

На правах рукописи



Михайлов Виктор Сергеевич

**ПРОГНОЗ КОЛЕБАНИЙ БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫХ СВАЙНЫХ
ФУНДАМЕНТОВ С УЧЕТОМ РЕЗОНАНСНЫХ ЭФФЕКТОВ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Тюмень – 2026

Работа выполнена на кафедре инженерной геологии, оснований и фундаментов ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Инженерной геологии, оснований и фундаментов» ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин)
Нуждин Леонид Викторович

Официальные оппоненты: **Пономарев Андрей Будимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Мариничев Максим Борисович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры оснований и фундаментов ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Защита диссертации состоится «28» мая 2026 года в 10:00 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте <http://www.tyuiu.ru>.

Автореферат разослан «15» апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и состояние вопроса. Здания и сооружения эксплуатируются не только в условиях длительных статических нагрузок, но и при кратковременных динамических нагружениях. Одной из актуальных задач проектирования фундаментов является учет промышленной и техногенной динамики, взрывных воздействий и сеймики. Свайные фундаменты имеют малую горизонтальную жесткость и в условиях слабых грунтов уязвимы при сейсмических воздействиях, особенно при резком повышении амплитуд колебаний в случае совпадения преобладающей частоты колебаний основания и собственных частот сооружения.

На текущий момент в Российской Федерации практически отсутствуют надежно апробированные методы расчета свайных фундаментов с большим количеством свай на динамические и сейсмические воздействия. Существующие методы расчета рассматривают колебания свайных фундаментов простой формы и небольшого размера (до 25 свай в кусте), как правило, под машины с динамическими нагрузками.

В современных условиях актуальны задачи по проектированию многоэтажных и высотных зданий в сложных геотехнических условиях ранее неосвоенных территорий, в которых наиболее рациональными являются большеразмерные в плане свайные основания, включающие несколько сотен свай. Такой армированный массив отличается по своим свойствам от свайного куста, в том числе за счет его большой инерционной массы. Поэтому учет резонансных свойств основания может быть очень важным при обосновании надёжности свай в составе большеразмерного свайного фундамента.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами аналитического и численного моделирования большеразмерных свайных фундаментов, в том числе по методике «условного фундамента», в разное время занимались такие ученые, как А.А. Бартоломей, Б.В. Бахолдин, С.Г. Безволев, А.Н. Богомоллов, М.И. Горбунов-Посадов, А.Л. Готман, Н.З. Готман, К.С. Завриев, В.В. Знаменский, А.М. Караулов, К.В. Королев, И.А. Медников, А.Л. Невзоров, Н.С. Никифорова, А.Б. Пономарев, А.И. Полищук, Я.А. Пронозин, А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, В.М. Улицкий, А.Б. Фадеев, В.Г. Федоровский, М.М. Филоненко-Бородич, В.А. Флорин, Д.М. Шапиро, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, О.А. Шулятьев и др. Полученные в указанных исследованиях результаты могут быть применимы в ситуации, когда отсутствует резонанс между сооружением и основанием.

В случае проявления резонанса при совпадении собственных частот колебаний сооружения и преобладающих частот основания следует переходить к рассмотрению динамической системы «основание – свайный фундамент – сооружение». В данной области исследования проводили российские и советские ученые Д.Д. Баркан, Т.А. Белаш, Г.Б. Глик, М.И. Забылин, В.А. Ильичев, В. Колоушек, П.П. Кульмач, Р.А. Мангушев, М.Б. Мариничев, Л.Г. Мариупольский, И.Т. Мирсаяпов, Ю.П. Назаров, Ш.Г. Напетваридзе, Л.В. Нуждин, В.Г. Офрихтер, О.А. Савинов, М.А. Садовский, Н.А. Смородинский, Л.Р. Ставницер, С.П. Тимошенко, А.Н. Трофимчук, А.Г. Тяпин, А.М. Уздин, С.Ю. Фиалко, О.Я. Шехтер и др.

Среди зарубежных авторов данную тему исследовали E.H. Davis, G. Gazetas, C.W. Harden, T.C. Hutchinson, A.M. Kaynia, H. Link, J. Lysmer, Y. Nakamura, T. Nogami, M. Nogoshi, M. Novak, H.G. Poulos, M.D. Trifunac, A.S. Veletsos, A. Velez, E.L. Wilson, Xu J. и др.

Объектом исследования является система «основание – большеразмерный свайный фундамент» с количеством свай в группе более 25.

Предметом исследования является процесс колебаний большеразмерного свайного фундамента совместно с основанием.

Целью работы является разработка комплексного метода расчета большеразмерных свайных фундаментов для прогнозирования динамического поведения системы «сооружение – свайный фундамент – основание» в условиях динамических и сейсмических воздействий, включая кинематическое возбуждение и учет развития резонансных эффектов.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

1. Анализ и модификация существующих расчетных моделей свайных фундаментов для условий динамического нагружения.

2. Исследование условий развития резонанса сооружения и основания.

3. Аналитические и численные исследования колебаний системы «основание – большеразмерный свайный фундамент – сооружение» с оценкой влияющих факторов.

4. Полевые экспериментальные исследования с целью подтверждения динамических параметров предложенной пространственной комбинированной расчетной модели большеразмерного свайного основания.

5. Разработка рекомендаций по выполнению расчета колебаний большеразмерных свайных фундаментов на динамические воздействия с учетом оценки резонансных эффектов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы системного анализа, планирования и проведения экспериментов, математического моделирования.

В качестве теоретических методов исследований колебаний большеразмерного свайного фундамента использованы аналитические и эмпирические методы расчета свайных фундаментов, основанные на классических принципах механики грунтов и сопротивления материалов, а также численное моделирование методом конечных элементов.

В качестве экспериментальных методов оценки достоверности динамических параметров расчетных моделей приняты полевые исследования отклика свайного фундамента на малоамплитудные колебания основания, специальные лабораторные исследования динамических свойств грунтов, исследования натуральных свай методом статического нагружения.

Теоретическая значимость исследований включает: модификацию двух существующих расчетных моделей для учета динамических нагрузок на большеразмерные свайные фундаменты при отсутствии резонанса; формализацию критериев для оценки риска развития резонанса сооружения и грунтового основания в условиях динамических воздействий.

Практическая значимость диссертационной работы включает:

1. Комплексный метод расчета большеразмерных свайных фундаментов, позволяющий проектировать свайное основание в зависимости от возможности развития резонанса и жесткости фундамента. Предлагаемый комплексный метод позволяет использовать распространенные инженерные расчетные МКЭ комплексы и стандартные персональные компьютеры.

2. Наблюдательный HVSR метод полевого исследования на всех этапах жизненного цикла свайного фундамента применительно к малоамплитудным колебаниям: исходного и «армированного сваями» основания, в условиях естественного и техногенного микросейсмического поля. Метод позволяет инструментально определять частотные характеристики проектируемого и возводимого свайного фундамента с использованием стандартного для сейсмического микрорайонирования виброизмерительного оборудования.

3. Модифицированное геофизическое сейсмоакустическое оборудование для задач мониторинга динамических параметров проектируемой или возводимой системы «основание – большеразмерное свайное поле – сооружение» на этапах изысканий и строительства. Получены патенты № 2815393, №2844754 и №2852243 на изобретения «Скважинный

сейсмоприемник», «Скважинное прижимное устройство», «Источник сейсмических волн», позволяющие выполнять исследования малоамплитудных микросейсмических колебаний и динамических свойств грунтового массива в условиях повышенных шумов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана комбинированная пространственная модель большеразмерного свайного основания, которая учитывает его резонансные свойства и включает энергетический критерий дискретизации ближней зоны основания, аналитическую свайную ячейку для соответствия малого шага свай укрупненным конечным элементам ближней зоны, а также подстилающее аналитическое полупространство на глубине сейсмореализующей толщи.

