1. Простые ИГУ (I категории)

- **Рекомендуемое решение**: свайный фундамент с высотой ПРС 1,0-1,5d (d – диаметр свай), без свайных оголовков, с конструктивной бетонной подготовкой.
- **Общие указания**: при нагрузках на основание 100-200 кПа; сейсмичности: 7 баллов и менее, благоприятных грунтовых условиях без выраженных негативных процессов и без напорных грунтовых вод (или с минимальными требованиями к гидроизоляции).

2. Средние ИГУ (II категории)

- **Рекомендуемое решение**: свайный фундамент с высотой ПРС 1,0-2,0d (d – диаметр свай), применением свайных оголовков D_h=1,5-2,5d, защитой ПРС от грунтовых вод геотекстилем и конструктивной бетонной подготовкой.
- **Общие указания**: при нагрузках на основание 200-300 кПа; сейсмичности: 7-8 баллов, возможны отдельные негативные процессы (например, периодическое подтопление), требующие дополнительных мер по гидроизоляции и дренажу.

3. Сложные ИГУ (III категории)

- **Рекомендуемое решение**: свайный фундамент с высотой ПРС 1,5-2,5d (d – диаметр свай), увеличение площади оголовков свай до лент и кустов, силовая бетонная подготовка, введение вертикальных ограждающих элементов в конструкцию силовой бетонной подготовки, дополнительная защита от агрессивных грунтовых вод (при наличии)
- **Общие указания**: при нагрузках на основание 300-500 кПа; сейсмичности: 8-9 баллов, где в ряде случаев наблюдаются неблагоприятные геологические процессы (просадочные грунты, подвижки, подземные воды под напором), требующие комплекса мероприятий по укреплению и гидроизоляции.

4. Особо сложные ИГУ (IV категории)

Особая категория сложности инженерно-геологических условий, предложенная в результате исследований кафедры Оснований и фундаментов

КубГАУ [24], представляет собой важный шаг в развитии теории и практики строительства. Она позволяет более точно учитывать уникальные сочетания неблагоприятных факторов и разрабатывать эффективные решения для обеспечения надежности и безопасности сооружений.

- **Рекомендуемое решение**: свайный фундамент с высотой ПРС 2,5-3,0*d* (*d* – диаметр свай), увеличение площади оголовков свай до сплошной железобетонной плиты толщиной не менее 1,0*d* (*d* – диаметр свай), рекомендуется применение систем регулирования неравномерных деформаций (например *RU 2731969*), силовая бетонная подготовка, введение вертикальных ограждающих элементов в конструкцию силовой бетонной подготовки, применение противофильтрационных завес, сложных дренажных систем и других мер защиты от грунтовых вод.
- **Общие указания**: при нагрузках на основание более 500 кПа; сейсмичности: более 9 баллов, возможно строительство в зонах опасных процессов (оползневых склонов, карста, сейсмически активных районах). Глубина заложения и толщина ПРС определяются расчётами с учётом крайне неблагоприятных условий, необходима комплексная защита фундамента.

Таким образом, каждая категория отражает совокупность факторов, влияющих на выбор конструкции свайного фундамента с ПРС, включая геоморфологические и геологические характеристики, уровень грунтовых вод и наличие агрессивных или негативных процессов. Данная классификация служит основой для принятия проектных решений, позволяя дифференцированно подходить к определению материала и толщины ПРС, параметров свай, включая оголовки, а также к выбору мероприятий по гидроизоляции и защите от напорных вод.

4.3. Внедрение результатов исследований

В соответствии с поставленными в диссертационной работе задачами, проведено практическое внедрение результатов проведенных исследований свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем. Ниже представлены некоторые из реализованных на сегодняшний день высотных зданий на территории Краснодарского края, возведенных в сложных грунтовых условиях на неравномерно сжимаемых грунтах и в условиях плотной городской застройки [13, 14, 36, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 53, 91, 92, 95].

4.3.1. Свайный фундамент с ПРС для высотного здания в г. Краснодаре

Рассматриваемое высотное здание расположено площадке в условиях плотной городской застройки на неравномерно сжимаемом основании, включающем просадочные и слабые глинистые грунты. Рассматриваемый объект имеет 24 этажа и перекрестно стеновую систему несущих конструкций, что позволяет считать работу его фундаментной плиты схожей с работой жесткого штампа (см. рис. 4.5).

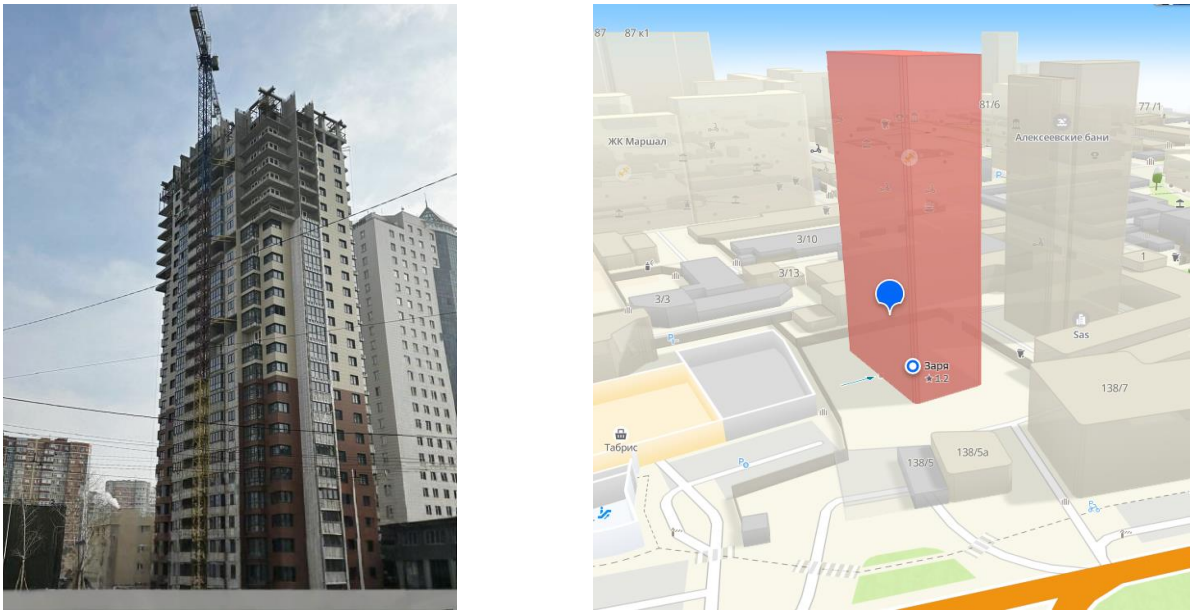


Рисунок 4.5 – Схема расположения многоэтажного жилого дома (справа) в условиях городской застройки и этап его возведения по состоянию на январь 2025 г.

Инженерно-геологическое строение рассматриваемого участка представлено на рис. 4.6, описание грунтовых условий с физико-механическими характеристиками приведено в табл. 4.2.

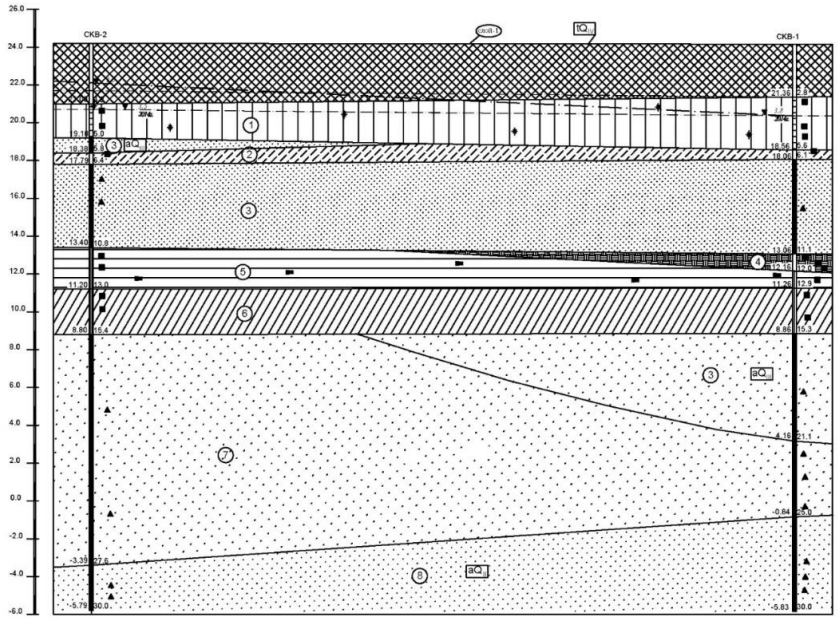


Рисунок 4.6 – Данные о инженерно-геологическом строении площадки строительства высотного здания по ул. Монтажников в г. Краснодаре

Таблица 4.2 – Сводная таблица физико-механических характеристик грунтов

№ п\п	Полное название грунта	Мощность, м	Плотность грунта, ρ, г/см^3	Удельное сцепление *C,* кПа	Угол внут. трения, φ, градус	Модуль общей деформации *E,* МПа
	Насыпной грунт	2,1-2,8	–	–	–	–
1	Суглинок просадочный	1,8-2,8	1,83	19	20	14/7*
2	Супесь пластичная	0,5-0,6	1,99	12	14	10,5
3	Песок мелкий	4,8-6,0	1,96	-	32	23,0
4	Торф	0,9-1,0	1,16	23	19	1,0
5	Глина тугопластичная.	0,9-1,1	1,88	43	17	5,0
6	Суглинок тугопластичный	2,4-4,1	1,89	27	18	17,6
7	Песок мелкий, плотный	3,9-4,3	2,02	-	34	32
8	Песок средней крупности, плотный	Более 5,0	2,05	-	34	32

*– в состоянии насыщения водой

Расчеты плитного варианта фундамента выявили значительные деформации и недопустимый крен здания. При этом итоговая расчетная осадка включала дополнительную составляющую вследствие развития просадки (P_{sl}=170кПа).

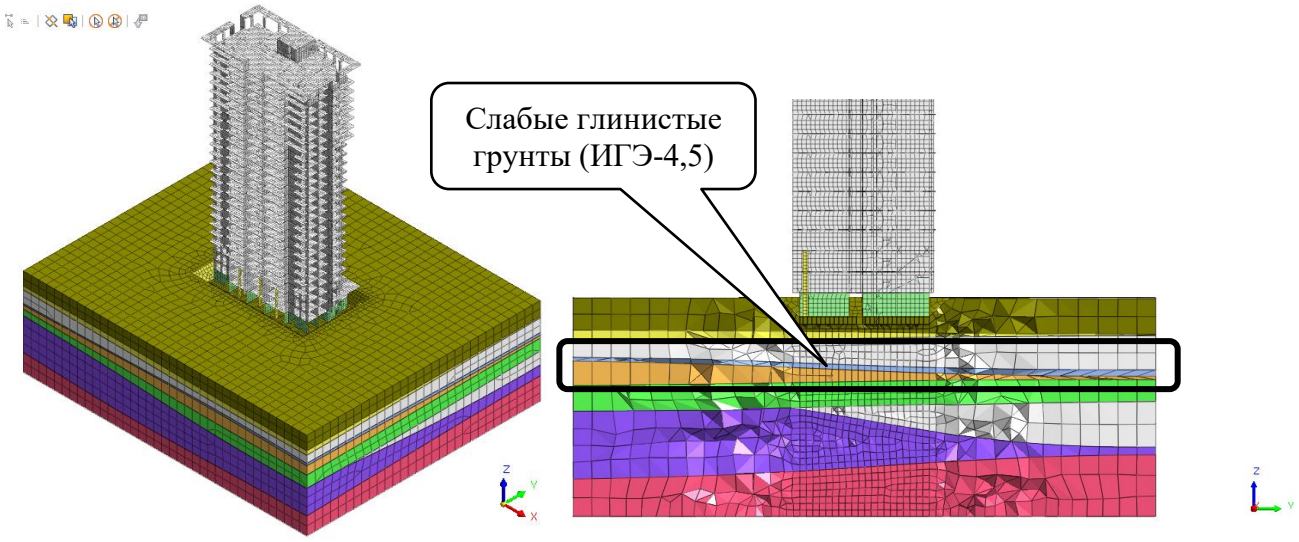


Рисунок 4.7 – Расчетная модель здания (слева) с привязкой к напластованию грунтов (справа)

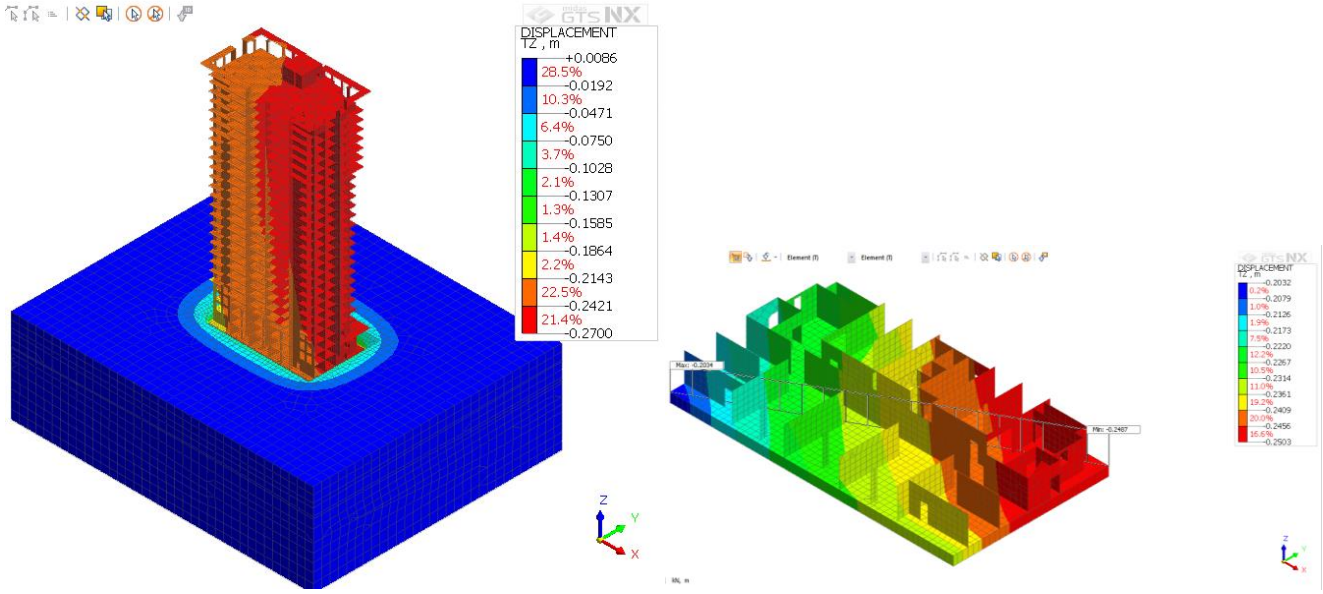


Рисунок 4.8 – Общие вертикальные деформации высотного здания (слева) и его плитного фундамента без учета просадки (справа)

В связи с полученными данными о значительных осадках и кренах фундамента высотного здания, было решено перейти к использованию свайного фундамента, который позволит передать нагрузки на более прочные грунты

основания. При этом изначально, планировалось выполнить жесткую заделку свай в ростверк (рис. 4.9).

