

На правах рукописи



Жавхлан Саруул

**СВАЙНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И  
СООРУЖЕНИЙ ОТ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН**

Специальность 2.1.9 – Строительная механика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Кузнецов Сергей Владимирович**

**Официальные оппоненты:** **Никитин Илья Степанович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, ИАП РАН, директор

**Голубев Василий Иванович**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, МФТИ, кафедра информатики и  
вычислительной математики, доцент

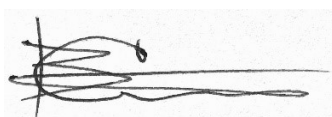
**Ведущая организация:** Акционерное общество  
«Атомэнергопроект»

Защита диссертации состоится «13» сентября 2023 г. в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, Зал учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на официальном сайте <https://mgsu.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сидоров Виталий Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Диссертационная работа посвящена исследованиям по защите территории зданий свайными барьерами в условиях появления поверхностных сейсмических волн.

При землетрясении возникают объёмные и поверхностные сейсмические волны. В зависимости от вида сейсмических волн применяются различные конструктивные решения, направленные на создание сейсмостойких сооружений, а также очень сложные механизмы защиты для отдельных зданий.

Объёмные волны распространяются от очага землетрясения во всех направлениях. Системы сейсмоизоляции эффективно рассеивают их энергию и защищают здания и сооружения. Поверхностные волны, наиболее опасными из которых являются волны Рэлея, Рэлея-Лэмба и Лява, имеют меньшую скорость и распространяются вдоль свободной поверхности земной коры. Волны Рэлея и Рэлея-Лэмба поляризованы в саггитальной плоскости, имеют экспоненциально затухающую с глубиной амплитуду и в слабых грунтах могут иметь длину полуволны, соизмеримую с размерами сооружения в плане, что вызывает изгибные деформации фундаментных конструкций этого сооружения с их последующим разрушением. В этом случае системы сейсмоизолирующих устройств оказываются малоэффективными. В этой связи вопросы защиты зданий и сооружений от поверхностных сейсмических волн представляются весьма актуальными.

Несмотря на то, что в экспериментальной и теоретической геофизике исследования поверхностных волн Рэлея начались вскоре после их открытия, произошедшего более ста лет назад, инженеры, занимающиеся вопросами сейсмостойкого строительства, стали обращать внимание на эти волны относительно недавно. Во многом это обусловлено тем, что теория поверхностных волн Рэлея является более сложной по сравнению с теорией объёмных волн, разработанной Пуассоном в первой половине девятнадцатого века.

Вопросы сейсмической защиты от объемных волн рассматривались на протяжении более двухсот лет в трудах большого количества ученых, включая Я.М. Айзенберга, В.А. Быховского, И.Л. Корчинского, И.В. Гольденבלата, С.В. Полякова, Н.А. Николаенко, В.О. Цшохера, А.Н. Бирбраера, Г.А. Джинчвелашвили, О.В. Мкртычева, В.Л. Мондруса, А.Е. Саргсяна, Л.Р. Ставницера и других исследователей. За рубежом вопросы, связанные с системами сейсмоизоляции, рассматривались в работах Т.Ж. Жунусова, М.Т. Уразбаева, Т.Р. Рашидова, Б. Мардонова, И. Мирзаева и многих других.

Если же говорить о защите от поверхностных сейсмических волн, то в этом направлении необходимо отметить работы Д.Д. Баркана, Х. Сапарлиева, Aki, Bolt, Bornitz, Djeran-Maigre, Gazetas, Halldorsson, Kim, Komatitsch, Limam, May, Parageorgiou, Segol, Tromp, Woods и других исследователей. Сейсмические барьеры для защиты от широкого спектра поверхностных волн, включая некоторые типы головных волн, исследовались в работах В.А. Братова, С.В. Кузнецова, А.В. Дудченко, А.Э. Нафасова, Н.Ф. Морозова и других.

Расположение объектов повышенного класса ответственности, таких как атомные и тепловые электростанции, мосты, тоннели, взлётные полосы аэродромов, здания повышенной этажности, стадионы и других технически-сложных и уникальных сооружений, в сеймоопасной зоне – увеличивает риск катастрофических последствий. Примером может служить комплекс зданий АЭС Nanwan (Тайвань), расположенной в зоне повышенной сейсмичности и считающейся одной из наиболее опасных АЭС в мире. При этом надо отметить, что станция расположена на острове, покрытом сетью из более чем 50 активных тектонических разломов. В таких ситуациях однозначно поможет сочетание территориальных и конструктивных методов сейсмозащиты.

В таких, как АЭС Nanwan, и в подобных сложных ситуациях решением может послужить совместное применение территориальных и конструктивных методов сейсмозащиты. Такое решение было реализовано в конструкциях опор мостов Васко Да Гама в Португалии и Рион-Андирион в Греции.

В то же время следует отметить, что известны случаи, когда здания и сооружения, которые были оборудованы системами сейсмоизолирующих устройств, разрушались при воздействии расчетных сейсмических нагрузок. Примером может служить землетрясение магнитудой 7.5, произошедшее в 1995 г. в городе Кобэ, Япония, когда были полностью разрушены 200 000 зданий, многие из которых были оснащены системами сейсмозащиты.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что сейсмическая защита зданий и сооружений на основе барьеров, препятствующих распространению поверхностных сейсмических волн, в том числе волн Рэлея, является актуальной темой исследования.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами распространения сейсмических волн в диспергирующих и анизотропных упругих средах и использования энергии сейсмических волн в качестве меры потенциальных повреждений зданий и сооружений стали активно заниматься с первой половины XX века. Идея об использовании волновых барьеров в качестве метода сейсмозащиты была впервые изложена в работе Parageorgiou A.-S. и Aki K.

Анализ доступных литературных источников показал, что свайный тип волновых барьеров значительно менее исследован, чем другие типы барьеров, а взаимодействие свайных барьеров с рэлеевскими волнами и вовсе не рассматривалось, в том числе отсутствуют какие-либо результаты численного моделирования пространственных задач по рассеиванию рэлеевских волн на сваях.

Необходимо отметить, что к свайным барьерам можно отнести винтовые сваи, впервые применённые ирландским инженером Александром Митчеллом в 1838 г. и в настоящее время используемые при строительстве в районах с повышенной сейсмичностью, в условиях вечной мерзлоты или на слабых обводнённых грунтах.