2. Для условий, когда невозможно развитие резонанса между основанием и сооружением с жестким большеразмерным свайным фундаментом, разработана упрощенная численно-аналитическая модель пропорциональных деформаций, основанная на модификации подхода Н.З. Готман с применением аналитических зависимостей по С.W. Harden и нормативных динамических свойств грунтов по О.А. Савинову.

3. Уточнены данные о влиянии поверхностных волн в основании на внутренние усилия в сваях, которые могут повышаться до 2.45 раз по сравнению с результатами нормативного метода расчета по линейно-спектральной теории в случае резонанса на собственных частотах колебаний сооружения и фундамента.

4. Установлена зависимость резонансных свойств основания от мощности сейсмореализующей толщи, использующая нормативные динамические свойства грунтов по О.А. Савинову и позволяющая оценить наличие резонанса с точностью от 3 до 9% относительно полевых данных.

Положения, выносимые на защиту диссертационной работы:

1. Комбинированная пространственная модель большеразмерного свайного основания для учета развития резонанса с грунтовым массивом.

2. Аналитическая модель укрупненной свайной ячейки с энергетическим волновым критерием для оптимизации больших расчетных схем.

3. Формула для оценки зависимости резонансных свойств основания от мощности сейсмореализующей толщи для повышения надежности проектируемых свайных фундаментов в условиях динамических воздействий.

Указанные положения **соответствуют пунктам 4, 6 и 9 паспорта специальности 2.1.2 «Основания и фундаменты, подземные сооружения».**

Личный вклад автора. Выносимые на защиту результаты получены совместно с Л.В. Нуждиным в ходе выполнения научно-исследовательских работ на кафедре ИГОФ НГАСУ (Сибстрин). Автором проведено моделирование, натурные микросейсмические исследования колебаний сооружений и фундаментов, разработан алгоритм численно-аналитического метода расчета колебаний большеразмерных свайных фундаментов с использованием комбинированной пространственной модели в условиях развития поверхностных волн или с использованием численно-аналитической модели пропорциональных деформаций, когда невозможно развитие эффектов резонанса между жестким фундаментом и основанием.

Достоверность полученных результатов и выводов. Результаты диссертации согласуются с известными положениями теории колебаний и с решениями, полученными с применением апробированных методик. Достоверность подтверждается данными компьютерного моделирования и натурными экспериментальными исследованиями с использованием сертифицированных программ и виброизмерительного оборудования.

Апробация работы. Основные положения и выводы диссертации доложены и получили положительную оценку на международных и всероссийских научно-технических конференциях: в Алматы (2025), в Астане (2023), во Владивостоке (2016), в Воронеже (2022), в Казани (2025), в Москве (2019, 2024), в Новосибирске (2017, 2019, 2021, 2022, 2023); в Новочеркасске (2018, 2022), в Перми (2017, 2021, 2024) и в Санкт-Петербурге (2019, 2021).

Полученные результаты исследований вошли в раздел 19.6.4 «Справочника геотехника» (3 изд. в 2023, 4 изд. в 2024). Практическое внедрение выполнено при чтении лекций в НГАСУ и при проектировании объектов нового строительства многоэтажных и высотных зданий на свайном основании в Барнауле, Владивостоке, Грозном, Кемерово и Новосибирске.

Публикации. Опубликовано 50 научных работ, в том числе 7 основных работ по теме диссертации, из них 4 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертаций, 3 – в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Web of Science. По результатам разработки используемого экспериментального оборудования получено три патента №2815393, №2844754 и №2852243.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 200 наименований, 3 приложения, изложена на 240 листах печатного текста, содержит 122 рисунка и 52 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы. Сформулированы цель и задачи исследований с учетом современного уровня развития вычислительных и инструментальных средств определения динамических характеристик оснований и сооружений. Изложены практическая значимость и научная новизна работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнено обобщение теоретических положений по существующим методам расчета свайных фундаментов на динамические нагрузки. Указаны аспекты аналитического описания основания по J.V. Boussinesq и A.A. Flamant. Рассмотрены апробированные методы расчета большеразмерных свайных фундаментов, рассматриваемых как «условный фундамент», применимых как при статическом, так и при динамическом нагружении в условиях отсутствия резонанса колебаний с основанием.

Подробно описаны подходы к расчету осадки «условного фундамента» конечной жесткости с контактной моделью пропорциональных деформаций основания Н.И. Фусса и Э. Винклера на нижнем конце свай, его преимущества и недостатки, а также контактные модели В.Г. Федоровского и Н.З. Готман.

Приведены методы расчета осадки «условного фундамента» конечной жесткости с контактной моделью линейно-деформируемого полупространства, учитывающей образование осадочной мульды, что позволяет рассматривать взаимное влияние близко расположенных зданий и отдельно стоящих фундаментов, а также осадку свай в составе большеразмерного свайного поля. Рассмотренные методы включают аналитические модели М.М. Филоненко-Бородича, М.И. Горбунова-Посадова и П.Л. Пастернака с модификациями В.З. Власова и Н.Н. Леонтьева, В.Г. Пискунова и Ю.М. Федоренко, И.А. Медникова и К.Г. Шашкина.

Приведены апробированные аналитические и эмпирические модели свайных фундаментов в условиях динамических воздействий по работам Д.Д. Баркана, М.И. Забылина, В.А. Ильичева, Л.В. Нуждина, О.А. Савинова, Л.Р. Ставницера, О.Я. Шехтер. Рассмотрены и сопоставлены модели сейсмических воздействий: линейно-спектральная инерционная модель сейсмического воздействия; стохастическая кинематическая модель; уточненная гармоническая нестационарная кинематическая модель; методы моделирования изменений в сейсмическом воздействии при прохождении через толщу дисперсных грунтов, основанные на работах А.Г. Тяпина, А.М. Уздина и В.А. Ветошкина.

Во второй главе изложены теоретические положения комплексного метода расчета большеразмерных свайных фундаментов. Первый раздел посвящен численно-аналитическим исследованиям и обоснованию критерия возможности развития резонанса при колебаниях фундамента и основания, который необходим для выбора между упрощенными контактными и детализированными пространственными моделями основания.

В таблице 1 представлены результаты первого этапа анализа методик: Y. Osava, Y. Kitagava, Y. Irie (1984); С.П. Тимошенко (1937); ASCE 4 (2016). Рассматривались четыре типа грунтового основания, соответствующие четырем категориям грунтов по сейсмическим свойствам по СП 14.13330. В качестве сооружения было выбрано монолитное здание с перекрестно-стеновой системой. Рассмотрено пять вариантов высотности от 5 до 25 этажей.

Знаком «+» обозначена необходимость учета взаимодействия сооружения с основанием, когда безразмерная резонансная частота a_0 и относительная масса сооружения m_0 попадают в соответствующую графическую область диаграммы по Y. Osava, Y. Kitagava и Y. Irie. Для методик С.П. Тимошенко и ASCE 4-16 приведены значения отношений доминантных горизонтальных частот колебаний жесткого сооружения на податливом основании в направлениях f_{x1} и f_{y1} к соответствующим собственным частотам податливого сооружения на жестком основании f_{x0} и f_{y0} . Цветом выделены ячейки, когда выявлено взаимодействие основания и сооружения. Результаты методик Y. Osava, Y. Kitagava, Y. Irie и С.П. Тимошенко совпадают для трехкратного отношения частот, в отличие от двукратного по ASCE 4-16.

На следующем этапе исследований методика ASCE 4-16 была рассмотрена с использованием параметров динамической жесткости основания по О.А. Савинову без учета и с учетом уточнённых параметров основания согласно СП 26.13330, а также в виде линейной пространственной модели сооружения и основания в расчетном комплексе SCAD.