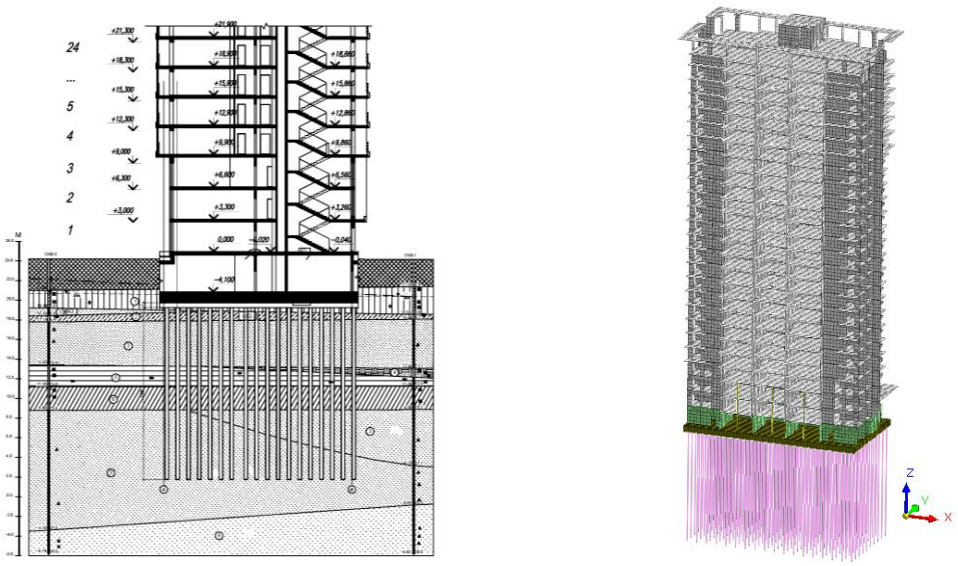
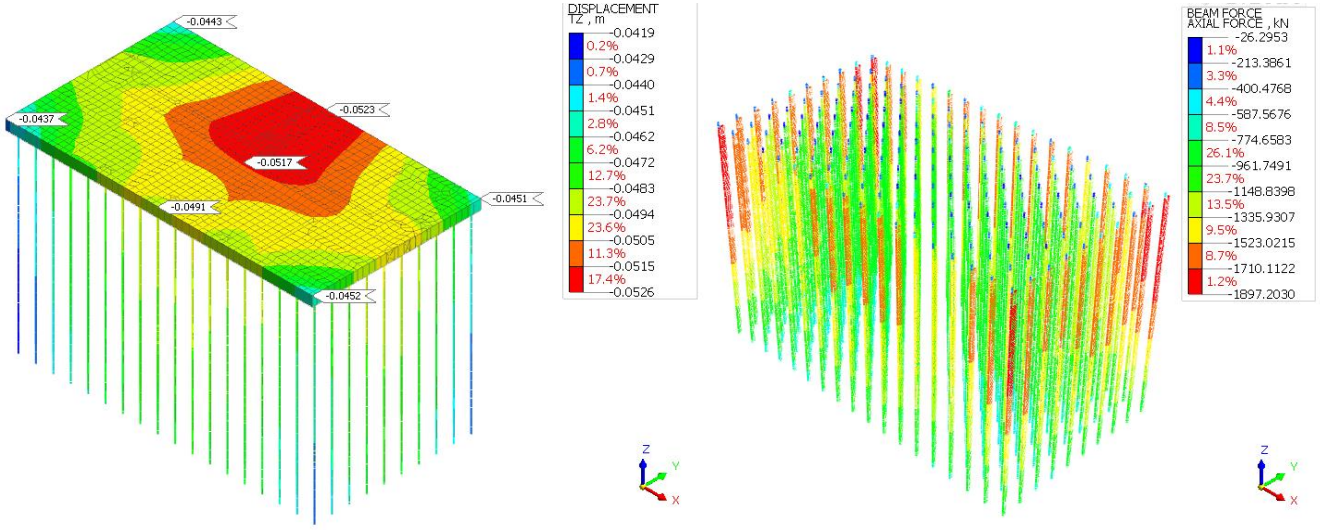


Рисунок 4.9 – Посадка фундамента на инженерно-геологический разрез (слева) и расчетная модель 24-этажного жилого дома по ул. Монтажников в г. Краснодаре (справа)

Первоначальное техническое решение свайно-плитного фундамента (*СПФ*), включало буровые сваи длиной 23,5 метра и диаметром 700 мм, рассчитанные с учетом необходимой несущей способности в сейсмическом районе. Конструктивные особенности фундаментной части здания и результаты расчетов свайного фундамента с жесткой заделкой свай в плиту представлены на рисунке 4.10.



а) *б)*

Рисунок 4.10 – Результаты расчета свайно-плитного фундамента на исследуемом объекте: *а)* осадки свайно-плитного фундамента; *б)* вертикальные усилия в сваях

Свайный фундамент, состоящий из 180 свай, был запроектирован с регулярным шагом под возводимым высотным зданием. Расчет несущей способности свай был выполнен в соответствии с СП 24.13330 [48] и определил ее значение величиной около 230 тонн с учетом влияния сейсмических нагрузок.

В ходе расчетов установлено, что осадки здания соответствуют нормативным требованиям (S_{max}=52,6мм). При рассмотрении задачи установлена недостаточная несущая способность окружающего сваю грунта при передаче на него напряжений через боковую поверхность свай при горизонтальном сейсмическом воздействии. Для соблюдения нормативных требований необходимо либо увеличить количество свай, либо развивать их сечение. Однако, такое решение было крайне сложно вместить в ограниченные габариты фундаментной плиты высотного здания.

Используя установленные в диссертации зависимости, было предложено решение свайного фундамента с ПРС. Расчет несущей способности свай для предложенного фундамента, расположенного в 7-балльной сейсмичности, был выполнен с учетом рекомендаций [41] и составил около 320 тонн при длине свай 17,5 метров.

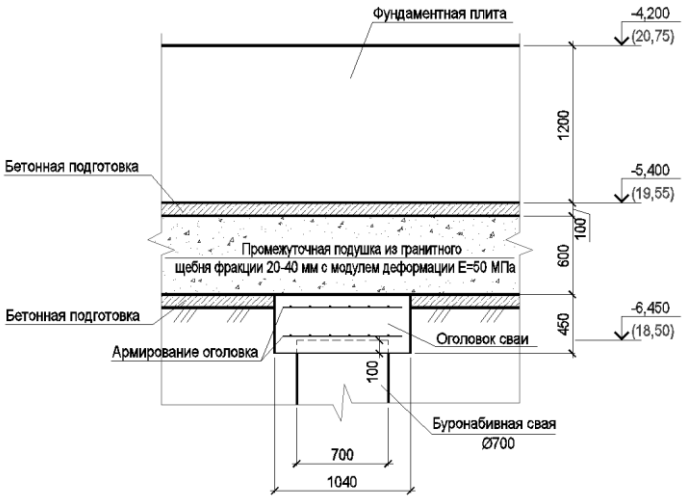
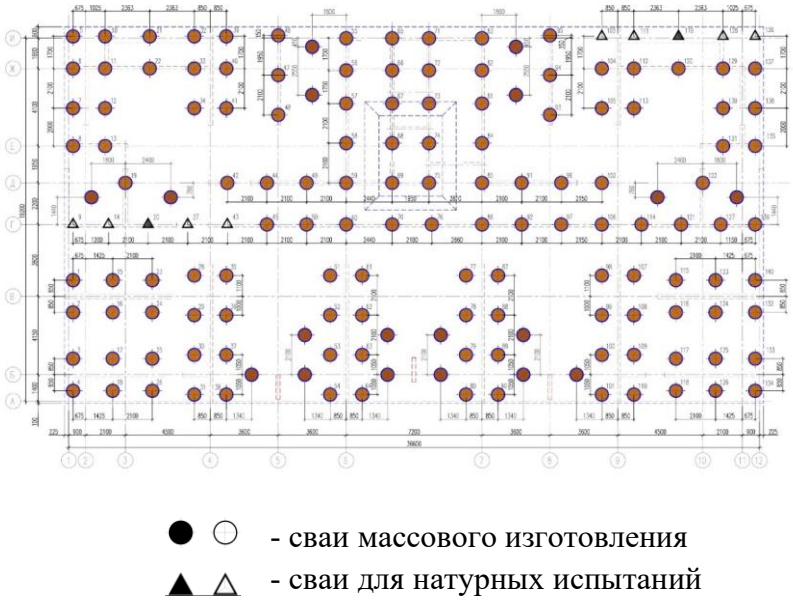


Рисунок 4.11 – Проектный узел свайного поля с фундаментной плитой с учетом ПРС

Количество свай было уменьшено до 150 шт. (рис. 4.12). В отличие от предыдущего варианта в данном решении отсутствовала конструктивная связь между фундаментом и сваями. Между оголовками свай и плитным ростверком устроен промежуточный слой из прочного малосжимаемого материала,

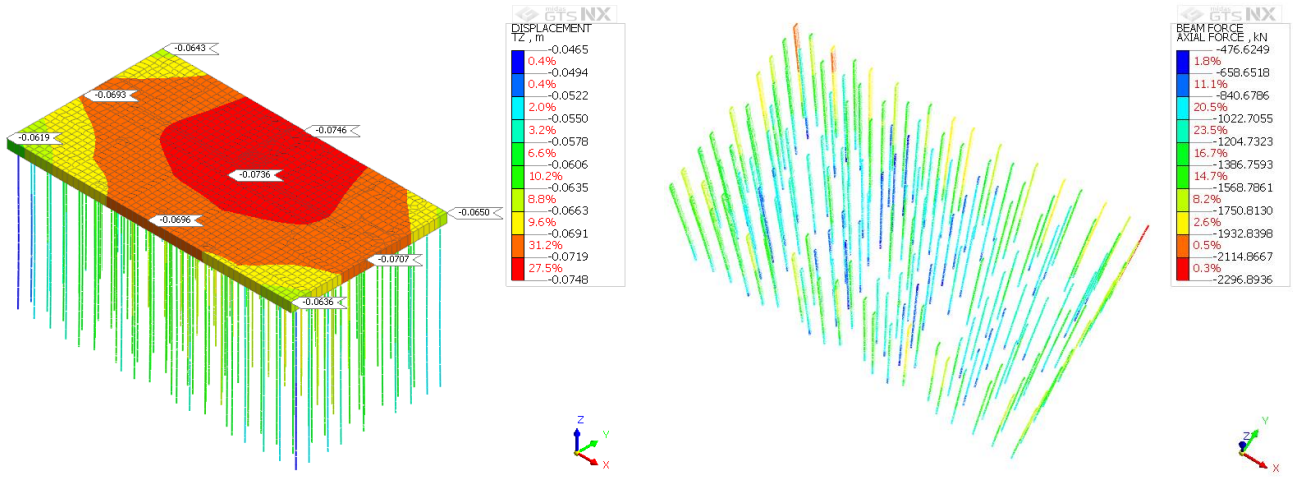
обладающего высокими показателями прочности и твердости (гранитный щебень толщиной 600 мм с модулем деформации E_0=50 МПа, сцеплением C=1 кПа и углом внутреннего трения φ=30º). Такая конструкция при сейсмическом воздействии значительно снижает горизонтальные нагрузки на сваи и обеспечивает их более равномерное распределение, практически исключая перегрузку краевых и угловых зон (см. п. 2.7 настоящей диссертации). Учитывая толщину ПРС (600 мм < d = 700 мм), были запроектированы свайные оголовки диаметром 1,5d.



● ○ - сваи массового изготовления

▲ △ - сваи для натурных испытаний

Рисунок 4.12 – Схема расположения свай для варианта фундамента с учетом введения ПРС



а) *б)*

Рисунок 4.13 – Результаты расчета свайного фундамента с ПРС на исследуемом объекте *а)* осадки фундамента с ПРС; *б)* вертикальные усилия в сваях

Рисунок 4.14 – Процесс изготовления буровых свай (слева) и ПРС (справа)

При реализации разработанного технического решения свайного фундамента с ПРС был осуществлен геотехнический мониторинг, подтвердивший корректность принятых решений (см. рис. 4.15).