**Целью работы** является разработка нового эффективного метода сейсмозащиты на основе использования свайных барьеров, которые бы поглощали

и рассеивали энергии сейсмических волн, не пропуская их в область, защищаемую барьером.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить обзор и анализ на имеющихся литературах территориальных методов сейсмической защиты.
2. Создавать конечно-элементные модели свайных барьеров для решения волновых задач сейсמודинамики.
3. Вывести математические формулы для коэффициента редукции, характеризующего уровень снижения интенсивности рэлеевских волн в грунте.
4. Провести сравнительные анализы для изучения взаимодействия рэлеевских волн со свайными барьерами.
5. Определить оптимальные параметры свайных барьеров для получения наилучшего варианта проектирования.
6. Разработать рекомендации по использованию свайных барьеров для защиты территории от сейсмических волн.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Проведено численное моделирование взаимодействия поверхностных сейсмических волн со свайными барьерами с использованием метода конечных элементов для пространственной дискретизации задачи и явной центрально-разностной схемы второго порядка точности для интегрирования уравнений движения по времени с автоматическим выбором шага интегрирования для выполнения условия устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви.
2. Проведены сравнительные исследования свайных барьеров с различными физико-механическими и геометрическими параметрами для определения оптимальных параметров барьера, обеспечивающих наибольшее снижение

амплитуды колебаний приповерхностного слоя грунта в пределах защищаемой барьером территории при воздействии поверхностных сейсмических волн.

3. Разработана методика оптимизации в программном комплексе SIMULIA Abaqus параметров свайных сейсмических барьеров для конкретных заданных нагрузок, генерирующих волны Рэлея.

4. Разработана модель композитных свай в виде трубы, заполненной гранулированным материалом для оценки защитных свойств барьеров подобного типа.

**Теоретическая значимость** результатов работы состоит в разработке численного моделирования пространственных задач по рассеиванию рэлеевских волн на сваях с использованием метода конечных элементов явно центрально-разностной схемы второго порядка точности.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в том, что разработанный метод может быть использован для сейсмической защиты в сейсмоопасных областях. Причём возможно спроектировать свайный барьер, оптимизированный в части своей эффективности под условиям заданного района строительства. Также данный метод позволяет избежать реконструкции уникальных и культурно-исторических зданий, сохраняя их оригинальные виды.

**Методология и методы исследования.** В диссертационной работе использовался современный вычислительный комплекс, установленный в ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН и состоящий из многопроцессорного компьютера, оснащенного высокопроизводительными графическими процессорами, использующими CUDA архитектуру, и программного комплекса конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus. Также применялись классические положения и уравнения строительной механики, теории упругости и теории пластичности, апробированные в других авторов по данному направлению. А при решении задачи подбора оптимального расстояния между сваями применен метод

Парето-оптимальности на глобальной формулировке для многокритериальных задач.

**Степень достоверности.** Все теоретические результаты работы получены в результате численного решения уравнений строительной механики, теории упругости и теории пластичности в программном комплексе SIMULIA Abaqus и последующей обработки результатов расчётов с помощью математического аппарата. Программный комплекс SIMULIA Abaqus удовлетворяет стандарту качества ISO 9001 и стандарту качества, установленному Американской комиссией по контролю качества ядерных энергетических установок (ANSI/ASME NQA 1, 1983), а также является верифицированным в системе PAACH (Свидетельство № 05/SIMULIA Abaqus/2014 о верификации программного средства, применяемого для решения задач теплопроводности и фильтрации, определения статического, температурного и динамического напряжённо-деформированного состояния конструкций, зданий и сооружений).

#### **Апробация результатов.**

Основные результаты диссертационного исследования были представлены в докладах на следующих научных мероприятиях:

1. XLV Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», секция «Механика и моделирование материалов и технологий», г. Москва, ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН, 17-18 апр 2019 г.;
2. XXII Международная научная конференция «Строительство и формирование среды обитания», секция «Надежность зданий и сооружений», г. Ташкент, 18-21 апр 2019 г.;
3. XXVII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2020», подсекция «Газовая и волновая динамика» секции «Математика и механика», г. Москва, 10-27 ноя 2020 г.;



4. XLIX Международная летняя школа-конференция «Актуальные проблемы механики», мини-симпозиум «землетрясение и сейсмозащита», г. Санкт-Петербург, 21-25 июня 2021 г.;
5. II Научная конференция «Моделирование и методы структурного анализа MMSA-2021», г. Москва, 11-13 ноя 2021 г.;
6. III Всероссийский технологический форум «Территория инноваций: исследования, разработки, технологические стартапы», секция «Трансфер технологий и коммерциализация разработок», г. Пермь, 11-12 ноя 2021 г.;

**Публикации.** Результаты выполненного исследования опубликованы в пяти статьях, из них одна напечатана в журналах из перечня ВАК и одна – в журнале, входящем в базу данных Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего в себя 136 источников, в том числе 107 на иностранном языке. Общий объем работы составляет 110 страниц, включая 71 рисунка и четыре таблицы.

**На защиту выносятся следующие научные результаты, полученные автором:**

1. Концептуальные модели свайных барьеров для пространственных задач численного моделирования по взаимодействию барьеров с волнами Рэлея.
2. Решения задач по определению коэффициентов редукции и «зоны тени» в защищаемой территории внутри свайного поля.
3. Численные результаты сравнительных исследований барьеров с различными физико-математическими и геометрическими параметрами, а также результаты сравнения сплошных и композитных свай.
4. Результаты исследования защитных функций композитных свай-оболочек.
5. Результаты решения задачи нахождения оптимального расстояния между сваями методом Парето-оптимизации.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, приведена общая характеристика работы, где сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

**В первой главе** приводятся обзор и анализ исследований по территориальным методам сейсмической защиты, где подробно рассмотрены основные типы существующих сейсмических барьеров, примеры их применения на практике, другие территориальные методы сейсмозащиты, а также актуальные проблемы сейсмоустойчивых строителей в мире.

**Во второй главе** для изучения взаимодействия свайных барьеров с рэлеевскими волнами представляется концептуальная модель свайных барьеров в виде свайного поля, см. на рисунки 1 и 2.

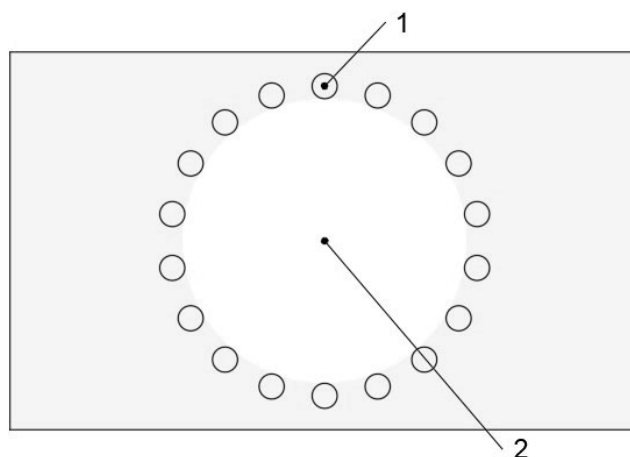


Рисунок 1. Свайные барьеры в виде свайного поля; 1 – круговой барьер, 2 – защищаемая территория