Таблица 1. Сравнительный анализ методик оценки необходимости учета взаимодействия сооружений с основанием в условиях динамических воздействий

Этаж-ность	Грунт I			Грунт II			Грунт III			Грунт IV		
	a_0, m_0	$\frac{f_{x1}}{f_{x0}}$	$\frac{f_{y1}}{f_{y0}}$	a_0, m_0	$\frac{f_{x2}}{f_{x0}}$	$\frac{f_{y2}}{f_{y0}}$	a_0, m_0	$\frac{f_{x3}}{f_{x0}}$	$\frac{f_{y3}}{f_{y0}}$	a_0, m_0	$\frac{f_{x4}}{f_{x0}}$	$\frac{f_{y4}}{f_{y0}}$
5	+	1,92	1,71	+	1,15	1,03	+	0,6	0,54	+	0,3	0,27
10	+	2,97	2,96	+	1,79	1,78	+	0,93	0,93	+	0,47	0,47
15	-	3,94	4,51	+	2,37	2,71	+	1,23	1,41	+	0,62	0,71
20	-	5,02	6,23	-	3,02	3,75	+	1,57	1,95	+	0,79	0,98
25	-	6,19	8,2	-	3,72	4,93	+	1,94	2,56	+	0,97	1,29

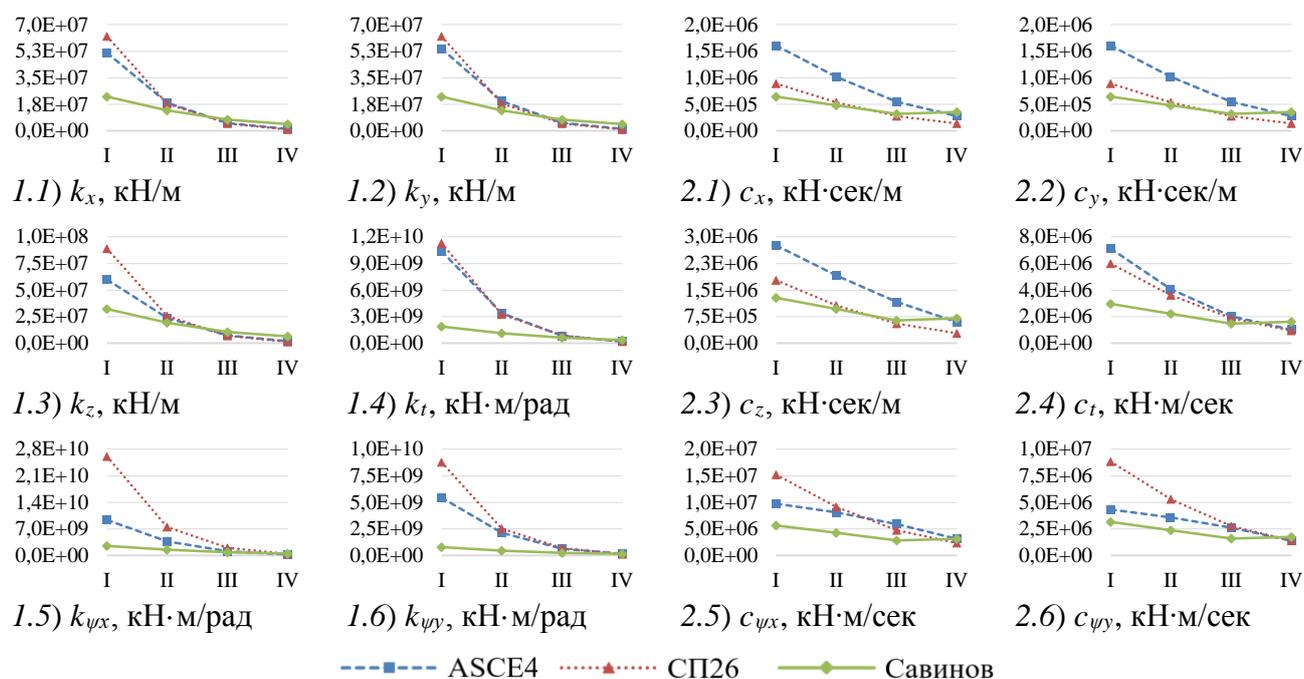


Рисунок 1. – Сравнительный анализ эквивалентных жесткостей в центре жесткого фундамента и эквивалентного демпфирования по ASCE 4, СП 26.13330 и по Савинову

Результаты исследований представлены на рисунке 1 и свидетельствуют о высоком совпадении динамических характеристик грунтов II, III и IV категорий по ASCE 4-16, по О.А. Савинову и по СП 26.13330.

Во втором разделе главы рассмотрены методы моделирования сейсмического воздействия с использованием силового и кинематического подходов, их недостатки и преимущества. Для кинематической модели даны примеры синтеза графиков сейсмического воздействия, от стохастических, приближенных к природным, до нестационарных гармонических импульсов, узкополосных и ориентированных на известные собственные частоты сооружения или широкополосных для всего нормативного спектра частот.

В третьем разделе главы для сооружений повышенной жесткости, когда невозможно развитие резонанса фундамента с основанием, предлагается контактная «Модель пропорциональных деформаций». Модель основана на подходе Н.З. Готман к расчету большеразмерных свайных фундаментов. Вместо коэффициентов постели под свайным ростверком по зависимостям «нагрузка-осадка», получаемым на основании результатов численного моделирования, использована динамическая жесткость в уровне подошвы условного свайного основания по О.А. Савинову. Были внесены изменения в области распределения коэффициентов постели, которые отражают эффект не только для краевых свай, сжато-изогнутых в одном направлении, но и для угловых свай, сжато-изогнутых в двух направлениях (рисунок 2).

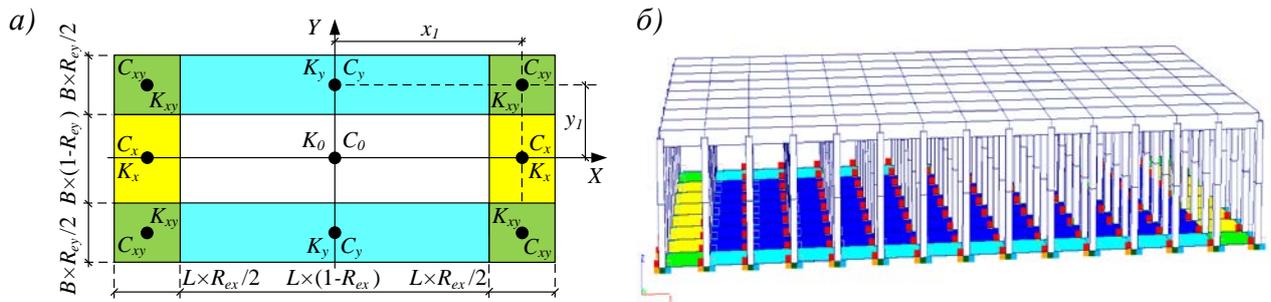


Рисунок 2 – Численно-аналитическая контактная «Модель пропорциональных деформаций» по Н.З. Готман и О.А. Савинову: *a* – четыре характерные зоны с переменным коэффициентом постели C_i на схеме в плане; *b* – то же, в расчетной модели.

В четвертом разделе главы для расчета большеразмерных свайных фундаментов с гибким ростверком в условиях отсутствия резонанса обоснованы преимущества и границы применимости контактной «Модели полупространства» по К.Г. Шашкину. Выполнено сравнение с пространственной численной моделью свайного основания и аналитической моделью В.Г. Федоровского. На рисунке 3 представлена реализация данной модели в Mathcad с расчетом перемещений под подошвой условного фундамента и обратного вычисления напряжений в любой точке в основании.