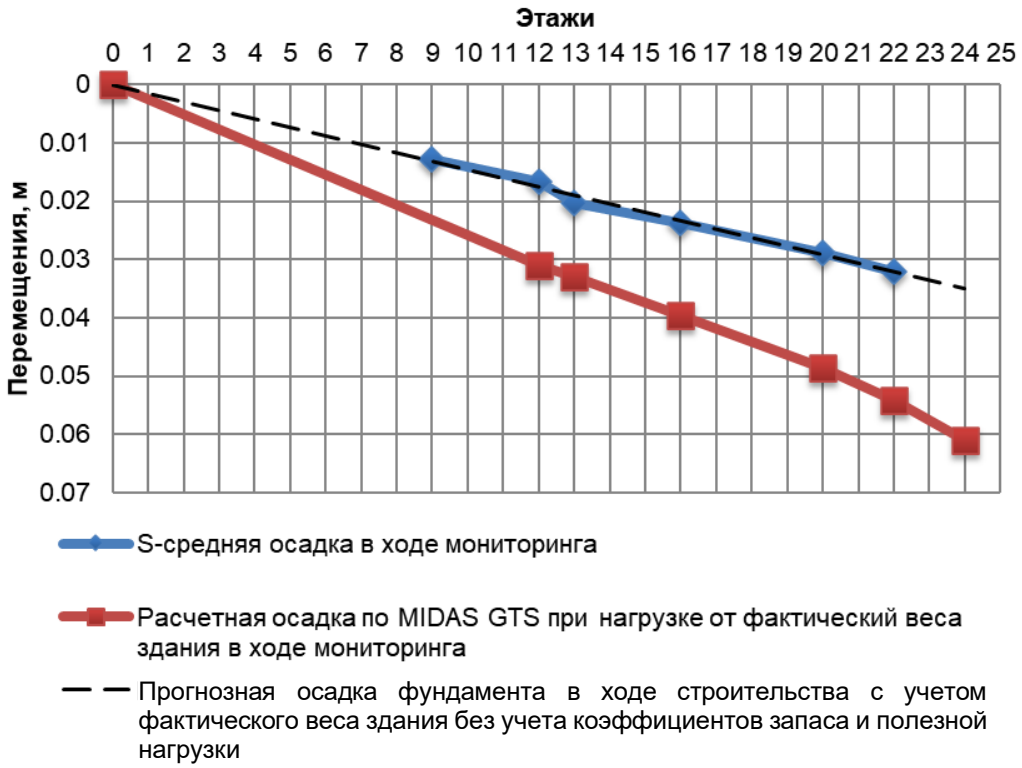


Рисунок 4.15 – Сопоставление расчетных и фактических осадок фундамента

Обоснованное решение свайного фундамента с применением ПРС позволило уменьшить количество свай, снизить горизонтальные нагрузки от сейсмического воздействия, а также сократить сроки производства работ.

4.3.2. Свайные фундаменты с ПРС для группы жилых домов в г. Сочи

Далее в диссертации рассмотрен пример возведения многоэтажных зданий на свайных фундаментах с применением ПРС по улице Гастелло, 27 в Адлерском районе города Сочи, где строительство осложнялось наличием слабых и водонасыщенных грунтов, неоднородно распределенных по глубине (рис. 4.16).

Рисунок 4.16 – Жилой комплекс из многоэтажных зданий по ул. Гастелло в Сочи

На рисунке 4.16 представлен рассматриваемый жилой комплекс, состоящий из четырех 18-этажных жилых зданий, расположенных рядом друг с другом и имеющих одинаковые планировочные решения. Конструктивная схема зданий – перекрестно-стеновая, что обеспечивает жесткость надземного строения, сравнимую с жестким штампом.

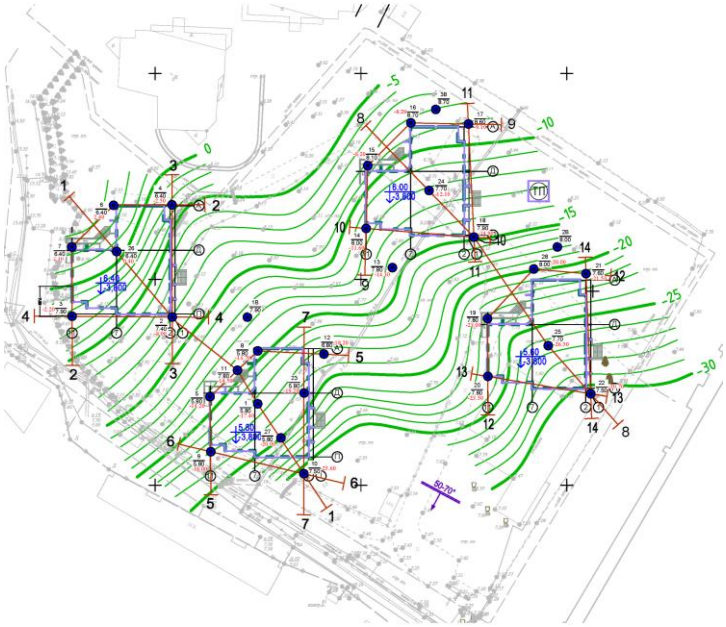


Рисунок 4.17 – Карта кровли несущего слоя

Инженерно-геологические изыскания показали, что грунтовый массив на строительной площадке состоит из суглинистых грунтов с содержанием органики, имеющих участки песчаных прослоев с модулем деформации от 5,6 до 12,8 МПа. Такая залегающая до 30-35 метров толща грунта чередуется со слоями твердых суглинков, слоистых с модулем деформации 18-26,5 МПа.

Таблица 4.3 – Основные прочностные характеристики грунтов площадки строительства

Ус-ные об-ния	Инженерно-геологические элементы	Модуль деформации грунта, МПа	Сцепление, кПа	Угол внут. трения
①	ИГЭ 1. Насыпной грунт	7,0	4,0	22,0
②	ИГЭ 2. Суглинок тугопластичный	12,8	65	2,4
③	ИГЭ 3. Суглинок текучепластичный	6,7	2,0	12,1
④	ИГЭ 4. Суглинок с примесями органики	5,6	21	10,3
⑤	ИГЭ 5. Аргиллит ржаво-бурый с прослоями серого	18,0	225	16,9
⑥	ИГЭ 6. Аргиллит серый, слоистый	26,5	346	17,9

Детальное описание инженерно-геологического разреза площадки представлено на рисунке 4.18, характеристики физико-механических свойств грунтов и условные обозначения – в таблице 4.3.

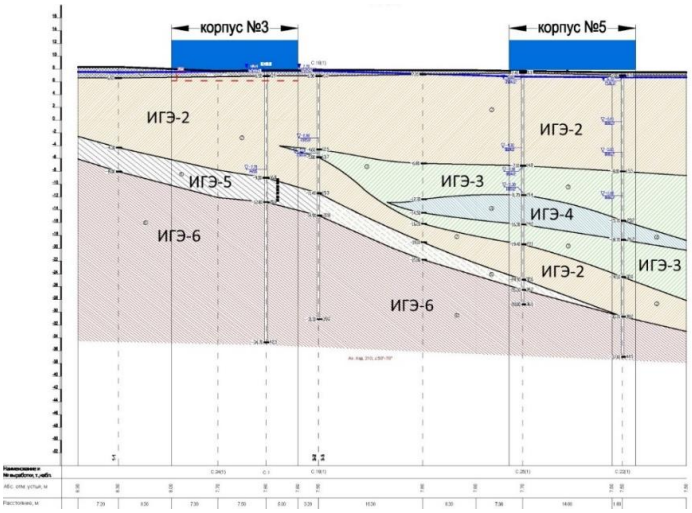


Рисунок 4.18 – Инженерно-геологическое строение площадки на примере разреза 8-8

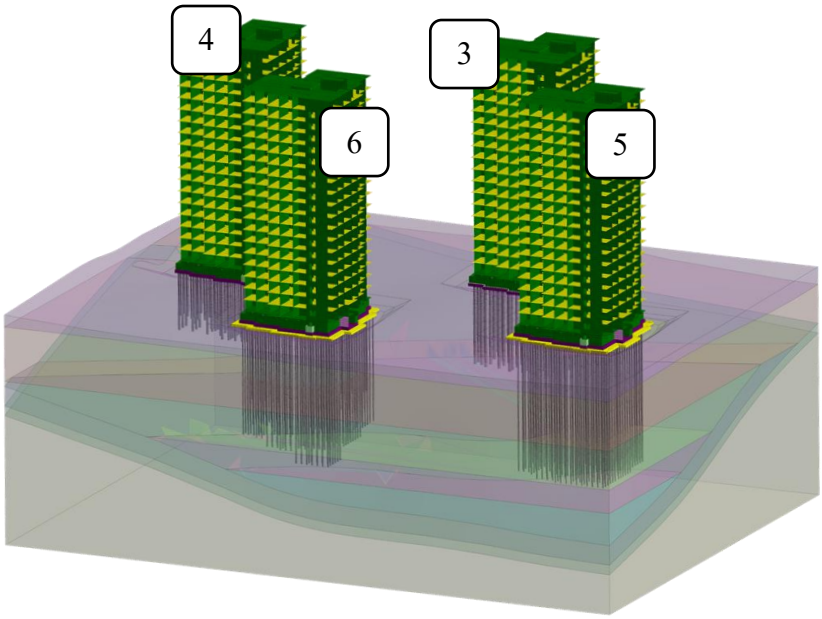


Рисунок 4.19 – Объемная конечно-элементная модель застройки

На основании разработанной методики (см. п. 4.1 диссертации) на первом этапе был рассмотрен плитный вариант фундаментов для данных зданий с целью установления податливости основания для предварительной расстановки свай в поле. Максимальная осадка фундаментных плит на естественном основании (без свай) составила около 400 мм, что существенно превышало допустимые значения (см. рис. 4.20).

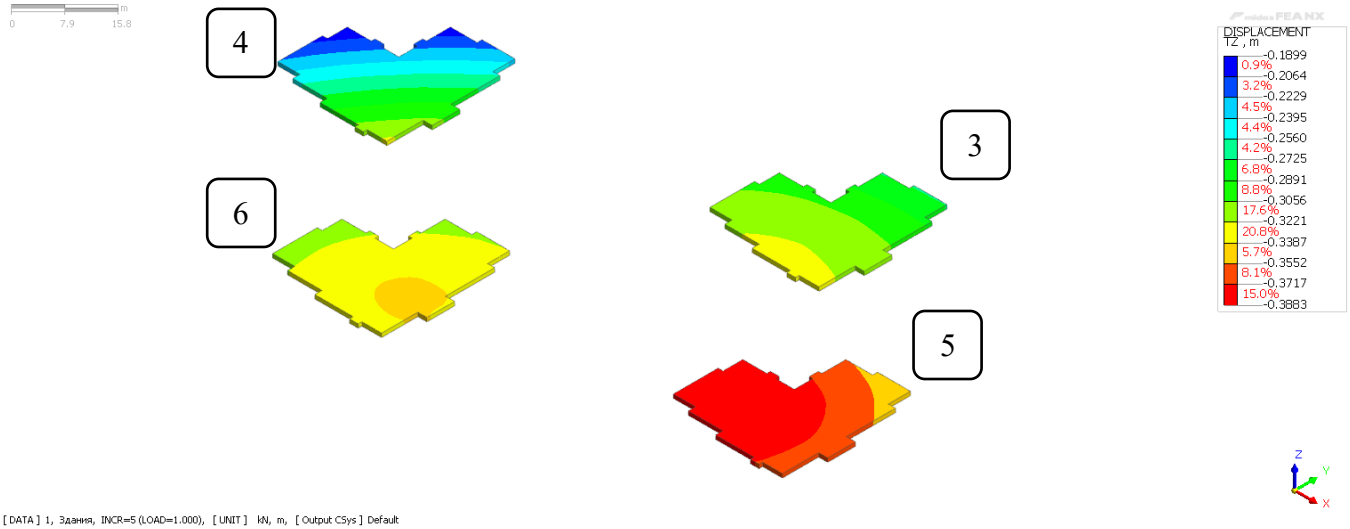


Рисунок 4.20 – Конечные осадки фундаментных плит рассматриваемой группы жилых домов

Первоначально рассматривался вариант свайно-плитного фундамента с использованием буровых свай диаметром 630 мм и длиной 20 метров. Однако в

процессе выполнения опытных свай и их последующих испытаний была выявлена их недостаточная фактическая несущая способность.

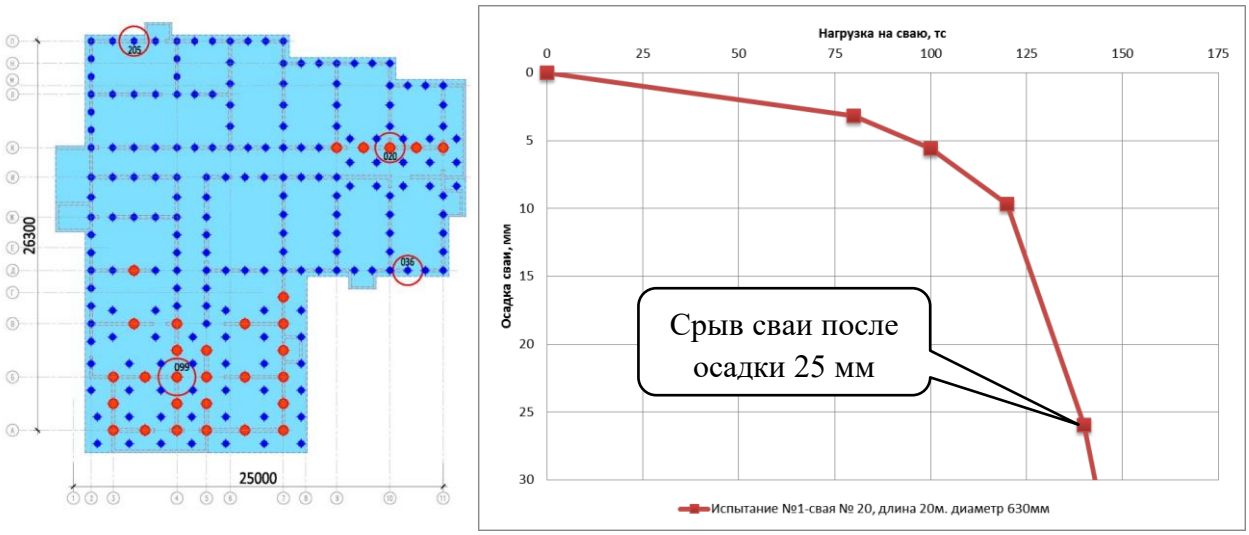


Рисунок 4.21 – Слева представлена схема расположения свай: красным цветом обозначены сваи первоначального проекта длиной 20 метров, синим – новые сваи увеличенной длины (33–35 метров), предназначенные для создания свайного фундамента с ПРС. Справа приведены результаты натурных испытаний несущей способности 20-метровых свай, подтвердившие некорректность инженерно-геологических условий

На основе проведенного анализа был предложен и обоснован проект свайного фундамента с применением ПРС из буроинъекционных свай *CFA* диаметром 400 мм и глубиной до 35 метров. В уровне верха свай предусмотрены железобетонные оголовки диаметром 1,75*d*. Между оголовками устраивался промежуточный слой, который заполнялся и уплотнялся послойно гранитным щебнем с фракциями 20-40 мм и 40-70 мм. (см. рис. 4.22).