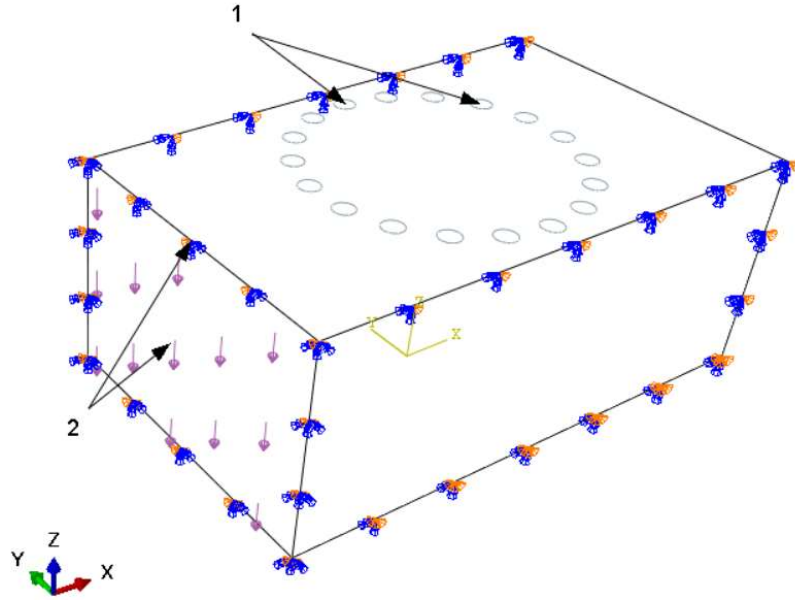


Рисунок 2. Пространственная концептуальная модель свайного поля; 1- сваи, 2 – нагрузка, генерирующая волны.

Рассматриваются возможные варианты железобетонных свай, применяемые в сравнительных задачах для оценки эффективности защитных свойств барьеров.

Исследуются волновые решения уравнений движения взаимодействия вертикального сейсмического барьера с поверхностными волнами Рэлея, которые в изотропной упругой плоскости может быть записаны в виде:

$$c_p^2 \nabla \operatorname{div} \mathbf{u} - c_s^2 \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{u} + p(t) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \mathbf{v} = \ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

где  $c_p^2$  – квадрат скорости продольной волны;  $c_s^2$  – квадрат скорости поперечной волны;  $\mathbf{u}$  – поле перемещений;  $p(t)$  – функция, характеризующая изменение во времени силового воздействия;  $\mathbf{x}_0$  – точка приложения силы;  $\mathbf{x}$  – произвольная точка в пространстве;  $\delta$  – обобщенная функция Дирака;  $\mathbf{v}$  – вектор, характеризующий направление приложения нагрузки.

На границе полупространства  $\Pi_\nu$  создаются однородные условия вида:

$$\mathbf{t}_\nu \equiv (\lambda \operatorname{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}) \cdot \boldsymbol{\nu} = 0, \mathbf{x}' \in \Pi_\nu \quad (2)$$

где  $\text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})$  – инвариант;  $\mathbf{I}$  – единичная диагональная матрица;  $\mu$  и  $\lambda$  – константы Ляме;  $\mathbf{v}$  – вектор, характеризующий направление внешней нормали к соответствующей границе.

Уравнения (1) и (2) дополнены начальными условиями:  $\mathbf{u}(\mathbf{x},t)|_{t=0}=\mathbf{0}$ ;  $\partial_t \mathbf{u}(\mathbf{x},t)|_{t=0}=\mathbf{0}$ .

В расчетах по определению магнитуд перемещений в защищаемой территории будут приняты следующие физико-механические параметры:

$$\mathbf{E} = 120 \text{ МПа}; \mathbf{v} = 0,25; \boldsymbol{\rho} = 1400 \text{ кг/м}^3 \quad (3)$$

где  $\mathbf{E}$  – модуль Юнга;  $\mathbf{v}$  – коэффициент Пуассона;  $\boldsymbol{\rho}$  – плотность среды;

При (3) выполняется условие Пуассона  $\lambda=\mu$ , а скорости соответствующих волн вычисляются по формулам:

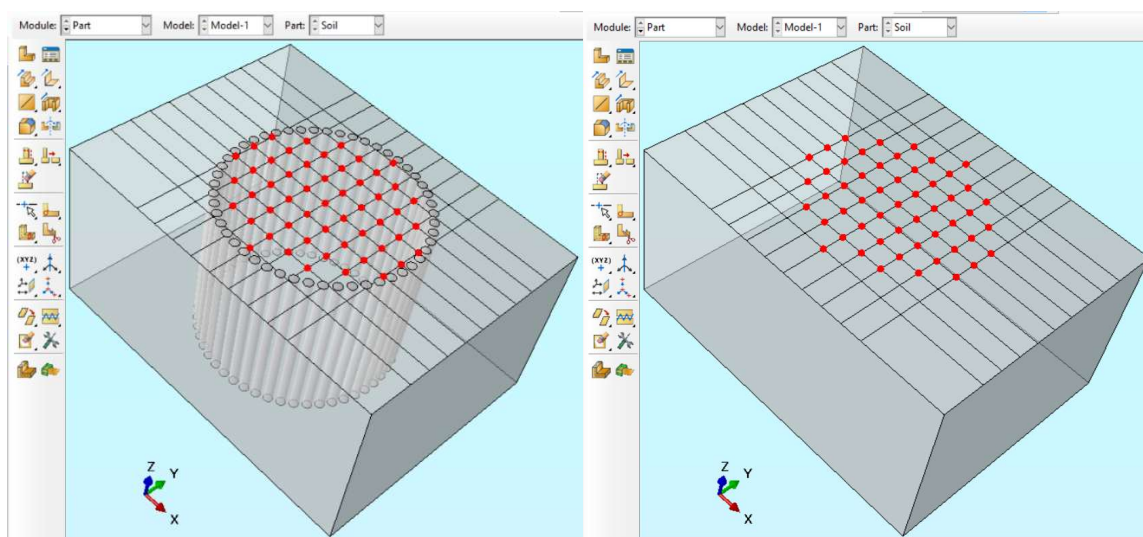
$$C_p = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}}; C_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}; C_R = \frac{0,84 + 1,22\nu}{1 + \nu} C_s \quad (4)$$

Также в этой главе рассматривались основные уравнения движения для изотропной упругой среды, в которой распространяются сейсмические волны. На основании уравнений, применяемых для описания внешнего сейсмического воздействия и соответствующих расчетов показаны графики зависимости амплитуд колебаний от времени, где можно увидеть (небольшие нефизические) осцилляции сейсмических волн за фронтом волны в защищаемой территории.

**Третья глава** посвящена анализам сравнительных исследований свайных барьеров. В настоящей главе исследуются свайные барьеры различных типов и их взаимодействия с поверхностными волнами Рэлея. Приводятся сведения о влиянии свайных барьеров на рассеяние энергии сейсмических волн. Проводятся сравнительные анализы свайных барьеров из разных материалов, а также из разных размеров. Выполняются исследования защитных свойств композитных свай-оболочек.

Все теоретические исследования в этой главе решаются созданием пространственных моделей свайного поля и его среды в модуле Dynamic/Explicit в программном комплексе Abaqus 6.14. Построение разных моделей свайных барьеров и соответствующие решения волновых задач проводятся с помощью явной разностной схемы второго порядка точности метода конечных элементов.