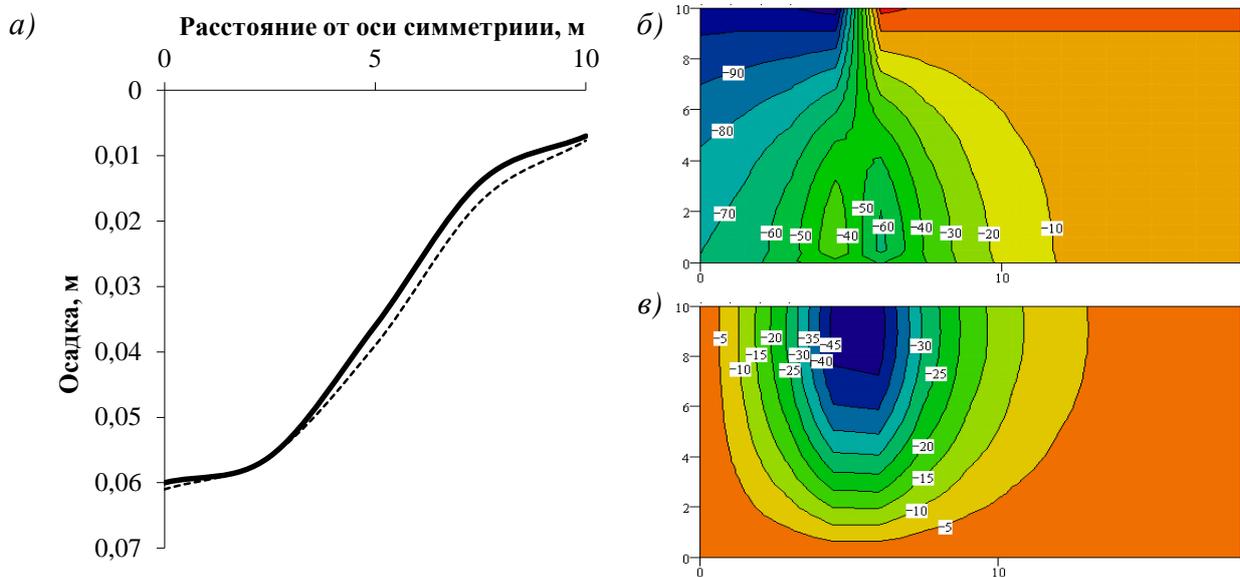


Рисунок 3 – Пример реализации в Mathcad двухпараметрической аналитической контактной модели основания по К.Г. Шашкину для условного бесконечного ленточного фундамента: *a*) осадка в основании под гибким фундаментом, м; *b*) вертикальные напряжения в основании от нагрузки по подошве фундамента, кПа; *c*) касательные напряжения, кПа.

В пятом разделе главы для условий возможного развития резонанса в основании с сооружением любой жесткости представлена «Комбинированная пространственная модель». Приведены пути оптимизации пространственных моделей, необходимые для численного анализа колебаний большеразмерных свайных фундаментов методом конечных элементов. Даны рекомендации по

назначению параметров пространственной модели ближней зоны основания, в том числе: расстояние отнесения поглощающих границ; размер конечных элементов в зависимости от собственных частот колебаний сооружения.

Представлены три подхода по оптимизации пространственных численных моделей большеразмерного свайного поля: волновой энергетический критерий дискретизации пространственной модели ближней зоны грунтового основания; замена симметричной группы свай укрупненной динамической свайной ячейкой; замена подстилающего полупространства до глубины коренных пород контактной аналитической моделью.

Минимальный значимый период предложено определять с использованием энергетического критерия относительно резонансных частот рассматриваемой конструкции фундамента. Энергетический спектр мощности W демонстрирует распределение в частотном диапазоне интенсивности работы механической системы за единицу времени и позволяет исключить из рассмотрения те частоты, что не вносят значимый вклад в колебания системы.

Информация о значимом периоде позволяет оптимизировать пространственную модель свайного основания с использованием рекомендаций ASCE 4-16 о допустимой степени разрежения сетки на внешних границах модели не более трех раз. Максимальный размер конечного элемента L_R предложено принимать по наибольшей значимой частоте f в спектре мощности W исходя из расстояния между восемью точками по длине поперечной волны $V_s T$ (рисунок 4).

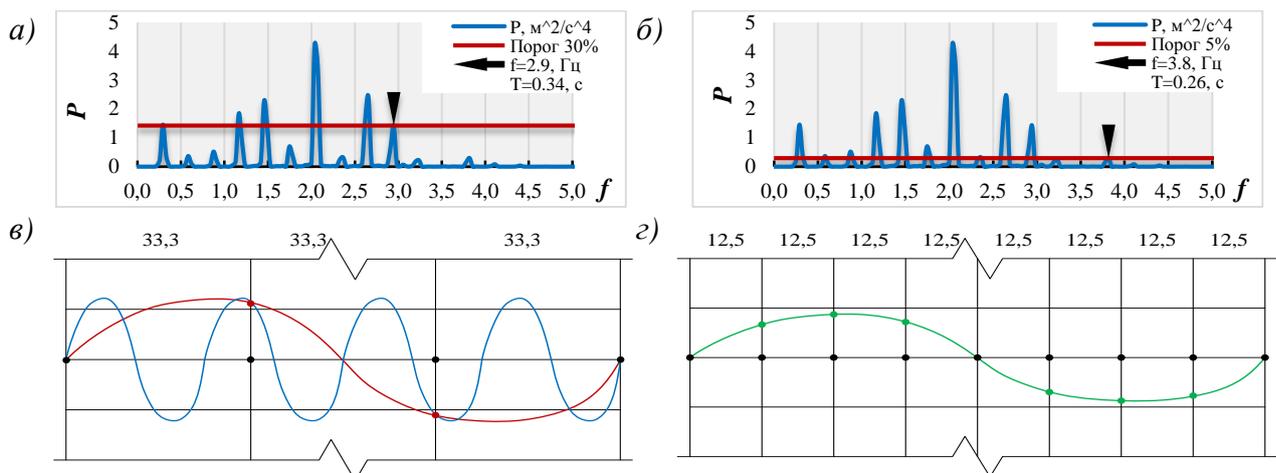


Рисунок 4 – Волновой энергетический критерий дискретизации пространственной модели грунтового основания: а – определение максимальной значимой частоты колебаний сооружения по сейсмическому спектру мощности P при пороге 30%; б – то же, при 5%; в – некорректное разбиение грунтового массива на конечные элементы; г – корректное разбиение массива грунта на восемь КЭ по длине волны $V_s \cdot T_i$.

С целью автоматизации построения пространственной цилиндрической модели основания предложены аналитические зависимости ее геометрических размеров относительно свойств волнового поля (1 – 6):

$$L_R = 0,125V_s T, \quad L_r = 0.33L_R, \quad L_{FEj} = L_R [1 - j(0.667N_R^{-1})], (1; 2; 3)$$

$$N_R \geq \pi(11D)L_R^{-1}, \quad r = (N_R L_r)(2\pi)^{-1}, \quad N_L \geq \frac{2(5.5D-r)}{(L_R+L_r)}. \quad (4; 5; 6)$$

С учетом предложенной оптимизации размера КЭ пространственных моделей трудоемкость расчета методом интегрирования уравнений движения уменьшается и расчет может быть выполнен на рядовых компьютерах.

Второй подход связан с тем, что увеличение жесткости свайного поля по сравнению с исходным основанием предложено учитывать путем осреднения сдвиговых жесткостей свай и добавочной угловой жесткости укрупненной свайной ячейки (рисунок 5), необходимой для соответствия шага таких групп размеру конечных элементов в оптимизированной пространственной модели основания с применением первого подхода. Жесткость динамической ячейки из нескольких свай в центральной точке группы может быть представлена суммированием численных жесткостей укрупненной сваи и для угловой жесткости – аналитическим эквивалентным выражением K_φ^* :

$$K_\varphi^* = \frac{E(I_1 - I_2)}{L}, \quad (7)$$

где E – модуль упругости материала; L – ширина ячейки; I_1 и I_2 – моменты инерции куста свай, с учетом и без общей изгибной жесткости по J. Steiner.

Осевой момент инерции прямоугольного сечения и положение центра тяжести составного сечения ячейки определяется по формулам (8 – 11):

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12}; \quad I_y = \frac{b^3 \cdot h}{12}; \quad x_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}; \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad (8; 9; 10; 11)$$

где x_i , y_i и A_i – координаты центра тяжести и площадь простых элементов, на которые разбито сечение, n – количество таких элементов.

