

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет»

На правах рукописи



**Жавхлан Саруул**

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

Специальность 2.1.9 - Строительная механика

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

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

Москва 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕРРИТОРИАЛЬНЫМ МЕТОДАМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1. Актуальные проблемы сейсмоустойчивых строителей в мире .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. Основные типы сейсмических барьеров .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3. Примеры применения сейсмических барьеров на практике .....</b>	<b>24</b>
<b>1.4. Другие территориальные методы для сейсмической защиты.....</b>	<b>30</b>
<b>1.5. Выводы по главе 1 .....</b>	<b>36</b>
<b>Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БАРЬЕРА С СЕЙСМИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ .....</b>	<b>37</b>
<b>2.1. Объемные сейсмические волны .....</b>	<b>37</b>
<b>2.2. Поверхностные сейсмические волны .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3. Концепция свайных сейсмических барьеров .....</b>	<b>43</b>
<b>2.4. Основные уравнения при описании модельной среды .....</b>	<b>45</b>
<b>2.5. Внешнее воздействие при сейсмических нагрузках .....</b>	<b>46</b>
<b>2.6. Выводы по главе 2.....</b>	<b>49</b>
<b>Глава 3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАЙНЫХ БАРЬЕРОВ .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1. Влияние свайных барьеров на рассеяние энергии сейсмических волн</b>	<b>51</b>
<b>3.2. Анализ эффективности свайных барьеров при изменении их геометрии .....</b>	<b>63</b>
<b>3.3. Сравнительный анализ свайных барьеров из разных материалов .....</b>	<b>68</b>
<b>3.4. Исследование защитных свойств композитных свай-оболочек.....</b>	<b>74</b>
<b>3.5. Сравнение эффективности сплошных и композитных свай .....</b>	<b>79</b>
<b>3.6. Выводы по главе 3 .....</b>	<b>80</b>
<b>Глава 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ .....</b>	<b>82</b>
<b>4.1. Обзор методов оптимизации .....</b>	<b>82</b>
<b>4.2. Решение задачи оптимизации геометрических параметров свайного барьера методом Парето оптимизации .....</b>	<b>89</b>

<b>4.3. Выводы по главе 4 .....</b>	<b>94</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>95</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>98</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения могут быть вызваны естественными причинами, или искусственными процессами. Землетрясения с катастрофическими последствиями фиксируются по всему месту земного шара. В связи с этим в последнее время вопрос о повышении сейсмостойкости зданий и территориальные методы защиты зданий становятся все более актуальными.

**Тематика исследований.** Настоящая работа посвящена исследованиям по вопросу защиты от поверхностных сейсмических волн, представляющих угрозу как для наземных, так и для подземных сооружений.

**Актуальность исследования.** 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 объёмных 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 сейсмической защите от поверхностных сейсмических волн, из которых наиболее важными, безусловно, являются рэлеевские волны, а так же волны Рэлея – Лэмба и Лява, то в этом направлении необходимо отметить работы Д. Д. Баркана, Х. Сапарлиева, а так же Aki, Bolt, Bornitz, Djeran-Maigre, Gazetas, Halldorsson, Kim, Komatitsch, Limam, May, Papageorgiou, 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.

Отмечая важность и актуальность тематики, можно привести несколько показательных примеров, указывающих на необходимость сейсмической защиты от рэлеевских волн.

Первый пример касается великого Ашхабадского землетрясения 1948 года, подробно изученного целым рядом выдающихся советских геофизиков (Г. П. Горшковым, Д. Н. Рустановичем, С. В. Медведевым, разработавшим впоследствии макросейсмическую шкалу MSK-64, и других) [13]. В этих исследованиях отмечалось, что вслед за приходом объемных Р- и S-волн последовала мощная рэлеевская волна, которая и вызвала катастрофические разрушения. Здесь надо отметить, что далеко не каждое землетрясение вызывает интенсивные рэлеевские волны, – для их возникновения необходимы как определённые геологические условия вблизи от эпицентра, так и конкретные механизмы, действующие в очаге землетрясения.

Второй показательный пример связан с разрушением здания президентского дворца в г. Порт-о-Пренс, Гаити во время разрушительного землетрясения 2010 г. Это здание в ходе реконструкции, проведенной в 2003 г., было оборудовано системой сейсмоизоляции. Сейсмоизоляторы традиционно устанавливаются на фундаментные конструкции и хорошо защищают от сейсмических S-волн. Однако при землетрясении 2010 г. наряду с S-волнами возникли рэлеевские волны значительной интенсивности, которые привели к разрушению фундаментных конструкций и, как следствие, к разрушению всего сооружения [72].

Наконец, третий пример связан с появлением магистральной трещины в фундаментных конструкциях здания реакторного отделения АЭС Фукусима-1 при землетрясении 2011 г., вызывавшем сильнейшее цунами и, как показал анализ соответствующих сейсмограмм, рэлеевские волны значительной интенсивности, которые и привели к появлению трещин [3].

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 сейсмоопасной 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 [73].