**В 3.1** Для решения задачи определения влияния свайных барьеров на рассеяние энергии рэлеевских волн были смоделированы массив грунта со свайным полем и массив грунта без свай. Для наблюдения влияния свайных барьеров на рассеяние рэлеевских волн, в каждой модели созданы по 53 точки наблюдения в защищаемой территории внутри свайного поля, см. на рисунок 3.



а

б

Рисунок 3. Модели для наблюдения рассеяние рэлеевских волн. (а) – массив грунта со сваями, (б) – массив грунта без свай.

Составляем сравнительные графики по значениям магнитуд перемещений в точках наблюдения в модели с барьерами и тем же точкам модели без барьера, см. на рисунок 4.

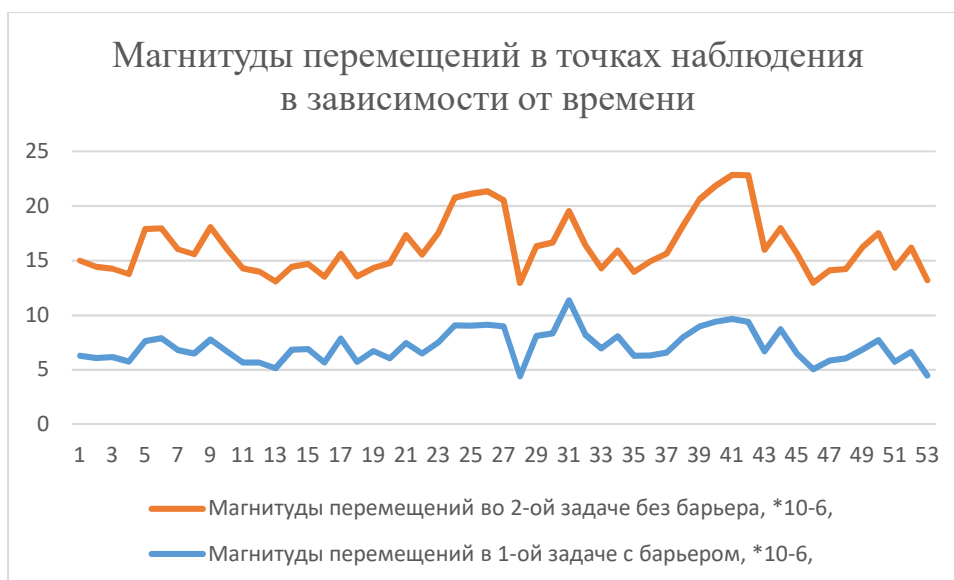


Рисунок 4. Сравнительные графики магнитуд перемещений в точках наблюдения.

Полученные сравнительные графики показали, что значения магнитуд перемещений в 1-ой задаче «с барьерами» в каждой точке наблюдения меньше чем значения магнитуд перемещений во 2-ой задаче «без барьера». Этот численный результат свидетельствует о том, что рэлеевские волны рассеиваются на свайном поле.

**В 3.2** сравнительные исследования для оценки эффективности свайных барьеров из разных размеров выполняются при соблюдении условия Куранта, с использованием явной разностной схемы Лакса-Вендроффа второго порядка, для обеспечения численной устойчивости.

Поставленная задача решается путем создания 2-х Dynamic/Explicit моделей в программном комплексе Abaqus/CAE 6.14. Отличие между 2-х конечно-элементных моделей состоит в диаметре свай, см. на рисунок 5.

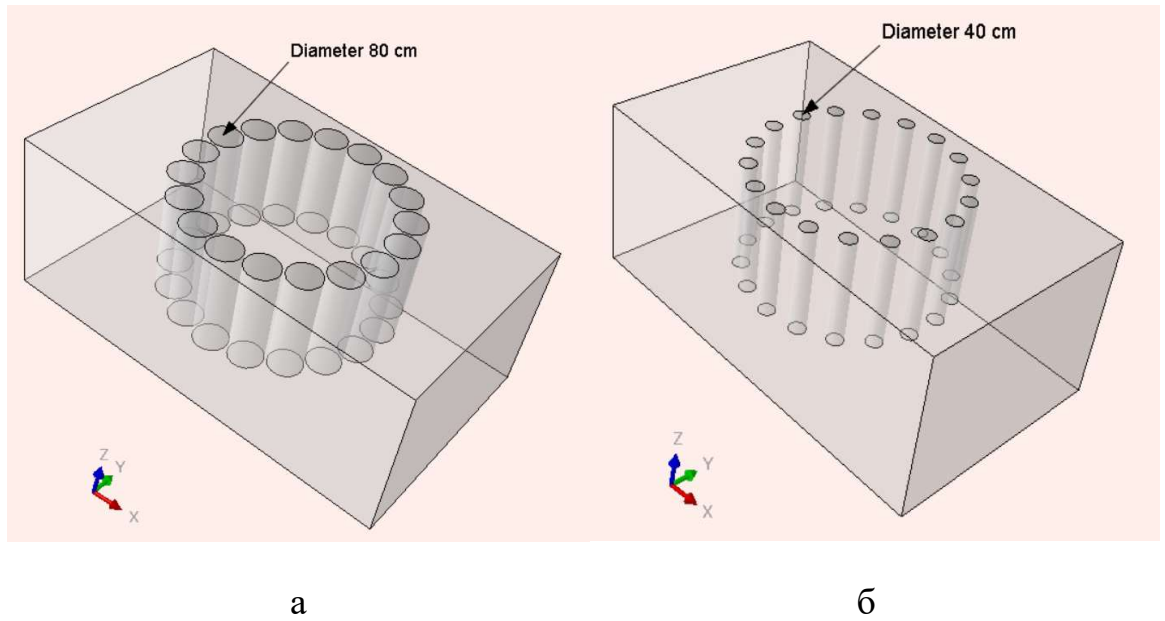


Рисунок 5. Модели свайного поля для сравнительного анализа. (а) – модель с большими сваями,  $\varnothing = 80$  см; (б) – модель с небольшими сваями,  $\varnothing = 40$  см.

Рассмотрим для визуального сравнения картинки перемещений, полученные на результатах расчетов, рисунок 6.