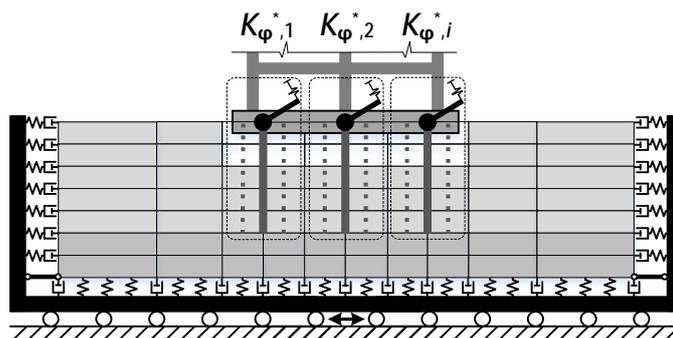


Рисунок 5 – Укрупненная свайная группа с эквивалентной изгибной жесткостью

Момент инерции составной ячейки определяется по теореме Штайнера:

$$I_{z0} = \sum_{j=1}^n (I_{zj} + A_j \cdot (y_j - y_c)^2); \quad I_{y0} = \sum_{j=1}^n (I_{yj} + A_j \cdot (z_j - z_c)^2). \quad (12)$$

Более точное значение эквивалентной угловой жесткости одиночной сваи может быть получено численным методом решения уравнения (13). Поэтому был предложен расчет задачи изгиба одиночной сваи по схеме балки на упругом основании в программе Mathcad путем численного решения дифференциального уравнения четвертого порядка с учетом эмпирических зависимостей для горизонтальной жесткости основания по К.С. Завриеву:

$$u^{IV} + \frac{(b_P \cdot K_0 \cdot z) \alpha}{EI} u = \frac{q}{EI}. \quad (13)$$

Предложенный алгоритм численного решения допускает одновременный анализ деформаций и усилий по длине сваи при горизонтальном нагружении и при сложно-напряженном состоянии.

Третий подход по оптимизации размера пространственной модели по глубине осуществляется путем замены части массива контактной аналитической моделью с осреднением свойств заменяемой толщи до кровли скального основания или массива жестких, плотных и тяжелых дисперсных грунтов. В качестве контактной модели подстилающего полупространства рекомендована аналитическая двухпараметрическая модель по К.Г. Шашкину.

Предложенные подходы к оптимизации пространственных моделей большеразмерного свайного фундамента, основанные на математическом моделировании с использованием аналитических и эмпирических зависимостей, позволяют выполнять расчеты с использованием численного метода конечных элементов в любом инженерном расчетном комплексе, в том числе в использованном для представленных исследований SCAD Office.

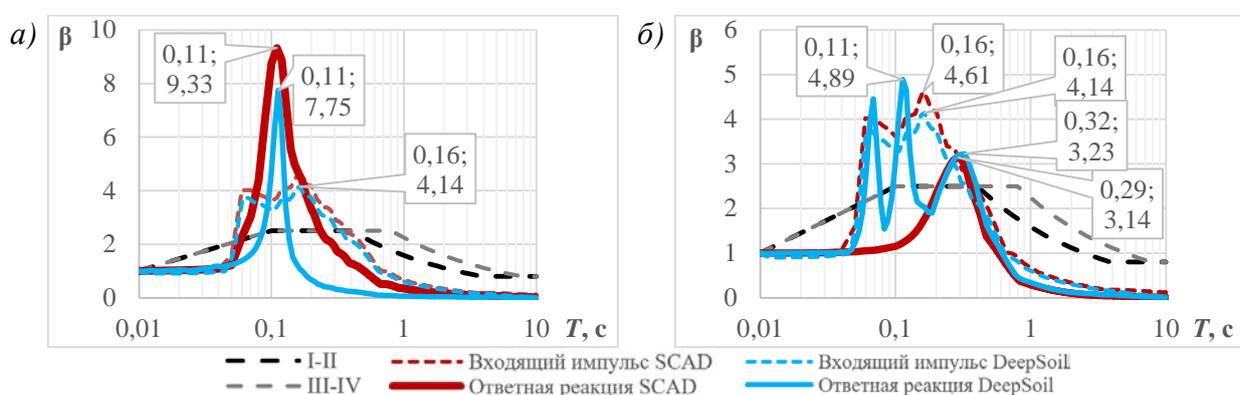
В третьей главе приведены материалы выполненных численных исследований колебаний большеразмерных свайных фундаментов методом конечных элементов с использованием контактных, пространственных и комбинированных моделей.

Достоверность метода подтверждена натурными исследованиями в четвертой главе. С целью предварительной оценки достоверности численного метода он был сопоставлен с аналитическим методом определения резонансных эффектов в программе DEEPSOIL для одномерных моделей. По итогу рассмотрения 72 моделей для 36 грунтовых условий, для 9 типов грунтов и 4 вариантов мощности однородного слоя, подтверждена

корректность численного метода расчета на динамические воздействия пространственных моделей основания в расчетном комплексе SCAD.

Сравнение ответной реакции грунта в одномерных моделях DEEPSOIL и пространственных моделях SCAD для полускального основания I категории по сейсмическим свойствам показало схожие результаты (рисунок 6, а). На графиках виден резонансный пик с периодом 0,1 с, что не затрагивает большинство гражданских зданий с периодами собственных колебаний от 1 с.

Для «средних» грунтовых условий, твердых глинистых грунтов (II категория, мощность 30 м) и слабых водонасыщенных мелких песков (III категория, 30 м) результаты аналитической и численной моделей также совпадают (рисунок 6, б). В кинематической постановке численного метода высокочастотные импульсы естественным образом фильтруются.



штриховыми линиями показаны графики коэффициента динамичности по СП 14.13330 для сейсмических категорий

Рисунок 6 – Результаты сравнительной оценки резонансных характеристик грунтового основания аналитическими методами: а – спектр коэффициента динамичности β для слоя полускальных грунтов мощностью 30 м (I категория); б – то же для слоя водонасыщенных песчаных грунтов мощностью 30 м (III).

Во всех рассмотренных 36 грунтовых условиях наблюдается совпадение для преобладающего низкочастотного резонансного пика (рисунок 7), что подтверждает применимость численного метода. Подобный численный подход с использованием метода конечных элементов подтвержден в работах В.Б. Заалишвили для 2D задач при сейсмическом микрорайонировании.

Выявлена устойчивая зависимость резонансного периода колебаний грунтового основания T в секундах от мощности сейсмореализующей толщи H в метрах с использованием нормативных свойств грунтов:

$$T = A \cdot H^B, \quad (14)$$

где A и B – коэффициенты по соответствующему типу грунта в дисперсном слое основания над кровлей коренных пород, приведенные на рисунке 7.