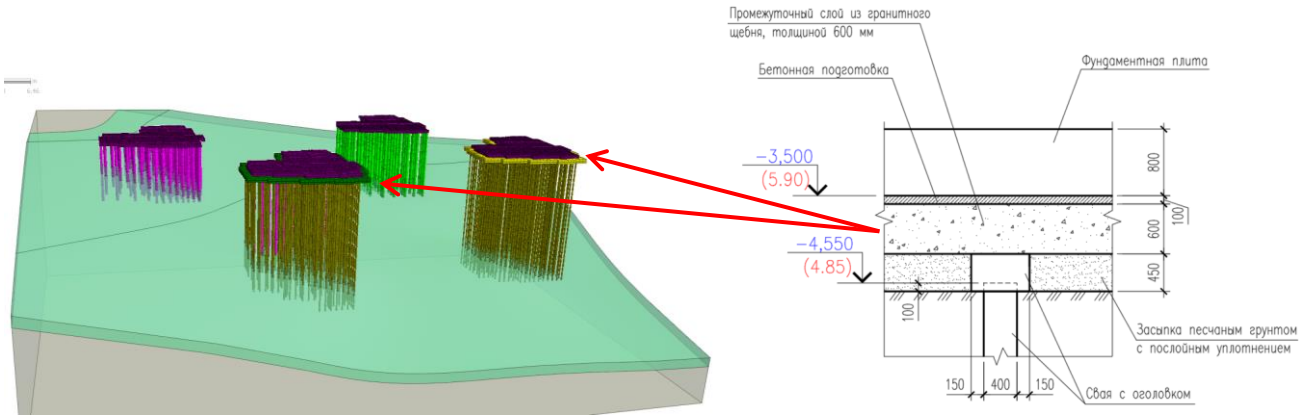


Рисунок 4.22 – Визуализация технического решения фундаментных частей зданий комплекса

ПРС был выполнен высотой 600 мм из гранитного щебня с приведёнными физико-механическими характеристиками: E=40МПа; φ=30˚. Сваи были выполнены переменной длины – 33-35м (см. рис.4.21).

а) *б)*

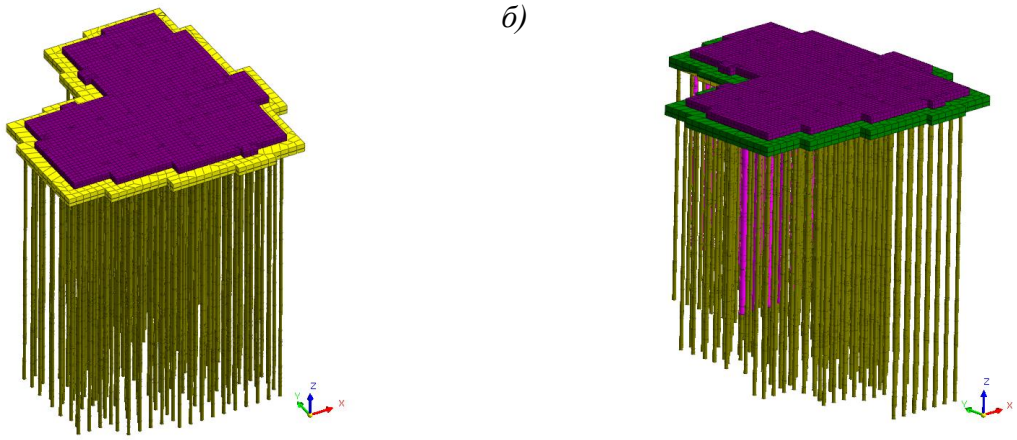


Рисунок 4.23 – Реализация в *MIDAS FEA NX* свайных фундаментов с ПРС рассматриваемых секций: *а)* Секция 5; *б)* Секции 6

В результате выполнения расчета с учетом стадийности возведения конструкций были получены результаты осадок, которые снизились более чем в 4 раза по сравнению с фундаментом на естественном основании благодаря выполнению ПРС (см. рис. 4.24).

а) *б)*

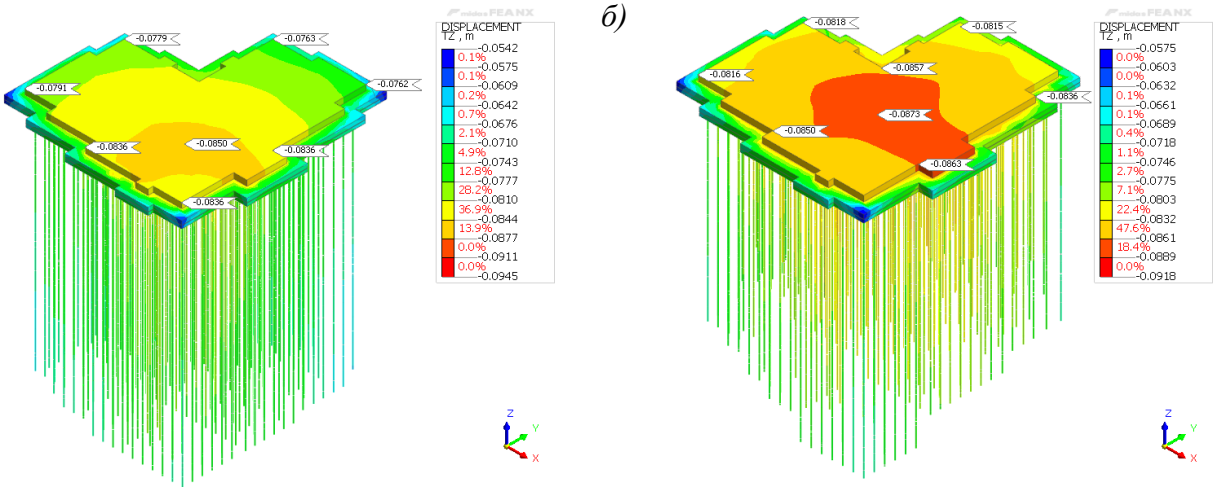


Рисунок 4.24 – Результат вычисления вертикальных деформаций в *MIDAS FEA NX* свайных фундаментов с ПРС рассматриваемых секций: а) – Секции 5; б) – Секции 6

Перед массовым изготовлением были выполнены опытные сваи и подвергнуты испытаниям с применением статической вдавливающей нагрузки, в соответствии с ГОСТ 5686. Расчетная допустимая нагрузка на сваю в фундаменте

составляла 1600 кН. Испытания показали значение F_d в диапазоне 2500-2750 кН. График изменения осадки сваи в зависимости от нагрузки представлен на прилагаемом рисунке 4.25.

В процессе строительства велось наблюдение за осадками, которое подтвердило корректность принятых в проекте параметров свайного фундамента с ПРС. На момент сдачи жилых зданий в эксплуатацию зафиксированные осадки не превышали 70 мм.

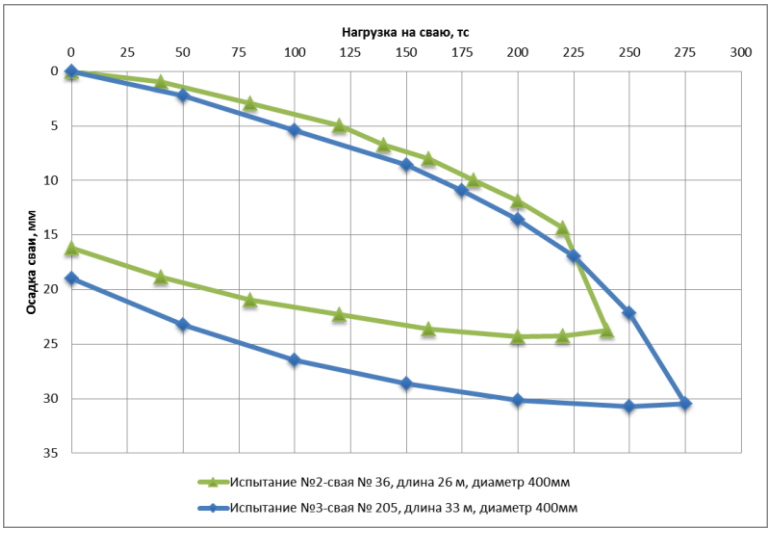


Рисунок 4.25 – График «Осадка – Нагрузка» натурных испытаний свай длиной 26 и 33 метра, диаметром 400 мм вертикальной вдавливающей нагрузкой

Рисунок 4.26 – Объект после завершения строительства

При реализации рассмотренного объекта за счет применения свайного фундамента с ПРС удалось существенно снизить горизонтальные нагрузки на сваи,

что привело к возможности уменьшения их количества. Толщина и характеристики ПРС были назначены в соответствии с разработанной в диссертации методикой. В ходе проведения геотехнического мониторинга установлено соответствие фактических осадок расчетным значениям.

4.3.3. Свайный фундамент с ПРС для высотного здания в условиях переменного рельефа

Высотное здание расположено в Хостинском районе г. Сочи и имеет высоту около 108 метров с учетом двух подземных уровней паркинга [6]. Планировка подземной части здания приближена к прямоугольной форме с габаритами порядка 95 х 50 метров. За нулевую отметку принята абсолютная отметка 74,7 метра. Глубина котлована здания варьируется от 7,5 до 18,4 метров. Низ фундаментной конструкции расположен на отметке 66,75 метра над уровнем моря, а площадка строительства характеризуется сейсмичностью в 9 баллов [17, 24, 91, 92, 95].

Рисунок 4.27 – Общий вид объекта внедрения – высотного здания в г. Сочи

На основе инженерно-геологических исследований геологическая структура участка была исследована до глубины 30 метров и включает в себя следующие грунты (в порядке залегания):

Насыпные грунты ИГЭ-1 представляют собой сложную смесь крупнообломочных элементов с глинистым заполнителем полутвердой консистенции мощностью от 0,9 до 3,5 метров.

Далее встречены нерасчленённые отложения верхнечетвертичного периода и современных делювиально-оползневых образований ИГЭ-2, которые состоят из песчанистой глины, имеющей полутвердую консистенцию и слабую набухаемость с примесью щебня и обломков выветренных осадочных пород (до 25%). Мощность слоя варьируется от 4 до 17 метров.

Среднеплейстоценовые отложения ИГЭ-3 состоят из перемещенных фрагментов аргиллитов, алевритов и песчаников, которые подверглись длительному выветриванию и превратились в полутвердые суглинки с низкой степенью набухания, щебенистых. Их мощность варьируется от 1,0 до 10,2 метров.

Грунты среднего палеогена ИГЭ-4, где преобладают мергели, отличающиеся низкой прочностью, плотной структурой, размягчаемых и нерастворимых. Угол падения пластов коренных пород в юго-западном направлении составляет 15-18 градусов. Максимальная зафиксированная мощность залегания этих пород достигает 20,5 метров.

Во время проходки слоя (ИГЭ-3) древних оползней на участке были обнаружены подземные воды. Таблица 4.4 содержит ключевые нормативные и расчетные данные о физико-механических параметрах грунтов, принятых при проектировании.

Таблица 4.4 – Основные характеристики физико-механических свойств грунтов

Номер ИГЭ		1	2	3	4
Разновидность грунта по ГОСТ 25100		Насыпной грунт	Глина полутвердая	Суглинок полутвердый	Мергель
Плотность грунта (прир. влажн.), т/м3	p_n /p_I /p_{II}	1.95	2.05/2.02/2.03	2.10/2.06/2.07	2.53/2.50/2.51
Коэффициент пористости	e		0.642	0.530	
Показатель текучести	I_L		0.17	0.03	
Степень влажности	S_r		0.98	0.93	
Сцепление, кПа	C_n		56/22*/80**	70/19*/58**	
	C_I		34/9*	60/9*	
	C_{II}		43/13*	64/11*	
Угол вн. трения, град	φ_n		12/10*/14**	14/13*/15**	
	φ_I		8/6*	5/7*	
	φ_{II}		9/7*	8/9*	
Модуль деф. при водонас., МПа	E_o		17	16	
Предел прочности на одноосн. сжатие (водонас.), МПа	$R_{c(вод)}$				10.1

Примечание:
1) Без * – ускоренный сдвиг (ест. влажн.);
2) С * — повт. сдвиг по подг. смоч. поверхности;
3) С ** — конс. сдвиг с предв. упл. под водой.