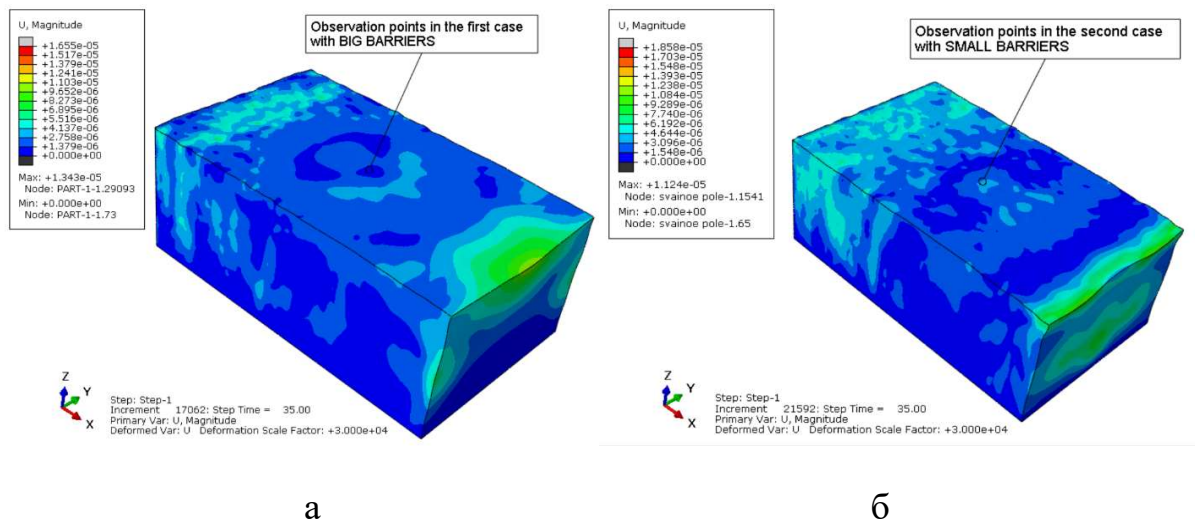


Рисунок 6. Изополя перемещений в глобальной системе. (а) – поле перемещений в 1-ой задаче с барьерами диаметром 80 см, (б) – во 2-ой задаче с барьерами диаметром 40 см.

Генерируемые поверхностные волны Рэлея распространяются слева направо по поверхности вдоль оси  $OX$  беспрепятственно, а внутри свайного поля, при взаимодействии барьеров с волнами, происходит заметное рассеивание энергии

действующих волн. Как показано на легендах поля перемещений на левом верхнем угле рисунка 6, разброс цветов в диапазоне от синего до серого. Зеленые и зелено-желтые цветы в полях перемещений соответствуют большим значениям магнитуд перемещений, синие – малым значениям.

Нельзя не обратить внимание на то, что магнитуды перемещений внутри свайного поля в первой модели с большими сваями уменьшены более чем в 9 раз, по сравнению с магнитудами перемещений снаружи свайного поля. Аналогичным образом, во второй модели с небольшими сваями уменьшение составило более чем в 7 раз. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что территория внутри свайного поля защищена от проникновения рэлеевских волн для модели со сваями большого диаметра примерно на 4,5 балла, а для модели со сваями небольшого диаметра – примерно на 3,5 балла. Здесь используется известное соотношение между магнитудами перемещений и балльностью землетрясения: магнитуды увеличиваются примерно в 2 раза при увеличении интенсивности землетрясения на один балл.

Следовательно, на основе проведенных сравнительных исследований можно прийти к следующему выводу: при воздействии сейсмических волн одной и той же интенсивности, свайное поле со сваями диаметром 80 см работает на 44% эффективнее свайного поля со сваями диаметром 40 см. Хотя вариант с большими сваями обеспечивает более высокий уровень защиты территории, он признается экономически не выгодным. В заключение, надо отметить, что поскольку вертикальная компонента рэлеевских волн примерно в 1,5 раз превышает горизонтальную компоненту, эти волны весьма отчетливо диагностируются на трёх координатных сейсмограммах.

**В 3.3** в сравнительных исследованиях для оценки эффективности свайных барьеров из разных материалов, рассмотрены барьеры, один из которых заполнен из акустически мягких материалов (пустые сваи), а другой из тяжелых бетонов (жесткие сваи), см. на рисунок 7.



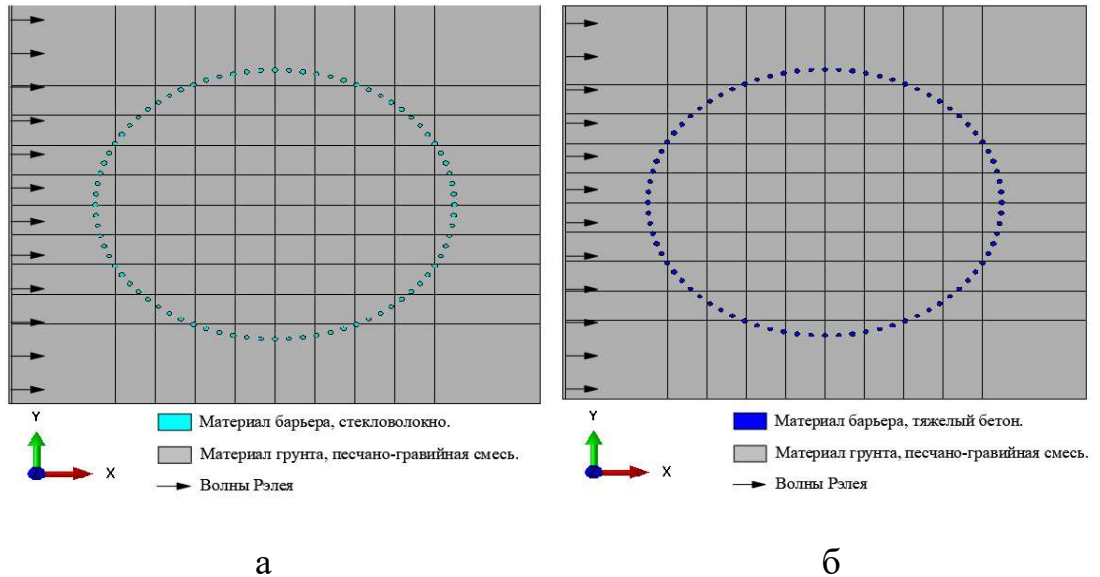


Рисунок 7. (а) – модель пустых свай, (б) – модель жестких свай.

Рисунок 8 представляет процесс распространения волны Рэлея по направлению вдоль оси  $Ox$  по свободной поверхности и вызванные сейсмическими волнами деформации и перемещения в расчетных моделях.

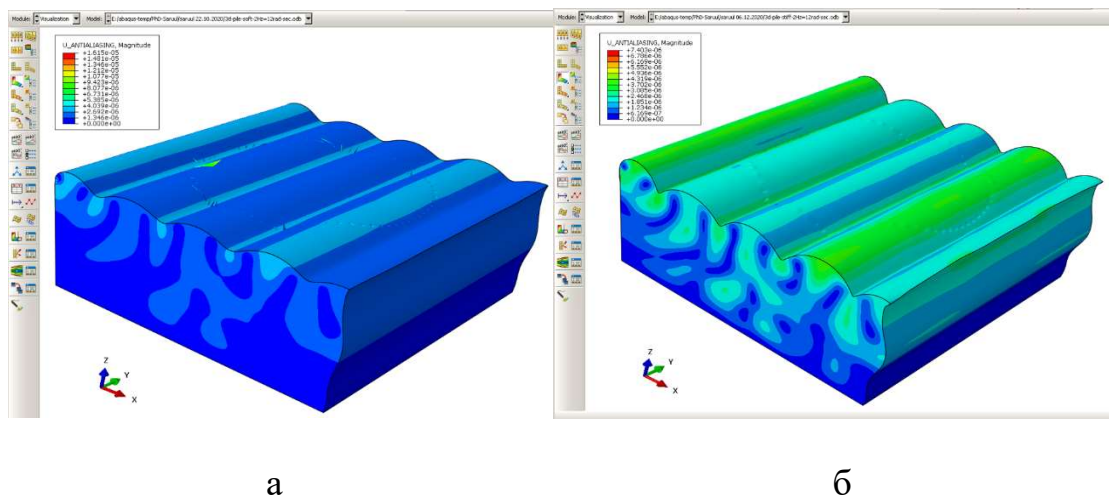


Рисунок 8. Деформированное состояние массива грунта (а) – для пустых свай, (б) – для жестких свай.