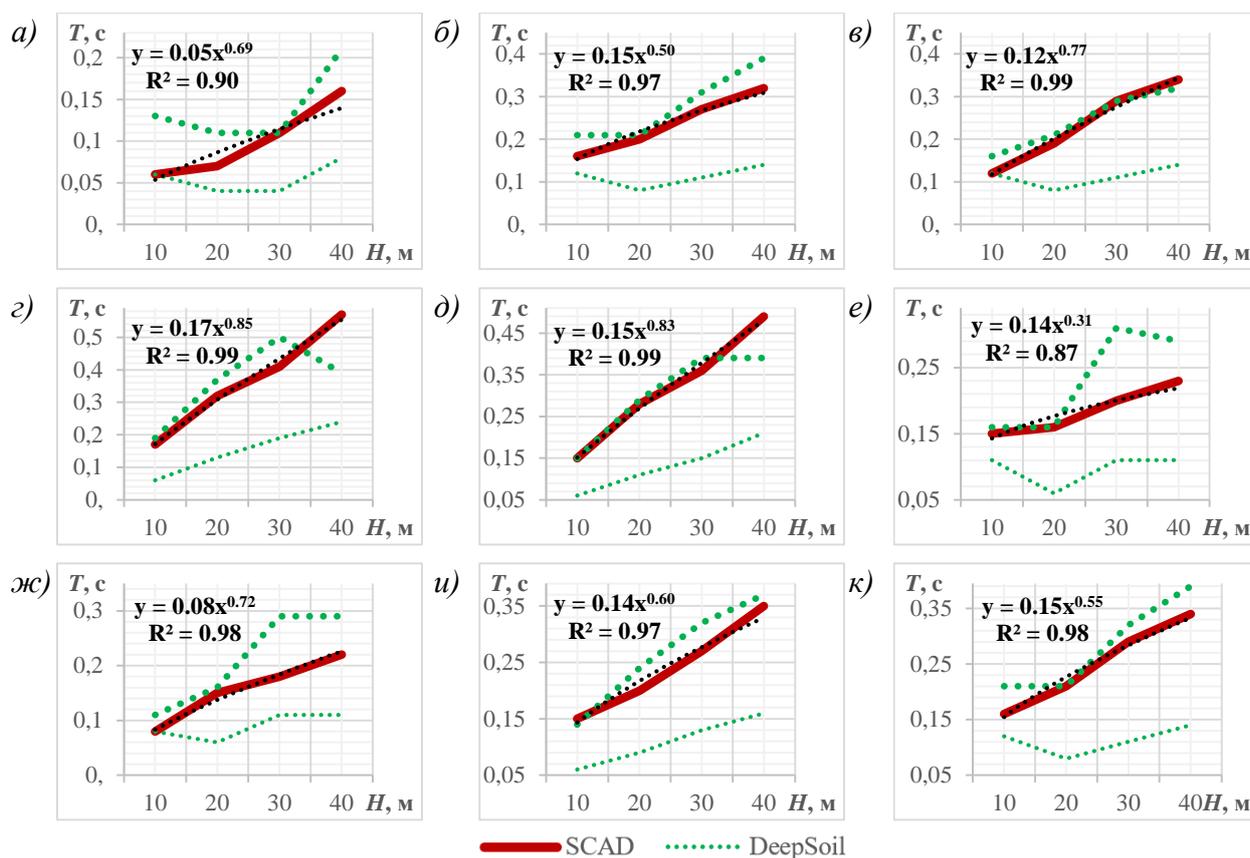


Рисунок 7 – Оценка резонанса в основании по преобладающим периодам колебаний T для толщ 10, 20, 30 или 40 м из грунтов (сейсмической категории): *а* – полускальные (I); *б* – твердые глинистые влажные (II); *в* – то же, водонасыщенные (II); *г* – пластичные глинистые (III); *д* – то же, водонасыщенные (III); *е* – песчано-гравийные влажные (II); *ж* – то же, водонасыщенные (II); *и* – средние песчаные влажные (III); *к* – то же, водонасыщенные (III).

После аналитической проверки достоверности численного метода расчета пространственных моделей основания была выполнена оценка влияющих факторов путем сопоставления нескольких способов моделирования большеразмерных свайных фундаментов. Рассмотрены четыре типа грунтовых условий по сейсмическим свойствам для пяти вариантов этажности без учета и с учетом инерционных свойств массива.

На начальном этапе выполнено сравнение контактных и пространственных моделей большеразмерных свайных фундаментов при силовом и кинематическом сейсмическом воздействии. Результаты показали, что при использовании линейно-спектрального метода расчета сдвиговые усилия занижаются и поперечные деформации в уровне ростверка при изгибной форме колебаний оказываются малы. В результате усилия среза стремятся к нулевым значениям, что противоречит природе сейсмического воздействия, когда колебания передаются от основания на сооружение.

При расчете контактных моделей свайного основания методом интегрирования уравнений движения усилия среза в сваях восстанавливаются

и соответствуют результатам пространственных моделей с прямым динамическим и линейно-спектральным методами нагружения.

В условиях отсутствия эффектов резонанса оба метода моделирования сейсмического воздействия для пространственных моделей с невесомым основанием позволяют получить одинаковые результаты, при этом линейно-спектральный метод не требует значительных вычислительных ресурсов.

Продольные усилия в модели полупространства эквивалентны комбинированным пространственным моделям основания как в дискретной постановке задачи, так и при использовании укрупненных свайных ячеек.

Следующим этапом выполнена оценка влияния присоединенных масс. Рассмотрены восемь типов пространственных моделей с невесомым массивом грунта и с максимальным критическим демпфированием на внешней границе. Во всех моделях с отдельными сваями и с использованием укрупненных свайных ячеек получены идентичные внутренние усилия и частоты колебаний, что подтверждает корректность модели ячейки. Доказана возможность замещения нижней части массива контактной моделью полупространства.

На заключительном этапе аналитических исследований выполнен учет массы всего грунтового массива и проведен анализ фактов развития резонанса. Согласно таблице 2 приращение усилий происходит при совпадении преобладающих периодов колебаний основания и свайного фундамента.

Таблица 2 – Анализ резонансных эффектов в пространственной модели линейно-деформируемого основания (ЛДО) со свайными ячейками (СЯ) относительно модели с безынерционным основанием

Шифр	Этажи	Основание III категории по сейсмическим свойствам						Основание IV категории по сейсмическим свойствам					
		T _s , с	T _{III} , с	K _R	ΔN, %	ΔM, %	ΔQ, %	T _s , с	T _{IV} , с	K _R	ΔN, %	ΔM, %	ΔQ, %
Модель линейно-деформируемого основания мощностью 98 м со свайными ячейками													
ЛДО.СЯ.ЗД	5	0.65	1.23	+	-36	-38	-38	0.72	2.40	-	-84	-83	-83
	10	0.92		+	60	59	59	1.02		+	-66	-67	-67
	15	1.13		+	132	133	132	1.25		+	-48	-51	-50
	20	1.31		+	145	144	144	1.44		+	-12	-14	-14
	25	1.46		+	130	130	130	1.61		+	40	41	41
Модель линейно-деформируемого основания мощностью 30 м со свайными ячейками и контактной моделью подстилающего полупространства до глубины 98 м													
ЛДО.СЯ.П.Д	5	0.65	1.23	+	50	51	50	0.72	2.40	-	-4	-8	-8
	10	0.92		+	39	40	40	1.02		+	90	90	90
	15	1.13		+	30	29	29	1.25		+	111	112	112
	20	1.31		+	24	23	23	1.44		+	96	97	97
	25	1.46		+	19	19	18	1.61		+	79	80	80

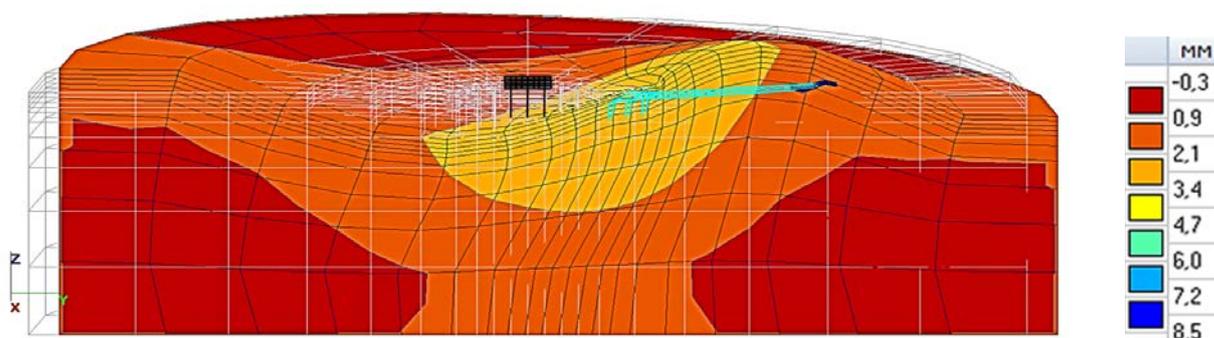


Рисунок 8 – Колебания фундамента на основании IV категории в модели с инерционным массивом мощностью 3D при экстремальном перемещении ростверка по оси Y

Наибольшие усилия в сваях и экстремальные перемещения ростверка возникают в случае выполнения критерия резонанса K_R при совпадении периодов собственных колебаний сооружения T_S и преобладающих периодов грунтового массива T_{III} и T_{IV} с грунтами III и IV типов по сейсмическим свойствам. В этом случае наблюдается развитие поверхностных волн (рисунок 8) и в оголовках анализируемых свай наблюдается увеличение до 2,45 раз продольных сил, изгибающих моментов и поперечных сил. Таким образом, предложенная модель основания позволяет повысить безопасность фундамента и учесть риск резонанса при появлении поверхностных волн.