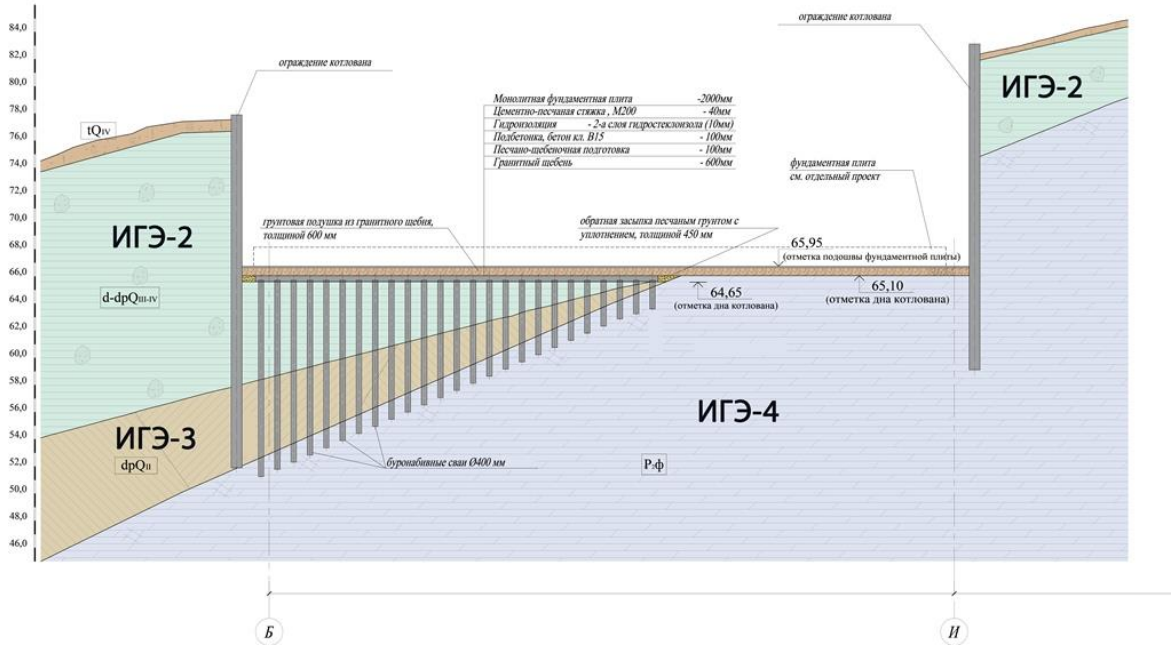


Рисунок 4.28 – Привязка технического решения фундаментов к ИГУ

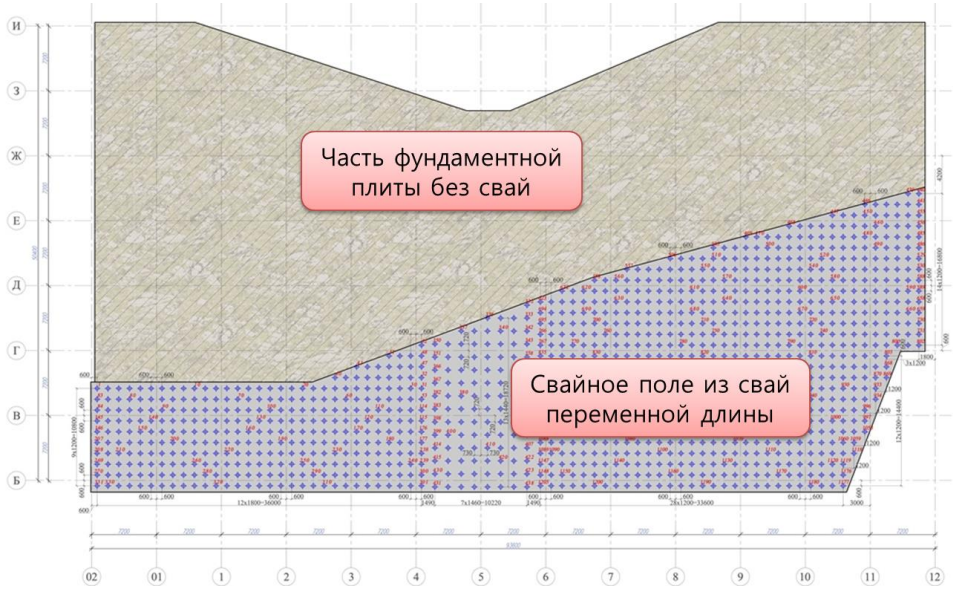


Рисунок 4.29 – Схема расположения свай под фундаментной плитой высотного здания

Проектное решение предусматривало применение буронабивных свай диаметром 400 мм, имеющих переменную длину от 2 до 18 метров (см. рис. 4.28). Устройство свай осуществлялась с отметки дна котлована, равной -9,10 м (абсолютная отметка 65,60 м), как показано на рисунке 4.30. Глубина заложения свай определялась исходя из необходимости погружения острия свай в мергель (ИГЭ-4) на глубину не менее одного метра. Для создания единой конструкции, способной эффективно распределять нагрузки, все сваи фундамента поверху были объединены сплошной железобетонной плитой высотой 450 мм. Для минимизации воздействия горизонтальных сил, возникающих во время землетрясения 9 баллов, между сваями и плитой здания был уложен ПРС из гранитного щебня, имеющий толщину 600 мм. Фундаментная плита из монолитного железобетона была возведена по промежуточному слою из щебня, уложенного слоями толщиной 20 сантиметров и тщательно утрамбованного. Согласно проектному решению, для осей «Д-И/2-6» и «Е-И/6-12» исключается использование свай из-за залегания мергелей в основании фундамента. В этих осях возведение фундаментной плиты осуществляется непосредственно на естественном грунте по предварительно уплотненном промежуточному слою. Такой подход позволил обосновать снижение количества свай до 50% ввиду отсутствия необходимости их устройства под всем пятном застройки.

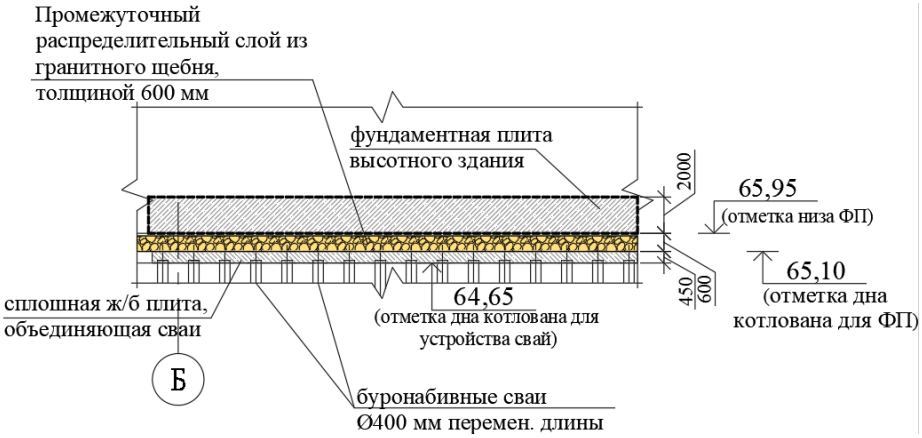


Рисунок 4.30 – Техническое решение свайного фундамента с ПРС для высотного здания

В ходе расчетов установлено, что прогнозная осадка здания составит 3,0-4,0 см. При этом 2,0-2,5 см этой осадки будет вызвано сжатием материала ПРС.

Рисунок 4.31 – Начало бурения свай (слева) и устройство промежуточного слоя (справа) из гранитного щебня для компенсации горизонтальных воздействий на высотное здание

Рисунок 4.32 – Завершение фасадных работ (слева) и вид на момент сдачи в 2021 г. (справа)

В процессе возведения объекта осуществлялся геотехнический мониторинг за состоянием самого здания и грунтового массива, в соответствии с требованиями нормативных документов РФ.

4.4. Выводы по Разделу 4

1. Разработанная методика конструирования свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем (ПРС) показала высокую эффективность при ее практической реализации для снижения и перераспределения осадок многоэтажных и высотных зданий. Использование разработанных диаграмм коэффициента эффективности k_{ef} позволяет на предварительном этапе назначать параметры свайного поля (диаметр, шаг, длина) и толщину ПРС, обеспечивая уменьшение осадок зданий, по сравнению с плитными фундаментами на естественном основании.

2. 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.

3. 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.

4. Разработанные технические решения 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований

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 *1,5–2,5d* 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 1,5–2,5d (где d – диаметр свай) в сравнении с решениями без оголовков для межсвайного расстояния 5-7d.

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 сейсмических 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 технические решения 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. Результаты исследований также внедрены в образовательный процесс: применяются при чтении лекций и проведении практических занятий для студентов архитектурно-строительного факультета Кубанского государственного аграрного университета им. И.Т. Трубилина.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследований

Полученные патенты на изобретения РФ в соавторстве с научным руководителем и сотрудниками кафедры «Оснований и фундаментов» КубГАУ на усовершенствованные конструкции свайных и плитных фундаментов с промежуточным распределительным слоем позволяют рекомендовать их интеграцию в проектную практику для повышения несущей способности и равномерного распределения нагрузок. В рамках дальнейших исследований планируется объединить данные решения в новые технические решения, сочетающие преимущества свайных и плитных фундаментов с распределительными слоями. Это обеспечит создание фундаментов с большей эффективностью, долговечностью и адаптацией к сложным грунтовым условиям.

Перспективными направлениями являются:

- разработка и совершенствование методик расчета совместной работы элементов системы «основание – фундамент – ПРС – надземное сооружение»;
- оптимизация и рационализация геометрических и прочностных параметров ПРС для минимизации деформаций;
- исследование взаимодействия материалов ПРС в многослойных системах под статическими и динамическими нагрузками.

Реализация указанных мер позволит сформировать и предложить фундаментные конструкции, сочетающие высокую несущую способность, экономическую эффективность и надежность в условиях сложных и неоднородных оснований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аль Шемали, А. Сейсмические подушки для защиты зданий и сооружений от волновых воздействий : дис. … канд. техн. наук : 05.23.17 / А. Аль Шемали. – Москва, 2022. – 145 с.
2. Бабарыкин, Н.О. Физическое моделирование свайного основания с грунтовой подушкой / Н.О. Бабарыкин // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т. 1. – С. 166–172.
3. Гиретти, Д. Моделирование свайно-плитных фундаментов в песчаных грунтах = Modelling of piled raft foundations in sand : дис. … д-ра философии (PhD) / Д. Гиретти ; рук.: В. Фиораванте, М. Ямёльковски ; Университет Феррары. – Феррара, 2010. – 2010.
4. Гольдштейн, М.Н. Механика грунтов, основания и фундаменты : учебник для вузов ж.-д. трансп. / М.Н. Гольдштейн, А.А. Царьков, И.И. Черкасов. – М. : Транспорт, 1981. – 320 с. – 268 ил., 29 табл., библиогр. 37 назв.
5. ГОСТ 12248.3–2020. Грунты. Определения характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. – Введен в действие 01.06.2021. – М.: Стандартинформ, 2020. – 36 с.
6. Договор №1662/38-148-06/СП между ООО «Датонг Групп» и НИИОСП им. Н. М. Герсеванова – филиалом ФГУП «НИЦ «Строительство».
7. Караулов А. М. Несущая способность оснований осесимметричных фундаментов зданий и сооружений : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.23.02 / Караулов Александр Михайлович ; [Санкт-Петербургский гос. архитект.-строит. ун-т]. – Санкт-Петербург, 2009. – 44 с.
8. Караулов, А. М. Несущая способность слабых оснований конусообразных отвалов сыпучих материалов / А. М. Караулов // Геотехника: научные и прикладные аспекты строительства надземных и подземных сооружений на сложных грунтах : межвуз. тематический сб. трудов. – СПб. : СПбГАСУ, 2008. – С. 125–129.

9. Караулов, А. М. Практический метод расчета вертикально армированного основания ленточных и отдельностоящих фундаментов транспортных сооружений / А. М. Караулов // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 2. – С. 183–190.
10. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности : учебное пособие для университетов / Л. М. Качанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1969. – 420 с.
11. Крутов, В. И. Расчет армированных массивов лессовых грунтов / В. И. Крутов, И. К. Попсуенко // Расчёт и проектирование оснований, фундаментов и подземных сооружений : сб. науч. тр. / НИИ оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова. – Москва, 1980. – Вып. 70. – С. 46–57.
12. Крутов, В. И. Устранение просадок лессовых грунтов от их собственного веса путем армирования лессовой толщи / В. И. Крутов, И. К. Попсуенко // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1976. – № 6. – С. 17–19.
13. Мариничев, М. Б. Обоснование применения анкерных микросвай как сжимаемых элементов в составе фундаментов при реконструкции и новом строительстве / М. Б. Мариничев, П. А. Ляшенко, В. В. Денисенко, И. Г. Азов, И. Г. Ткачев // Строительство и архитектура. – 2022. – № 1. – С. 25–36. – DOI: https://doi.org/10.29039/2308-0191-2021-10-1-11-15 .
14. Мариничев, М.Б. Опыт реализации нестандартных методов проектирования и строительства фундаментов высотных зданий в сейсмических районах / М.Б. Мариничев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 125. – С. 623–657. – eISSN 1990-4665.
15. Мариничев, М. Б. Особенности армирования неоднородных оснований высотных зданий в сейсмических районах / М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев // Материалы Национальной научно-технической конференции с иностранным участием «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении». – Новочеркасск : Изд-во ИД «Политехник», 2018. – С. 174–185.
16. 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.

17. Мариничев, М. Б. Особенности строительства фундаментов высотных зданий на крутых склонах в районах с высокой сейсмичностью / М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев // Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 20–27. – DOI: 10.29039/article_5ca75f9b461354.57548169.
18. Мариничев, М. Б. Особенности учета инженерно-геологического строения оснований пойменных территорий в сейсмических районах при выборе технических решений фундаментов высотных зданий / М. Б. Мариничев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – Пермь : ПНИПУ, 2018. – № 1. – С. 103–113.
19. Мариничев, М. Б. Оценка эффективности свайно-плитных фундаментов с промежуточной подушкой на примере высотных зданий в сейсмических районах Краснодарского края / М. Б. Мариничев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета [Электронный ресурс]. – Томск: ТГАСУ, 2017. – № 2(061). – Режим доступа: http://www.tsuab.ru/upload/files/additional/2_2017_14_Marinichev_file_5189_4644_4039.pdf .
20. 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 // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2013. – № 10 (094). – С. 758–771. – IDA [article ID]: 0941310051. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2013/10/pdf/51.pdf . – 0,875 у.п.л.
21. Мариничев, М. Б. Принципы фундаментостроения многоэтажных жилых зданий на неравномерно сжимаемых пойменных участках в сейсмических районах /

М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев // Материалы всероссийской национальной конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и геотехнические проблемы территорий». – Пермь : ПНИПУ, 2017. – С. 263–272.