Возникающие сейсмическими волнами значения магнитуд перемещений во всех точках наблюдения в первом исследовании со сваями заполненными стекловолокном примерно в  $\sim 1,004$  раза меньше значений магнитуд перемещений во втором исследовании со сваями из тяжелого бетона В20. На основе данных сравнительных анализов можно прийти к следующему выводу: при воздействии

сейсмических волн одной и той же интенсивности, свайное поле из стекловолокна по сравнению со свайным полем из тяжелого бетона работает чуть эффективнее, соответствующие коэффициенты магнитуды перемещений в целом меньше на 0,5%. В то же время, стоимость материалов на одну сваю из стекловолокна - в 3 раза больше материалов бетонной сваи. Таким образом, бетонные сваи являются оптимальными с точки зрения соотношения стоимости и защитных функций.

**В 3.4** производилось расчетно-теоретическое исследование по оценке эффективности влияния композитных свай в виде металлической оболочки, заполненной гальками, на защитную способность барьеров при динамических нагрузках, эквивалентных сейсмическим. Данные конструкции могут применяться как для рассеивания энергии сейсмических волн, так и для дополнительного поглощения энергии волн материалом свай. Эффективность данных средств защиты будем оценивать на основе значения кинетической энергии и амплитуды перемещения в точках наблюдения за барьером. В модуле Dynamic/Explicit программного комплекса Abaqus 6.14 была смоделирована модель для сваи-оболочки, состоящая из трех solid extrude – грунта, сваи-оболочки и заполняющего композитного материала, см. на рисунок 9, где выделены сама оболочка сваи и ее заполняющий материал красным цветом.

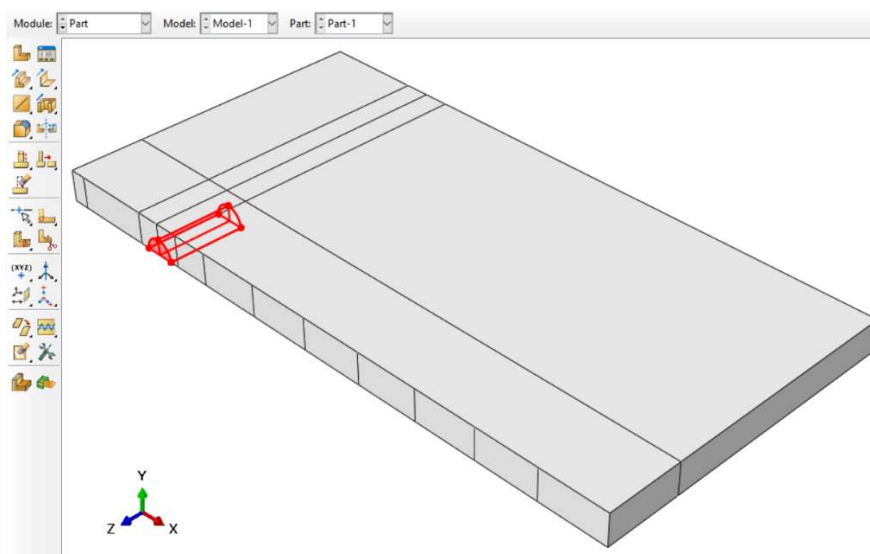


Рисунок 9. Модель для барьера вида сваи-оболочки.

В зоне за барьером для исследования защитных свойств созданы 14 точек наблюдения, 7 из которых – по центрам свай, 7 – между сваями, см. на рисунок 10.

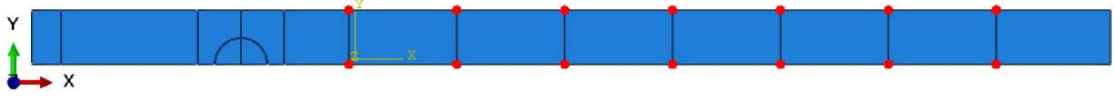


Рисунок 10. Точки наблюдения для барьера в виде свай-оболочки.

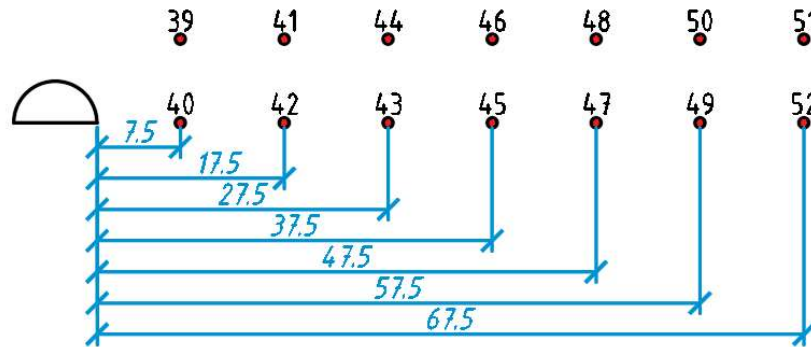


Рисунок 11. Схема расположения точек наблюдения для барьера свай-оболочки.

Составляем гистограмму по значениям магнитуд перемещений в точках наблюдения, в зависимости от их расстояний за барьером (рисунок 11), см. на рисунок 12.

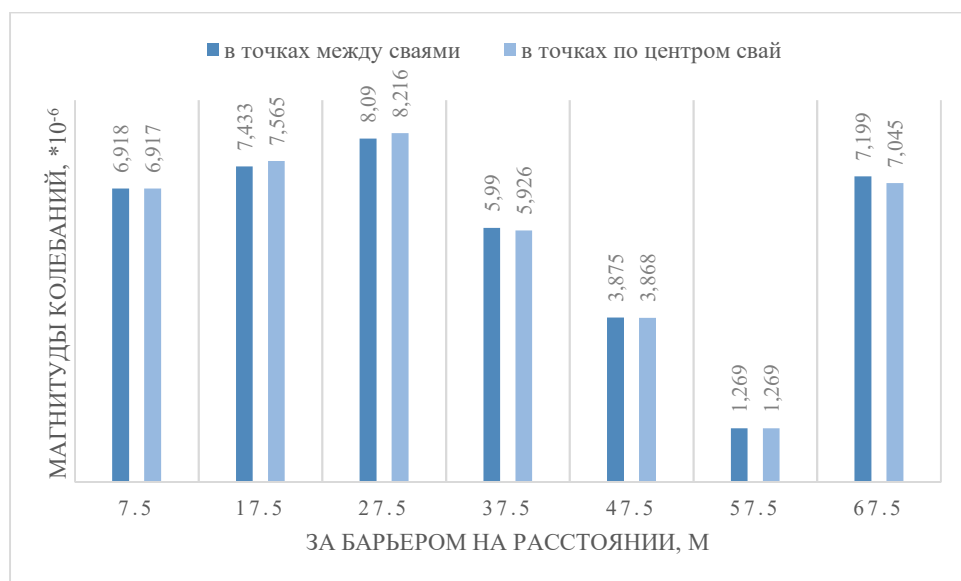


Рисунок 12. Гистограмма значений магнитуд в точках наблюдения для исследования барьера свай-оболочки.