Вопрос назначения мощности моделируемого массива грунта следует решать на стадии инженерно-геофизических исследований при сейсмическом микрорайонировании. Спектральный анализ данных микросейсмических колебаний позволяет определить резонансные частоты, соответствующие поверхностным сейсмическим волнам, и далее оценить необходимую мощность модели массива грунта, что подробнее описано в четвертой главе.

В четвертой главе приведена экспериментальная реализация предлагаемой комбинированной модели в натуральных условиях. Выполнялись полевые исследования методом малоамплитудных измерений колебаний грунтовых и большеразмерных свайных оснований трех высотных зданий в Грозном. Полевые исследования резонансных свойств свайных оснований проводились с использованием сейсмостанции с механическими СК-1П и электродинамическими GS-ONE велосиметрами.

Первый объект расположен на основании с преобладающими грунтами I категории по сейсмическим свойствам. Построены графики отношений горизонтальных и вертикальных амплитуд для 8 точек на поверхности на расстоянии 50 м от края котлована (рисунок 9, в; М-1.1, М-2.1... 2.8) и для 9 точек на дне котлована (рисунок 9, д; М-3.1, М-4.1... 4.8).

Красной линией обозначены данные датчика СК-1П длительностью 144 мин (М-1.1; М-3.1). Черной линией обозначены средние значения амплитуд отношений U_{cp} по записям GS-ONE LF по 10 мин (М-2.1... 2.8; М-4.1... 4.8). Красные круги – пиковые значения амплитуд отношений $U_{max,i}$ отдельных записей; красные треугольники – то же, осредненные по всем записям $U_{max,cp}$; зеленые ромбы – преобладающий интервал частот $U_{70,cp}$ для 70% от $U_{max,cp}$.

Интервал Н/В отношений на поверхности (рисунок 9, в) с амплитудой $U_{70,cp}=3.2$ д.е. соответствует слабым грунтам со скоростью распространения волн 180...240 м/с и аналитическому значению преобладающей частоты в тонком слое. Синей линией обозначены результаты численного расчета в SCAD в режимах анализа амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) с преобладающей частотой 9.5 Гц и соответствует полевым данным (10.1 Гц).

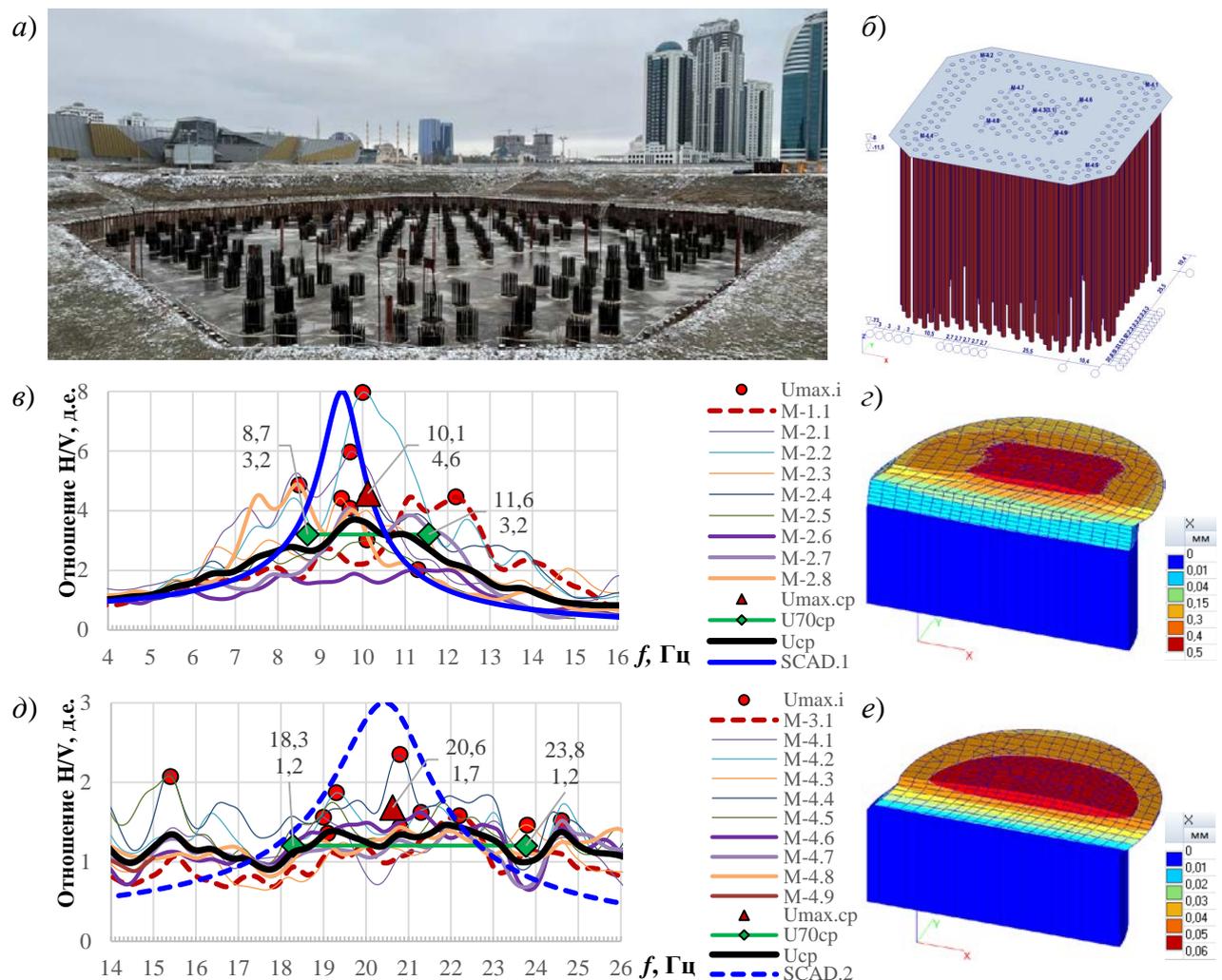


Рисунок 9 – Исследуемый свайный фундамент №1: а, б – общий вид котлована и 3D модели; в – результаты оценки резонансных характеристик грунтового основания HVSR и численным методами на дневной поверхности (SCAD.1); д – то же, по верху свай (SCAD.2); е – результаты численных расчетов перемещений по X на дневной поверхности в стороне от фундамента (SCAD.1); е – то же, по верху свай (SCAD.2).

Результаты анализа пространственных моделей в SCAD в режиме расчета по линейно спектральной теории по сравнению с режимом АЧХ сопоставимы для дневной поверхности (рисунок 9, *г*) и на дне котлована (рисунок 9, *е*), при этом наглядно отражают деформации при колебаниях свайного фундамента.

Полевые данные на дне котлована (рисунок 9, *д*) с точностью 3 % для резонансной частоты в окрестности 21 Гц при пиковых H/V отношениях соответствуют результатам численных расчетов в режиме АЧХ (синяя пунктирная линия) и жесткости, характерной для полускальных грунтов.

Для двух большеразмерных свайных фундаментов, расположенных в Грозном на площадках с грунтами II и III категорий, получены аналогичные полевые данные по удвоению сейсмической жесткости с точностью 9 и 6%.

В пятой главе приведены рекомендации к применению комплексного метода расчета большеразмерных свайных фундаментов, включая блок-схему алгоритма расчета с кратким описанием этапов (рисунок 10). Также даны рекомендации по полевой оценке параметров демпфирования основания и несущей способности свай при сейсмических нагрузках. Определены направления дальнейшего развития темы научных исследований.