22. Мариничев, М. Б. Разработка конструктивного решения вертикально армированного основания плитного фундамента высотного здания в сейсмическом районе / М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев // Строительство и архитектура. – 2016. – Том 4, Выпуск 1 (10). – С. 37–44.
23. Мариничев, М. Б. Расчет и конструирование свайных фундаментов высотных зданий в сложных грунтовых условиях / М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев, П. А. Ляшенко, В. В. Денисенко // ФУНДАМЕНТЫ. – 2021. – № 1 (3). – С. 58–62.
24. Мариничев, М.Б. Фундаменты многоэтажных и высотных зданий в особых условиях юга России : дис. … докт. техн. наук : 05.23.02 / М.Б. Мариничев ; науч. рук. А.И. Полищук ; Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. – Краснодар, 2023. – 355 с.
25. Мирсаяпов, И. Т. Исследование прочности и деформируемости просадочных грунтовых оснований, армированных вертикальными элементами / И. Т. Мирсаяпов, В. Р. Мустакимов // Труды международной конференции по геотехнике «Взаимодействие сооружений и оснований: методы расчета и инженерная практика». Том 2. – СПб. : ПГУПС, 2005. – С. 40–45.
26. Мирсаяпов, И. Т. Расчет просадочных грунтовых массивов, армированных вертикальными элементами / И. Т. Мирсаяпов, В. Р. Мустакимов // Известия КГАСУ. – 2006. – С. 79–81.
27. Мирсаяпов, И. Т. Расчетная модель несущей способности и осадок грунтового основания, армированного вертикальными и горизонтальными элементами / И. Т. Мирсаяпов, Р. А. Шарафутдинов // Известия КГАСУ. – 2016. – № 1. – С. 179–187.
28. Нагалевский, Ю. Я. Физическая география Краснодарского края : учебное пособие / Ю. Я. Нагалевский, В. М. Чистяков. – Краснодар : Северный Кавказ, 2003. – 2-е изд., испр. и доп. – 256 с.

29. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1954. – 648 с.
30. Нуждин, Л. В. Расчет грунтовых оснований, армированных жесткими вертикальными стержнями / Л. В. Нуждин, М. Л. Нуждин // Современные вопросы геотехники : сб. науч. статей по материалам конференции, посвященной 75-летию профессора А. И. Полищука (Краснодар, 28 июля 2024 года). – Краснодар : КубГАУ, 2024. – С. 153–172.
31. Нуждин, Л. В. Усиление грунтового основания вертикальным армированием и высоконапорным инъецированием / Л. В. Нуждин, М. Л. Нуждин // Усиление оснований и фундаментов : сб. докладов. Труды VIII Петрухинских чтений (Москва, 25 мая 2023 года). – Москва : АО «НИЦ «Строительство», 2024. – С. 47–103. – DOI: 10.37538/2713-1149-2024-47-103.
32. Нуждин, М. Л. Экспериментальные исследования усиления грунтового основания свайных фундаментов армированием жесткими включениями / М. Л. Нуждин // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 5–15. – DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01.
33. Ободовский, А. А. Проектирование свайных фундаментов / А. А. Ободовский. – М. : Стройиздат, 1977. – 112 с.
34. ОДМ 218.3.1.001-2020. Методические рекомендации по расчетам гибкого ростверка с применением геосинтетических материалов. Основные положения расчетов. – М.: Росавтодор, 2020. – 49 с.
35. Основания, фундаменты и подземные сооружения : справочник проектировщика / ред. Е. А. Сорочан, Ю. Г. Трофименков ; авт.: Б. В. Бахолдин [и др.]. – М. : Стройиздат, 1985. – 479 с.
36. Основы расчета и конструирования фундаментов многоэтажных, высотных и уникальных зданий : научно-практическое пособие / М.Б. Мариничев, О.Ю. Ещенко, В.А. Демченко, И.Г. Ткачев. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2022. – 224 с. – ISBN 978-5-907597-29-7.

37. Пат. 138667 U1 Российская Федерация, МПК E02D 27/34. Сейсмостойкий свайный фундамент / О. А. Шулятьев, И. А. Боков ; заявитель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский центр «Строительство», ОАО «НИЦ «Строительство». – № 2013143367/03 ; заявл. 25.09.2013 ; опубл. 20.03.2014.
38. Пат. 2761795 Российская Федерация, МПК E02D 5/46. Способ возведения буронабивной сваи повышенной несущей способности для строительства в сейсмических районах / М. Б. Мариничев, П. А. Ляшенко, И. Г. Ткачев [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – № 2021107589 ; заявл. 22.03.2021 ; опубл. 26.01.2022.
39. Першин, М. Н. Укрепление грунтов композиционными материалами на основе сланцевых смол / М. Н. Першин, Е. Н. Баринов // Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве (Тезисы докладов на IX Всесоюзном науч.-техн. совещании). – М. : Стройиздат, 1978. – С. 180–182.
40. Пономарев, А. Б. Использование армированных оснований в глинистых грунтах / А. Б. Пономарев, В. И. Клевеко // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала : межвуз. сб. науч. тр. : ротапринт. – Пермь : РИОПГТУ, 1995. – С. 86–90.
41. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах : монография / Р.А. Мангушев, Н.С. Никифорова, В.В. Конюшков, А.И. Осокин. – Москва : Издательство АСВ, 2013. – 256 с.
42. Рекомендации по проектированию свайных фундаментов с промежуточной подушкой для зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах. – Кишинев : Изд-во ЦК КПСС Молдавия, 1974. – 20 с.
43. Рекомендации по расчету железобетонных ростверков свайных фундаментов под колонны зданий и сооружений промышленных предприятий / АО «ЦНИИПромзданий». – Утверждены 01.01.1974. – М.: Стройиздат, 1974.

44. Саурин, А. Н. Опыт преобразования основания фундаментной плиты набивными сваями в раскатанных скважинах / А. Н. Саурин, Ю. В. Редькина // Межвузовский тематический сборник трудов. – С.-Петербург, 2005. – С. 49–55.
45. Саурин, А. Н. Сваи в раскатанных скважинах / А. Н. Саурин // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – № 12. – С. 42–43.
46. Сахаров, А. С. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А. С. Сахаров [и др.]. – Киев ; Лейпциг : Вища школа, ФЕБ Фахбухферпаг, 1982. – 479 с.
47. Серый, Д. Г. Современные подходы к рассмотрению взаимодействия сваи с грунтом / Д. Г. Серый, И. Г. Ткачев // Актуальные вопросы строительства: конструкции, технологии, экономика : сб. статей по материалам конференции архитектурно-строительного факультета (Краснодар, 17 февраля 2021 года). – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2021. – С. 103–108.
48. СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. (с Изменением № 1). – М. : Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2021. – 121 с.
49. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения: 3-е издание, дополненной и переработанное / Под общей ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2023. – 1084 с.
50. Таранов, В. Г. Доминик Доминикович Баркан [Электронный ресурс] / В. Г. Таранов // ТВО СИБГТВ. – URL: http://tvosibgtv.ru/others/taranov-vg-dominik-dominikovich-barkan.html (дата обращения: 15.10.2023).
51. Тер-Мартиросян, З. Г. Механика грунтов : учебное пособие для специальности 290300 «Промышленное и гражданское строительство» направления 653500 «Строительство» / З. Г. Тер-Мартиросян. – М. : Изд-во АСВ, 2005. – 488 с. : ил. – ISBN 5-93093-376-6.
52. Тер-Мартиросян, З. Г. Усиление слабых грунтов в основании фундаментных плит с использованием технологии струйной цементации грунтов / З. Г. Тер-Мартиросян, П. В. Струнин // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4-2. – URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/usilenie-slabyh-gruntov-v-osnovanii-fundamentnyh-plit-s-ispolzovaniem-tehnologii-struynoy-tsementatsii-gruntov (дата обращения: 31.08.2024).

53. Ткачев, И. Г. Особенности расчета и конструирования фундаментов высотных зданий с двуслойным ростверком / И. Г. Ткачев, Н. С. Коломиец // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сб. статей по материалам 75-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2019 год / отв. за выпуск А. Г. Кощаев. – 2020. – С. 532–535.
54. Федоровский, В. Г. Метод расчета свайных полей и других вертикально армированных грунтовых массивов / В. Г. Федоровский, С. Г. Безволев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1994. – № 3. – С. 11–15.
55. Федоровский, В. Г. Методика расчета фундаментных плит на нелинейно-деформируемом во времени основании / В. Г. Федоровский, С. Г. Безволев, О. М. Дунаев // Нелинейная механика грунтов : тр. IV Рос. конф. – С.-Петербург, 1993. – Т. 1. – С. 81–86.
56. Флорин, В. А. Основы механики грунтов. Том 1 / В. А. Флорин. – Ленинград : Стройиздат, 1959. – 356 с.
57. Харр, М. Е. Основы теоретической механики грунтов / М. Е. Харр ; пер. с англ. М. Н. Гольдштейна ; науч. ред. М. П. Беликов. – М. : Стройиздат, 1971. – 320 с.
58. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М. : Гостехиздат, 1956. – 407 с.
59. Цытович, Н. А. Механика грунтов (краткий курс) / Н. А. Цытович. – М. : Высш. шк., 1983. – 288 с.
60. Шашкин, А. Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта / А. Г. Шашкин // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – Т. 2. – С. 1–32.
61. Швецов, Г. И. Основания и фундаменты : справочник / Г. И. Швецов [и др.]. – М. : Высш. шк., 1991.

62. Ameratunga, J. Soft Clay Engineering and Ground Improvement / J. Ameratunga, N. Sivakugan, B. M. Das (ed.). – CRC Press, 2021.
63. American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM D4767:2011. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. – Superseded by ASTM D4767:2011:R2020. – Published on 15-01-2011. – Superseded on 08-11-2023. – Available formats: Hardcopy, PDF. – English. – Philadelphia: ASTM International, 2011.
64. Bell, A. L. et al. Embankment support using geogrids with vibro concrete columns / A. L. Bell [и др.] // Proceedings, 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes, and Related Products. – 1994. – Т. 1. – С. 335–338.
65. Bergado, D. T. Full scale load test of granular piles with different densities and different proportions of gravel and sand on soft Bangkok clay / D. T. Bergado, F. L. Lam // Soils and Foundations. – 1987. – Т. 27, № 1. – С. 86–93.
66. British Standards Institution (BSI). BS 1377-8:1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes – Shear strength tests (effective stress). – Superseded by BS EN ISO 17892-9:2018. – Published on 21-12-1994. – Superseded on 13-04-2018. – Available formats: Hardcopy, PDF. – English. – London: British Standards Institution, 1990.
67. British Standards Institution (BSI). BS 8006:1995. Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soil and Other Fill. Section 8. Design of Embankment with Reinforced Soil Foundation on Poor Ground. – P. 98–121.
68. Cao, X. D. Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand / X. D. Cao, I. H. Wong, M. F. Chang // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2004. – Т. 130, № 2. – С. 129–138.
69. Carlsson, B. Reinforced soil, principles for calculation / B. Carlsson // Terratema AB, Linköping. – 1987. – Т. 525.
70. Collin, J. G. Column supported embankment design considerations / J. G. Collin // Proceedings of the 52nd Annual Geotechnical Engineering Conference. – Minnesota, 2004. – С. 51–78.

71. Courant, R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations / R. Courant // Bulletin of the American Mathematical Society. – 1943. – T. 49, № 1. – C. 1–23.
72. CUR 226. Design Guideline Basal Reinforced Piled Embankments / In: Design Guideline Basal Reinforced Piled Embankments (van Eekelen S. J. M., Brugman M. H. A., eds.). – London : CRC Press, 2016. – P. 1–156.
73. El Sawwaf, M. Experimental study of eccentrically loaded raft with connected and unconnected short piles / M. El Sawwaf // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2010. – T. 136, № 10. – C. 1394–1402.
74. Fioravante, V. Contact versus noncontact piled raft foundations / V. Fioravante, D. Giretti // Canadian Geotechnical Journal. – 2010. – T. 47, № 11. – C. 1271–1287.
75. Fioravante, V. Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer / V. Fioravante // Géotechnique. – 2011. – T. 61, № 2. – C. 121–132.
76. German Geotechnical Society (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V., DGGT). Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGEO: Translation of the 2nd German Edition / Working Group 5.2 «Analysis and Dimensioning of Soil Structures using Geosynthetic Reinforcements», Technical Group «Synthetics in Geotechnical Engineering». – Chairman: AOR Dipl.-Ing. Gerhard Bräu. – Translator: Alan Johnson. – Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2011. – ISBN 978-3-433-02983-1.
77. Guido, V. A. Plate loading tests on geogrid-reinforced earth slab / V. A. Guido // Geosynthetic'87 Conf. – 1987. – C. 216–225.
78. Han, J. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil / J. Han, M. A. Gabr // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2002. – T. 128, № 1. – C. 44–53.
79. Hashin, Z. The elastic moduli of fiber reinforced materials / Z. Hashin, B. W. Rosen // Journal of Applied Mechanics, Trans ASME. – 1964. – No. 31. – P. 223–232.