Причем в то же время, когда магнитуды перемещений в зоне за барьером в зависимости от расположения колеблются, за все это время кинетическая энергия во всех частях модели повысилась постоянным темпом подобному синусоидальному закону, см. на рисунок 13.

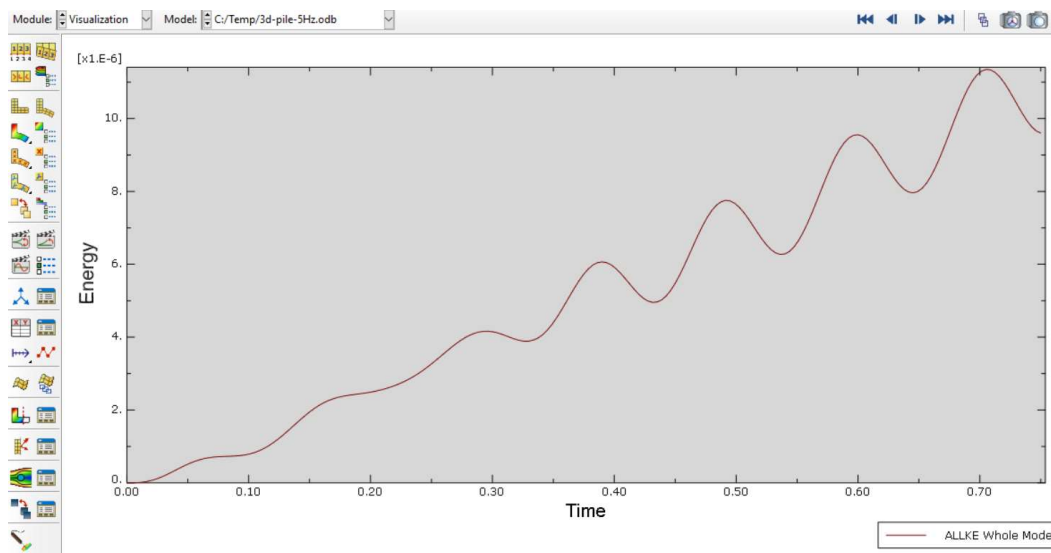


Рисунок 13. График изменения кинетических энергий в зависимости от времени для исследования барьера сваи-оболочки.

Результаты проведенных расчетов для исследования барьера сваи-оболочки показали, что эффект защитных свойств барьера зависит от того, на каком расстоянии за барьером расположен защищаемый объект. В наших исследованиях гистограмма на рисунке 12 доказала, что наиболее оптимальное расположение защищаемых объектов – за 40-60 м от барьера, где амплитуды колебания самые низкие, причем разницы в защитных свойств между точками «по центру свай» и «между сваями» нет.

**В 3.5** проведены расчетно-теоретические исследования для сравнения эффективности сплошных и композитных свай.

Расчеты производились численной методике по схеме Лакса-Вендроффа, имеющей второй порядок точности как в пространстве, так и во времени. При расчетах варьировались плотности, модули упругости и коэффициенты Пуассона в зависимости от свойств заполняющих материалов внутри оболочек свай. Для

решения задачи сравнения была создана конечно-элементная модель с 28 точками наблюдения, см. на рисунок 14.

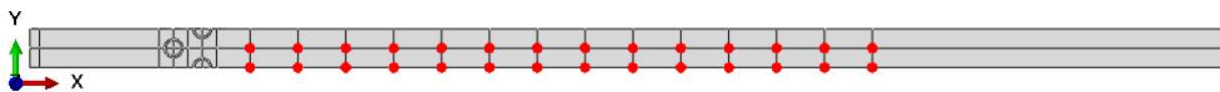


Рисунок 14. Модель барьеров для сравнительных исследований сплошных и композитных свай.

По максимальным значениям возникающих магнитуд перемещений в каждой точке наблюдения, вызванных поверхностными рэлеевскими волнами, сделано сравнение сплошных и композитных свай, см. на рисунок 15.

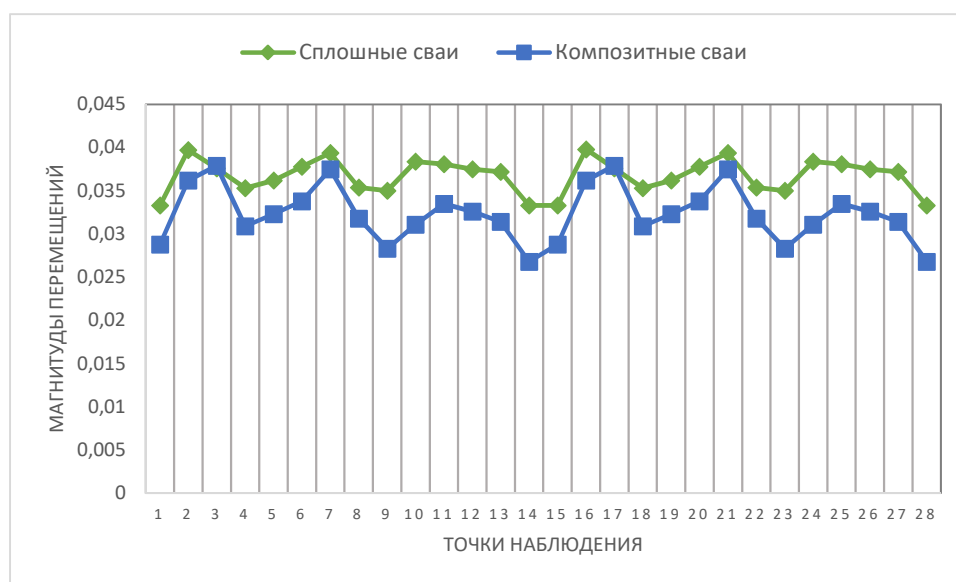


Рисунок 15. Магнитуды перемещений в точках наблюдения в сравнительных исследованиях сплошных и композитных свай.