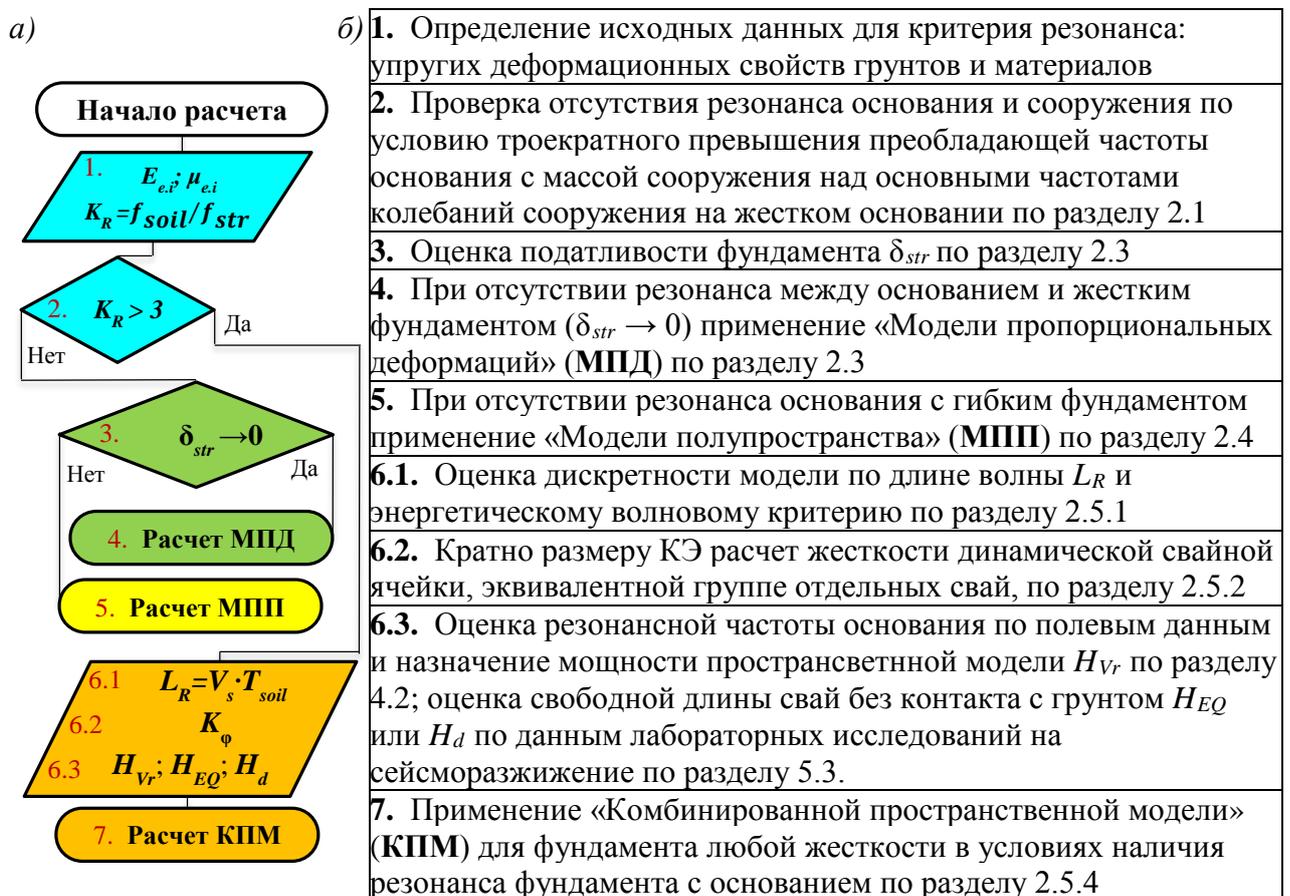


Рисунок 10 – Алгоритм комплексного метода расчета большеразмерных свайных фундаментов: *а* – блок-схема алгоритма расчета; *б* – краткое описание этапов расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований проведен анализ и выполнена модификация существующих расчетных моделей свайных фундаментов для условий динамического нагружения. Это позволило разработать комплексный метод расчета большеразмерных свайных фундаментов для прогнозирования динамического поведения системы «основание – свайный фундамент – сооружение» в условиях динамических нагрузок, включая слабые сейсмические воздействия интенсивностью до 7.4 баллов по MSK-64, когда доля нелинейных деформаций мала. Метод позволяет учитывать возможность резонанса фундамента с основанием, в том числе при образовании поверхностных сейсмических волн. Получены следующие результаты, обладающие научной новизной и выносимые на защиту:

1. В случае выявления возможности развития резонанса с грунтовым массивом при использовании формализованного критерия была предложена комбинированная пространственная модель большеразмерного свайного основания, основанная на инструментальных полевых измерениях резонансных характеристик основания методом HVSR для уточнения мощности сейсмореализующей толщи из объемных конечных элементов, по низу которой применяется контактное полупространство по К.Г. Шашкину.

2. Подтверждено соответствие колебаний отдельных свай в большеразмерном свайном фундаменте и предложенной аналитической модели укрупненных свайных ячеек, шаг которых должен совпадать с увеличенным размером конечных элементов после применения энергетического волнового критерия для оптимизации размера моделей.

3. Для условий, когда невозможно развитие резонанса между основанием и сооружением с жестким большеразмерным свайным фундаментом, разработана упрощенная численно-аналитическая модель пропорциональных деформаций, использующая нормативные динамические свойств грунтов по О.А. Савинову и основанная на модификации подхода Н.З. Готман.

4. Формализована зависимость, удобная для оценки резонансного периода основания T в секундах от мощности сейсмореализующей толщи H в метрах с использованием нормативных свойств грунтов, имеющая точность от 3 до 9% относительно полевых данных и повышающая безопасность проектируемых свайных фундаментов в условиях динамических воздействий путем исключения риска увеличения усилий среза в сваях до 2.45 раз по сравнению с нормативным методом расчета по линейно-спектральной теории.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ:

1. **Михайлов, В.С.** Метод учета резонансных эффектов при прогнозе колебаний большеразмерных свайных фундаментов / В.С. Михайлов, Л.В. Нуждин // Изв.вузов. Строительство. – 2025. – № 5. – С. 82-95. – DOI: 10.32683/0536-1052-2025-797-5-82-95.

2. **Михайлов, В.С.** Прогноз колебаний большеразмерных свайных фундаментов с учетом резонансных эффектов / Л.В. Нуждин, В.С. Михайлов // Construction and Geotechnics. – 2024. – № 3. – С. 68-78. – DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.06.

3. **Михайлов, В.С.** Численный расчет свайного поля с учетом динамических воздействий / Л.В. Нуждин, В.С. Михайлов // Construction and Geotechnics. – 2023. – № 1. – С. 22-36. – DOI 10.15593/2224-9826/2023.2.02.

4. **Михайлов, В.С.** Численное моделирование свайных фундаментов в расчетно-аналитическом комплексе SCAD Office / Л.В. Нуждин, В.С. Михайлов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура, т.8 – Пермь, 2018, – №1. – С. 5–18. – DOI 10.15593/2224-9826/2018.1.01.

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Web of Science:

5. **Mikhailov, V.S.** Pile field numerical calculation method accounting load history / V.S. Mikhailov, L.V. Nuzhdin // Smart Geotechnics for Smart Societies: Proceedings of the 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Astana, Kazakhstan/ – Astana, Kazakhstan: Creative Commons, CC BY-NC, 2023. – P. 2476-2481 – DOI 10.1201/9781003299127-384.

6. **Mikhailov, V.S.** Methods for subsoil modelling under dynamic impacts and multicomponent damping in SCAD FEA software with geophysical monitoring / L.V. Nuzhdin, V.S. Mikhailov, M.N. Voskresenskiy // Journal of Physics: International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, Moscow. Vol. 1425. – DOI 10.1088/1742-6596/1425/1/012096.

7. **Mikhailov, V.S.** On criterion for considering dynamic soil-structure interaction effects / L.V. Nuzhdin, V.S. Mikhailov, I.D. Yankovskaya // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction. CRC Press, 2019. – P. 210–215. – DOI 10.1201/9780429058882.