80. He, J. B. Research on cushion action mechanism of CFG pile composite foundation for expressway / J. B. He, B. N. Hong, G. F. Qiu // Rock and Soil Mechanics. – 2004. – T. 25. – C. 1663–1666.
81. Hewlett, W. J. Analysis of piled embankments / W. J. Hewlett, M. F. Randolph // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. – Elsevier Science, 1988. – T. 25, № 6. – C. 297–298.
82. International Organization for Standardization (ISO). ISO/TS 17892-9:2004. Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water-saturated soil. – First edition, 2004-10-15.
83. Jones, C. Geotextile reinforced piled embankments / C. Jones // 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Den Haag, 1990. – 1990. – T. 1. – C. 155–160.
84. Kempfert, H. G. Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen / H. G. Kempfert // Bautechnik. – 1997. – T. 74, № 12. – C. 818–825.
85. Kempfert, H. G. et al. German recommendations for soil reinforcement above pile-elements / H. G. Kempfert [и др.] // EUROGeo3, Third Geosynthetic Conference, München. – 2004. – T. 1. – C. 279–283.
86. Labuz, J. F. Mohr-Coulomb failure criterion / J. F. Labuz, A. Zang // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2012. – T. 45, № 6. – C. 975–979.
87. Li, N. Numerical tests on the mechanism of the cushion in composite foundation / N. Li, X. Han // Rock Soil Mech. – 2000. – T. 21. – C. 10–15.
88. Liang, F. Optimization of composite piled raft foundation with varied rigidity of cushion / F. Liang, J. Li, L. Chen // Foundation Analysis and Design: Innovative Methods. – 2006. – C. 29–34.
89. Liu, K. Performance of rigid-flexible-pile foundation with cushion / K. Liu, X. Xie, H. Liu // Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering. – 2010. – T. 163, № 4. – C. 221–227.

90. Madhav, M. R. Design of granular piles for embankments on soft ground / M. R. Madhav, D. D. Nagpure // Proc. 12th SE Asian Geot. Conf., Kuala Lumpur. – 1996. – T. 1. – C. 285–290.
91. Marinichev, M. B. Foundations design and construction for high-rise buildings in seismic areas / M. B. Marinichev, I. G. Tkachev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 918. – P. 012020. – DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012020.
92. 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 мая 2021 года. – Perm, 2021. – P. 012039. – DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012039.
93. Niu, X. 3D numerical analysis of synergetic interaction between high-rise building basement and CFG piles foundation / X. Niu [et al.] // Applied Sciences. – 2018. – T. 8, № 11. – C. 2040.
94. Okyay, U. S. Étude expérimentale et numérique des transferts de charge dans un massif renforcé par inclusions rigides : application à des cas de chargements statiques et dynamiques : thèse de doctorat / Umur Salih Okyay ; sous la direction de Richard Kastner, Daniel Dias. – Lyon, INSA, 2010. – École doctorale Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (Villeurbanne).
95. 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 Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Astana, Kazakhstan, 14–18 августа 2023 года. – Astana, Kazakhstan : Creative Commons, CC BY-NC, 2023. – P. 2358–2364.
96. Poulos, H. G. Foundations and retaining structures–research and practice / H. G. Poulos, J. P. Carter, J. C. Small // Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – AA Balkema Publishers, 2002. – T. 4. – C. 2527–2606.

97. Rasouli, H. Centrifuge modeling of non-connected piled raft system / H. Rasouli [et al.] // International Journal of Civil Engineering. – 2015. – Т. 13, № 2. – С. 114–123.
98. Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements (for the English version). Projet National ASIRI. – Paris: Presses des Ponts, 2012. – ISBN 978-2-85978-462-1.
99. Rogbeck, Y. Reinforced piled embankments in Sweden – design aspects / Y. Rogbeck // 6th International Conference on Geosynthetics (ICG), 1998. – 1998.
100. Russell, D. A new design procedure for piled embankments / D. Russell, P. J. Naughton, G. Kempton // Proceedings of the 56th Canadian Geotechnical Conference and 2003 NAGS Conference. – CGS Winnipeg, MB, 2003. – Т. 1. – С. 858–865.
101. Russell, D. An assessment of design methods for piled embankments / D. Russell, N. Pierpoint // Ground Engineering. – 1997. – Т. 30, № 10.
102. Schaefer, V. R. Ground modification methods: reference manual / V. R. Schaefer [et al.]. – National Highway Institute, 2016.
103. Shahu, J. T. Analysis of soft ground-granular pile-granular mat system / J. T. Shahu, M. R. Madhav, S. Hayashi // Computers and Geotechnics. – 2000. – Т. 27, № 1. – С. 45–62.
104. Shen, Y. Development of a macro-element of foundations under dynamic load: Application in the case of soils reinforced by rigid inclusions: дис. … докт. техн. наук / Yuxiang Shen. – Institut Polytechnique de Paris, 2023. – 250 с. – NNT: 2023IPPAE019.
105. Simon, B. Amélioration des sols par inclusions rigides: le rôle des géosynthétiques dans la plateforme de transfert de charge / B. Simon, L. Briançon, L. Thorel // Revue Française de Géotechnique. – 2020. – № 162. – С. 1.
106. Svanø, G. Alternative calculation principle for design of piled embankments with base reinforcement / G. Svanø [et al.] // Proc., 4th International Conference on Ground Improvement Geosystems. – Helsinki, Finland : Finnish Geotechnical Society, 2000.
107. Van Eekelen, S. J. M. Axial pile forces in piled embankments, field measurements / S. J. M. Van Eekelen, A. Bezuijen, A. F. Van Tol. – 2015.

108. Van Eekelen, S. J. M. Long term measurements in the Woerden geosynthetic-reinforced pile-supported embankment / S. J. M. Van Eekelen [et al.] // Geosynthetics International. – 2020. – Т. 27, № 2. – С. 142–156.
109. Watts, K. S. An instrumented trial of vibro ground treatment supporting strip foundations in a variable fill / K. S. Watts [et al.] // Géotechnique. – 2000. – Т. 50, № 6. – С. 699–708.
110. Wong, I. H. Raft foundations with disconnected settlement-reducing piles / I. H. Wong, M. F. Chang, X. D. Cao // Design Applications of Raft Foundations. – 2000. – С. 469–486.
111. Wong, P. K. Ground improvement case studies: chemical lime piles and dynamic replacement / P. K. Wong // Australian Geomechanics Society Jnl. – 2004. – Т. 39, № 2.
112. Yang, Y. Effect of cushion types on the seismic response of structure with disconnected pile raft foundation / Y. Yang, Y. P. Cheng, W. M. Gong, H. Fan, G. L. Dai // Structures. – 2023. – Vol. 48. – P. 1333–1345. – DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.099.
113. Yang, Y. Effect of soil-pile-structure interaction on seismic behaviour of nuclear power station via shaking table tests / Y. Yang, W. M. Gong, Y. P. Cheng, G. L. Dai, Y. W. Zou, F. Y. Liang // Structures. – 2021. – Vol. 33. – P. 2990–3001. – DOI: 10.1016/j.istruc.2021.06.051.
114. Zhang, Z. M. Field test on composite foundation incorporating flexible and rigid piles / Z. M. Zhang, Q. Q. Zhang // Advanced Materials Research. – 2011. – Т. 168. – С. 1140–1144.
115. Zhu, X.-j. Analysis of the load sharing behaviour and cushion failure mode for a disconnected piled raft / X.-j. Zhu // Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 2017, Issue 1. – P. 3856864. – DOI: 10.1155/2017/3856864.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справки о внедрении результатов исследований

Общество с ограниченной ответственностью
Компания «Выбор»
(ООО «Компания «Выбор»)

ОГРН 1052309101118
ИНН/КПП 2315115369/231501001
Р/счет 40702810652460101997
Краснодарское отделение №8619 ПАО Сбербанк
К/счет 30101810100000000602
БИК 040349602

353915, Краснодарский край, г. Новороссийск
ул. Революции 1905 г., дом 51
тел/факс: (8617) 64-17-15
vibornvrsk@mail.ru vibor_sekretar@mail.ru
www.vibor-stroy.com

Исх. № 804-т от 06.03.2025 г.

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Настоящей справкой подтверждается, что результаты диссертационных исследований Ткачева Игоря Геннадьевича, выполненные в рамках подготовки кандидатской диссертации на тему «Совершенствование конструкции и методов расчета свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем», были использованы при расчёте и конструировании фундаментов инвестиционного проекта компании «Выбор»: «Многоэтажное здание по ул. Набережная адмирала Серебрякова, 19 в г. Новороссийске» в районе с высокой сейсмичностью и значительными ветровыми нагрузками.

Внедрение результатов исследований позволило обеспечить требуемый уровень безопасной эксплуатации объекта в сложных инженерно-геологических условиях, реализовать рациональные проектные решения, снизить риски сверхнормативных осадок фундамента в условиях сейсмических и ветровых нагрузок, обеспечить сокращение сроков и стоимости строительства цокольной части здания. Достоверность принятых решений подтверждена геотехническим мониторингом, проведённым в ходе строительства, а также в период дальнейшей эксплуатации объекта.

Президент
группы компаний «Выбор»,
Заслуженный строитель России А.П. Сикорский

Технический директор
ООО Компания «Выбор»,
Заслуженный строитель Кубани С.В. Церцек

ГОРОД
СТРОИТЕЛЬНАЯ КОМПАНИЯ

исх. № 575 от «10» марта 2025 г.

Справка
о внедрении результатов научных исследований
в практику строительства многоэтажных зданий

Настоящим подтверждаем, что результаты научных исследований Ткачева Игоря Геннадьевича внедрены в практику строительства многоэтажного здания по ул. Монтажников, 1/2 в г. Краснодаре. При расчете и конструировании фундаментов возведенного здания использовано решение с применением свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем, который выполнен на участке между оголовками свай и подошвой фундаментной плиты, что дало возможность снизить количество свай и обеспечить безопасную эксплуатацию объекта в районе с сейсмичностью 7 баллов.

Справка дана Ткачеву И. Г в связи с использованием полученных им результатов научных исследований при написании диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме: «Совершенствование конструкции и методов расчета свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем».

Генеральный директор **Копытов Д.Ю.**

350020, Россия,
Краснодарский край,
г. Краснодар,
ул. Гаражная, 79/1,
помещение 3

ИНН 2460239063,
КПП 246301001

8 (861) 224-39-91
office@gorodsk.com

gorodsk.com

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный
аграрный университет
имени И.Т. Трубилина»

_____А. В. Петух
«25» марта 2025 г.

СПРАВКА
об использовании результатов исследований экс-аспиранта кафедры «Основания и фундаменты» Кубанского ГАУ Ткачева Игоря Геннадьевича в учебном процессе

Настоящей справкой подтверждаем, что Ткачев Игорь Геннадьевич, ведущий специалист ООО «ГЕОТЭК» (г. Краснодар), успешно закончил аспирантуру Кубанского ГАУ в 2021 г. по направлению подготовки 08.06.01 «Строительство» под руководством д-ра техн. наук, профессора Мариничева М. Б. (кафедра оснований и фундаментов) и в настоящее время представил свою диссертационную работу к защите в Тюменском индустриальном университете.

За период после окончания аспирантуры (с 2021 г.) Ткачев И. Г. продолжает сотрудничать с выпускающими кафедрами архитектурно-строительного факультета. Постоянно принимает участие в работе научных и учебно-методических конференций, тематических семинарах, написании научных статей, научно-практических пособий и методических указаний.

Полученные диссертантом результаты используются с 2021-2025 гг. в учебном процессе Кубанского государственного аграрного университета им. И. Т. Трубилина специалистами кафедры оснований и фундаментов при выполнении выпускных квалификационных работ студентами-магистрантами, обучающихся по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство», а также чтении лекций по дисциплине «Основания и фундаменты сооружений» для студентов специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

Декан архитектурно-строительного
факультета, к.т.н., доцент Д. Г. Серый

И.о. заведующий кафедрой
«Основания и фундаменты», к.т.н., доцент Д. В. Лейер

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Изоповерхности коэффициентов эффективности и вертикальных усилий в свайных фундаментах с ПРС

Условные обозначения для использования изоповерхностей:

V2 : Столбик, указывающий диаметр свай в метрах.V2 = от 0.3 до 0.6 м.

V3 : Столбик, указывающий длину свай в метрах. V3 = от 5 до 25 м.

V14 : Столбик, указывающий давление по фундаментной плите в кПа. V14 = от 100 до 500 кПа

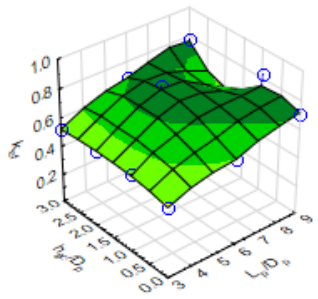
k_{ef} : Значение коэффициента эффективности, определяемого как отношение осадки свайного фундамента с ПРС к осадке плиты на естественном основании, который показывает, насколько варьирование параметров (длина, диаметр, шаг свай, толщина ПРС) снижает осадку; чем меньше k_{ef}, тем эффективнее решение, при условии, что фундамент на естественном основании неприменим. k_{ef} рассчитан методом наименьших квадратов.

При разработке методики была установлена доля от общей нагрузки **(k_N)**, передающейся на сваи. Численно определено, что места формирования максимальных усилий будут проявляться на разных уровнях при жесткой заделке свай и при введении промежуточного распределительного слоя (ПРС).

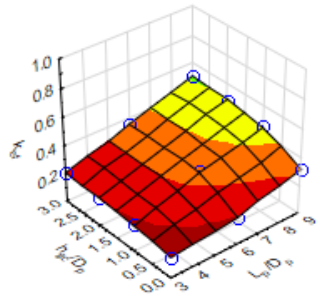
В связи с этим оценка доли нагрузки, приходящейся на сваи при введении ПРС, проводилась для двух уровней: уровень голов свай **($k_{N\,top}$)** и уровень суммарных максимальных усилий, возникающих в сваях **($k_{N\,max}$).**

L_p/D_p **и** h_{gc}/D_p : Аргументы функции k_{ef}, $k_{N\,top}$, $k_{N\,max}$, где L_p – шаг свай, D_p – диаметр сваи, а h_{gc} – высота ПРС.

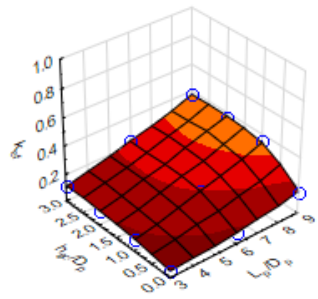
Промежуточные значения коэффициентов для других диаметров и длин свай, а также величин нагрузок допускается определять линейной интерполяцией.