Выведенные графики на рисунке 15 показали, что возникающие магнитуды перемещений в композитных сваях примерно в  $\sim 1,2$  раза меньше магнитудов перемещений в сплошных сваях. Следовательно, по защитной функции эффективность композитных свай на 13,5% превышает сплошных свай. Если же рассмотрим стоимости бетона и гальки за один кубометр на сегодняшнем рынке, то  $C_{\text{бет}}=2400$  руб/м<sup>3</sup>,  $C_{\text{гальки}}=1200$  руб/м<sup>3</sup>, что композитные сваи и выгоднее в 2 раза сплошных бетонных свай. Таким образом, по обоим этим показателям,

композитные сваи, заполненные гальками, представляют собой более оптимальным вариантом для защиты от сейсмических волн Рэлея.

**В четвертой главе** рассматриваются обзоры методов оптимизации и проводится оптимизация свайных барьеров на основе метода Парето-оптимальности.

Следует отметить, что в обзорных исследованиях основное внимание уделяется изучению метода Парето-оптимальности, в котором Парето предложил решение определения лучших альтернатив по многим критериям сразу. Т.е. это обосновано их возможностью оптимизировать одновременно не одну, а целое множество функций.

Исследованы барьеры глубиной 12 м и диаметром 1 м, с частотой 10 Гц, с задачей определения оптимального расстояния между барьерами. Результат расчета показал, что наиболее оптимальным решением является 7,5 метровый шаг барьеров.

Выявлено, что диапазон 7,4 ÷ 9,2 метров для шага барьеров относится к 80-90% эффективности суммарного удовлетворения всех систем.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Выполнены обзор и анализ существующих типов сейсмических барьеров, а также подобных сейсмическим барьерам территориальных методов сейсмозащиты, которые заявляют актуальности и значимости исследуемой темы. Так как разнообразие методов защиты очень много, необходимо для каждого конкретного случая сделать подбор наиболее выгодного варианта методов сейсмозащиты, и при этом обязательно должны учитывать особенности района строительства.

2. Сформулированы основные уравнения движения для среды распространения сейсмических волн, а также уравнения для описания внешнего сейсмического воздействия.

3. Проведены комплектные конечно-элементные исследования по анализу взаимодействия свайных барьеров с поверхностными волнами Рэлея. Доказана эффективность свайных барьеров в рассеивании энергии сейсмических волн. По результатам сравнительных исследований «с барьерами» и «без барьера», свайные барьеры в виде свайного поля снизили интенсивность рэлеевских волн примерно в 9 раз. А также в этих исследованиях определена зона тени внутри свайного поля, которая покажет, где в защищаемой территории амплитуда колебания самые слабые.

4. По результатам сравнительных исследований свайных барьеров из разных размеров было обнаружено, что для модели со сваями диаметром 80 см территория защищена на 4,5 балла, а для модели со сваями диаметром 40 см территория защищена на 3,5 балла, т.е. большой диаметр приводит к лучшей сейсмической защите в плане балльности площадки.

5. По результатам сравнительных исследований «пустых» из акустически мягких материалов и «жестких» из тяжелого бетона было найдено, что «пустые» работают эффективнее на 0,5% по сравнению с «жесткими». Но с учетом того, что «пустые» по стоимости на одну сваю, превышают в 3 раза «жестких», жесткие сваи из бетона в итоге выбраны как наиболее оптимальный вариант защиты.

6. Для исследования защитных функций композитных свай была предложена модель барьера в виде металлической оболочки, заполненной гранулированными материалами (галька). Такая модель обусловлена тем, чтобы помимо рассеяния энергии волн на барьерах происходило дополнительное поглощение энергии материалом свай. В результате этого исследования выяснено, что защитные свойства барьеров зависит от того, на каком расстоянии за барьером объект расположен. Обнаружено, что расстояние в диапазоне 40÷60 метров является самым оптимальным, где магнитуды перемещения самые низкие.

7. По результатам сравнительных исследований сплошных и композитных свай было выявлено, что композитные сваи, заполненные гранулированными материалами, работают лучше сплошных бетонных свай. Эффективность композитных свай оказалась на 13,5% больше.

8. Получены оптимальные значения для расстояния между барьерами на основе метода-Парето, при ограничениях глубины и диаметра свай. Определено, что для эффективной защиты шаг барьеров может находиться в диапазоне 7,4÷9,2 метров, но не более чем 9,2 метра, так как дальнейшее увеличение расстояния между барьерами приводит к ухудшению его защитных свойств.

В заключение по применению сейсмических барьеров можно **рекомендовать** следующие решения:

- Барьеры, как территориальный метод сейсмической защиты, способны защитить не только отдельные здания, но и целый квартал или небольшое поселение.
- При падении поверхностных сейсмических волн, таких как волн Рэлея, Лява и Рэлея-Лэмба, защиту фундаментных конструкций могут обеспечить только сейсмические барьеры. Для защиты от объемных сейсмических волн, сейсмические барьеры оказываются малоэффективным средством, так как защита от объемных волн требует применения других методов, основанных на использовании сейсмоизолирующих устройств, динамических гасителей колебаний и т.д.
- В сложной сейсмической ситуации, для достижения высокого эффекта защиты зданий и сооружений, рекомендуется применять сейсмические барьеры в сочетании с другими методами сейсмозащиты, связанные с конструктивными решениями.
- Свайные барьеры эффективны на слабых грунтах, которые не только укрепляют слабые грунты основания, но и служат защитой от сейсмических воздействий. А на особо прочных грунтах, например, скальных породах, устройство барьеров требует использования новых технологий с пневмоударным бурением с одновременным погружением свай-оболочки, а также с обратной циркуляцией или забивки свай-оболочек тяжелыми молотами.
- На участках, расположенных в опасной близости от жилых домов или в условиях плотной городской застройки не рекомендуется устройство



сейсмических барьеров, поскольку при производстве работ может возникнуть негативное воздействие на фундаментные конструкции соседних зданий.

В качестве **перспективы** дальнейшей разработки темы предполагается решение оптимизационных задач по определению физико-механических и геометрических параметров барьеров, обеспечивающих увеличение коэффициента редукции колебаний в зоне тени, а также увеличение самой зоны «волновой тени». Отмечаем, что последнее предполагает создание барьеров из метаматериалов, которые помимо дифракции сейсмических волн самого барьера, должны обеспечить дополнительное рассеяние энергии волн в материале барьера.

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. **Жавхлан С.** Сейсмические барьеры: современное состояние и перспективы развития // Архитектура и строительство России. 2019. № 2 (230). С. 118-120.
2. **Жавхлан С.** Влияние свайных барьеров на рассеяние сейсмических волн Рэлея // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2021. №5 (54). С. 40-44.
3. Vershinin V., **Javkhlan S.**, Saidmukaram S. Seismic pads to protect buildings and structures from bulk seismic waves. // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 04047. DOI 10/1051/e3sconf/20199704047.
4. **Жавхлан С.** Обзор территориальных методов сейсмической защиты // Сборник трудов Международной молодежной научной конференции XLV Гагаринские чтения. 2019. С. 78-80.
5. **Жавхлан С.** Свайные барьеры от поверхностных сейсмических волн // Сборник форума II Всероссийской научно-практической конференции «Технологическое предпринимательство, коммерциализация результатов интеллектуальной деятельности и трансфер технологий». 2021. С. 109-115.