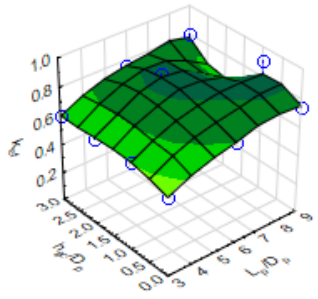
Include V2=0.3 and V3=5 and V14=300



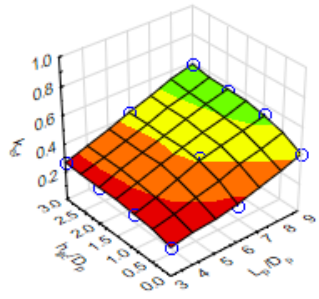
Include V2=0.3 and V3=15 and V14=300



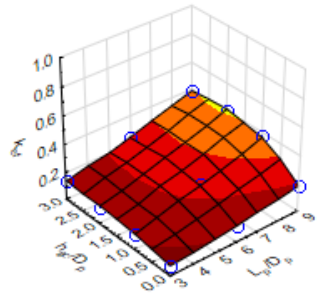
Include V2=0.3 and V3=25 and V14=300



Include V2=0.3 and V3=5 and V14=500



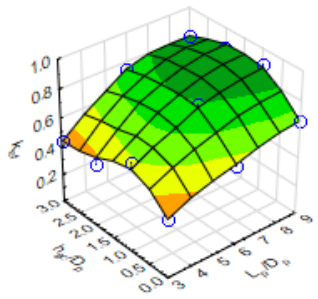
Include V2=0.3 and V3=15 and V14=500



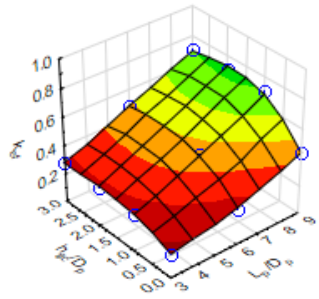
Include V2=0.3 and V3=25 and V14=500

k_{ef}

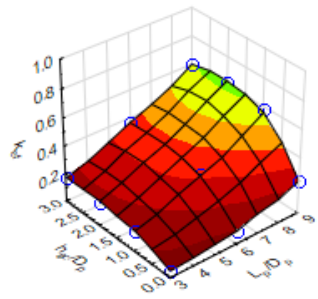
> 0.8
< 0.7
< 0.5
< 0.3
< 0.1



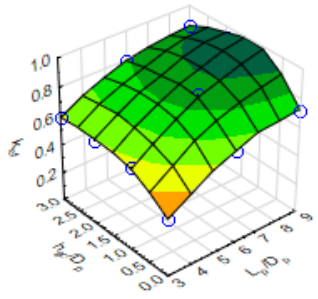
Include V2=0.6 and V3=5 and V14=300



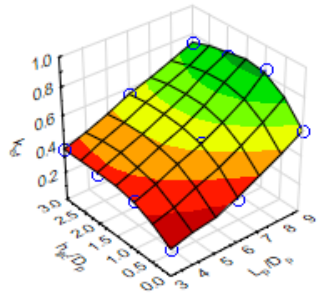
Include V2=0.6 and V3=15 and V14=300



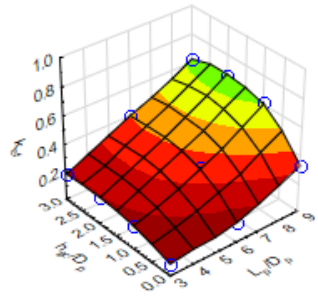
Include V2=0.6 and V3=25 and V14=300



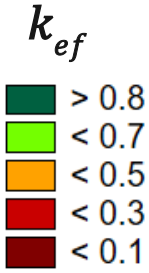
Include V2=0.6 and V3=5 and V14=500

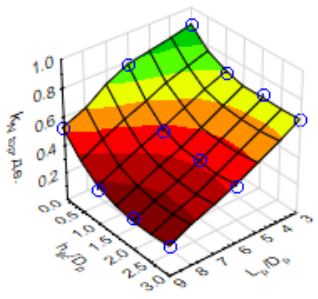


Include V2=0.6 and V3=15 and V14=500

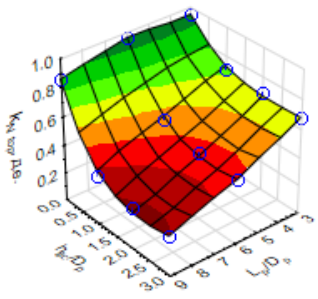


Include V2=0.6 and V3=25 and V14=500

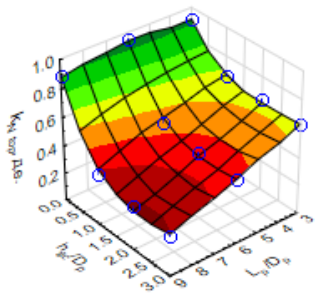




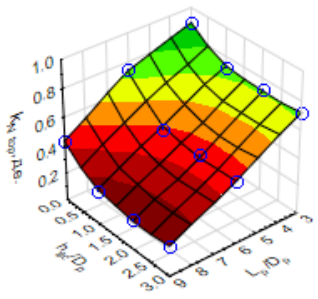
Include V2=0.3 and V3=5 and V14=200



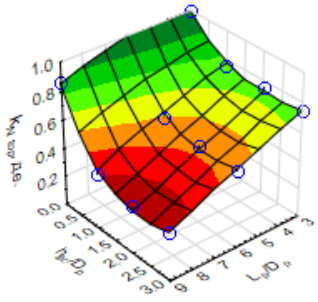
Include V2=0.3 and V3=15 and V14=200



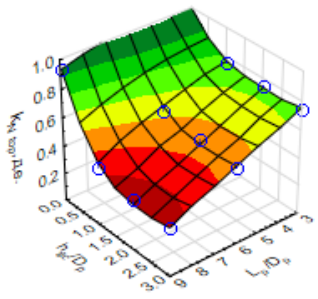
Include V2=0.3 and V3=25 and V14=200



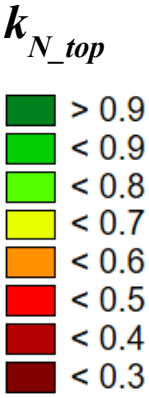
Include V2=0.3 and V3=5 and V14=500

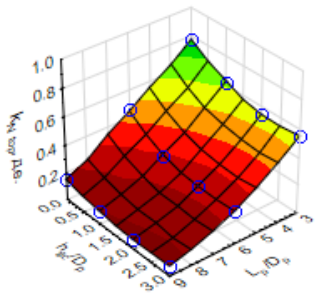


Include V2=0.3 and V3=15 and V14=500

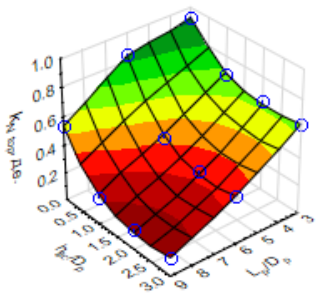


Include V2=0.3 and V3=25 and V14=500

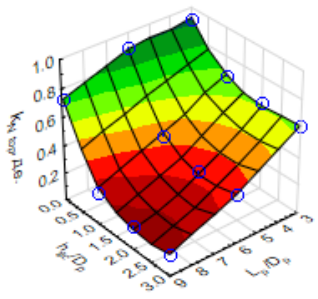




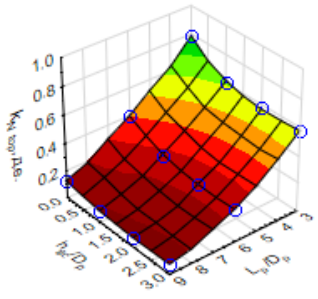
Include V2=0.6 and V3=5 and V14=300



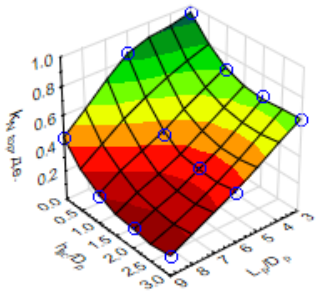
Include V2=0.6 and V3=15 and V14=300



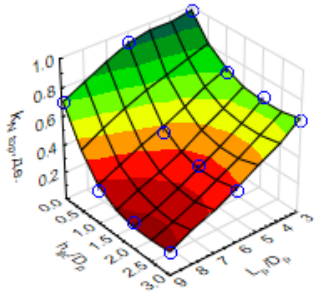
Include V2=0.6 and V3=25 and V14=300



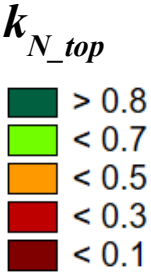
Include V2=0.6 and V3=5 and V14=500

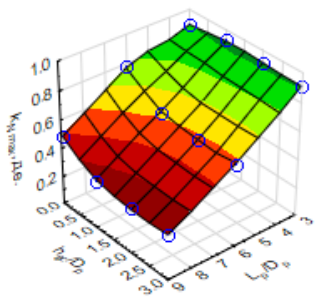


Include V2=0.6 and V3=15 and V14=500

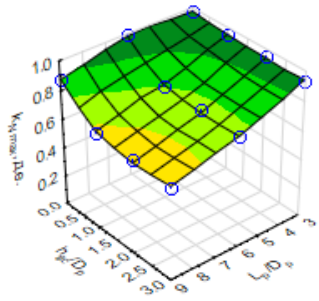


Include V2=0.6 and V3=25 and V14=500

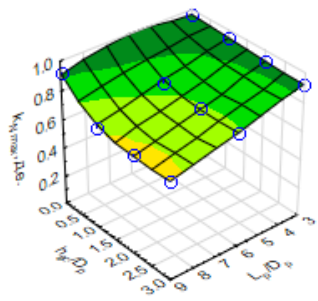




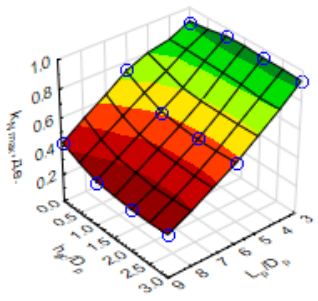
Include V2=0.3 and V3=5 and V14=300



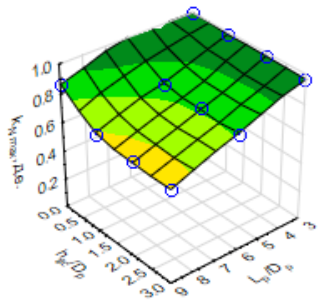
Include V2=0.3 and V3=15 and V14=300



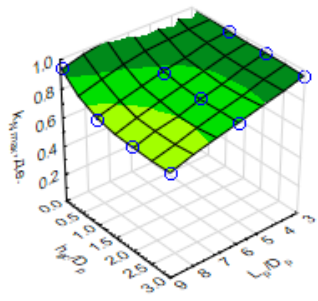
Include V2=0.3 and V3=25 and V14=300



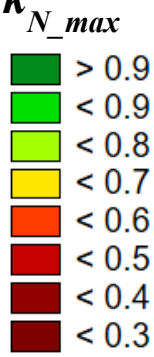
Include V2=0.3 and V3=5 and V14=500

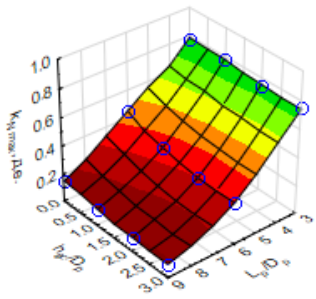


Include V2=0.3 and V3=15 and V14=500

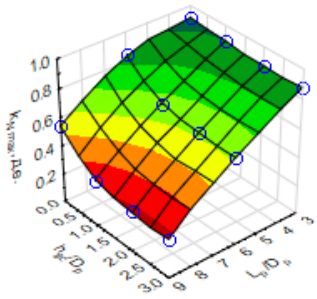


Include V2=0.3 and V3=25 and V14=500

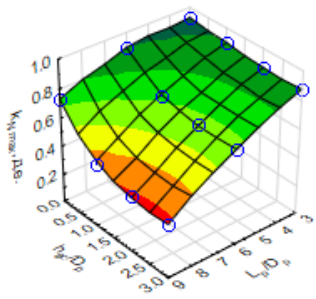




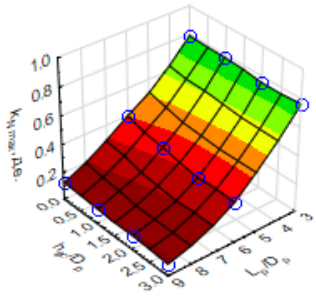
Include V2=0.6 and V3=5 and V14=300



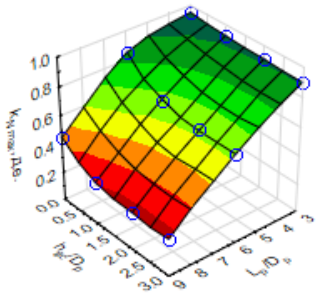
Include V2=0.6 and V3=15 and V14=300



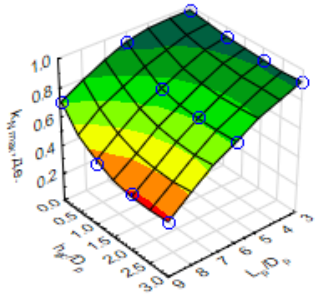
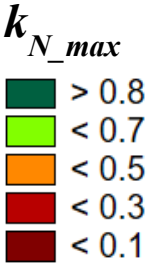
Include V2=0.6 and V3=25 and V14=300



Include V2=0.6 and V3=5 and V14=500



Include V2=0.6 and V3=15 and V14=500



Include V2=0.6 and V3=25 and V14=500