В таких ситуациях решением может послужить совместное применение территориальных и конструктивных методов сейсмозащиты. Такое решение было реализовано в конструкциях опор мостов Васко да Гама (Португалия) и Рион-Андирион (Греция) [55].

В то же время следует отметить, что известны случаи, когда сооружения, оборудованные системами сейсмозащитных 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 вышесказанных источников можно сделать вывод, что сейсмическая защита зданий и сооружений на основе барьеров, препятствующих распространению поверхностных сейсмических волн, в том числе волн Рэлея и Рэлея-Лэмба, 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 Papageorgiou A.S. и Aki K. [52], [53].

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.

В качестве **гипотезы научной работы** принимается, что сейсмические волны Рэля при взаимодействии со свайными полями могут быть экранированы, а их энергия – рассеяна на сваях, так что за барьером образуется зона «волновой тени».

**Целью работы** является разработка нового эффективного метода сейсмозащиты на основе использования свайных барьеров, которые бы поглощали и рассеивали энергию 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 сейсмомодинамики.
3. Вывести математические формулы для определения коэффициентов редукции для оценки снижения интенсивности рэлеевских волн в грунте.
4. Провести сравнительные анализы для изучения взаимодействия свайных барьеров с рэлеевскими волнами.
5. Определить оптимальные параметры свайных барьеров для получения наилучшего варианта проектирования.



6. Разработать рекомендации по использованию свайных барьеров для защиты территории от сейсмических волн.

**Объект и предмет исследования.** Объектом данной работы является свайные барьеры различных типов в виде свайного поля, конечно-элементные модели которых созданы в сплошной среде волновой динамики. Наряду с этим, основным **предметом** настоящего исследования является рассеяние рэлеевских волн на сваях, а также их взаимодействие со свайным полем.

**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 математическая 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 условия 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 для теоретических исследований свайных сейсмических барьеров 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 исследованиях других авторов по данному направлению.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 2.1.9 – Строительная механика. Соответствие вытекает из удовлетворения следующим пунктам:

Пункт 2: «Линейная и нелинейная механика конструкций зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета»;

Пункт 4: «Численные и численно-аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость при статических, динамических, температурных и других воздействиях»;

Пункт 5: «Теория и методы оптимизации конструкций зданий и сооружений»;

Пункт 7: «Теория и методы расчета сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы, пожары, аварии и так далее);

Пункт 12: «Исследование и моделирование нагрузок и воздействий на здания и сооружения».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Концептуальные модели свайных барьеров для пространственных задач для 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 разными размерами, с разными материалами, а также сплошных и композитных свай.

4. Результаты исследования защитных функций композитных свай-оболочек.

5. Результаты решения задачи нахождения оптимального расстояния между сваями при фиксированной длине и диаметре методом Парето-оптимизации.

**Личный вклад** соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации. Представленные в диссертационной работе исследования, включающие конечно-элементные моделирования свайных барьеров различного типа, проведение расчетов, сравнение и анализ полученных результатов, выполнялись лично автором.

**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 РААСН (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 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 диссертационной работы.**

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.

## Глава 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕРРИТОРИАЛЬНЫМ МЕТОДАМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

В этой главе анализируются методы территориальной защиты на основе сейсмических барьеров, концепция которых основана на препятствии проникновению акустических волн в защищаемые барьером области. Рассматриваются горизонтальные и вертикальные типы барьеров, а также барьеры в виде свай. Проводится анализ барьеров, идея которых базируется на том, что шероховатая поверхность полупространства приводит к затуханию поверхностных сейсмических волн. Также разбираются актуальные проблемы строительства сейсмостойчивых зданий и сооружений во всем мире. Исследуются и другие методы строительства в сейсмоопасных районах.

Методы сейсмической защиты могут быть подразделены на два класса:

I. Конструктивные методы. Методы применяются при проектировании сейсмобезопасных сооружений согласно по СНИП II-7-81 «Строительство в сейсмических районах», по действующему в настоящее время своду правил СП 14.13330.2018, в которых указаны следующие основные принципы соблюдения для проектирования:

- Для зданий с различными конструктивными схемами или с перепадом высот – ограничения по высоте и этажности.
- Для длинных зданий – разделение зданий на отдельные блоки антисейсмическими швами.
- Специальные требования к проектированию конструктивных элементов зданий, которые необходимо соблюдать.

А также учитывая сейсмическое районирование проектных территорий, можно рассчитывать сейсмические воздействия на здания и сооружения, и определить расчетные положения для установки сейсмоизолирующих устройств.

II. Территориальные методы. В первую очередь, это методы, основанные на создании различного рода барьеров, позволяющих защитить отдельные территории и располагающиеся на них здания и сооружения без значительного усложнения проектных решений последних или, в случае уже существующих сооружений, без изменения их несущих конструкций. К территориальным методам сейсмозащиты также относятся усиление или замена грунтовых массивов на площадке строительства.

### 1.1. Актуальные проблемы сейсмоустойчивых строителей в мире

По теме «Строительство сейсмоустойчивых зданий» велось много разработок и исследований. Как пишет американская газета «Нью-Йорк таймс», сильные землетрясения, которые могут произойти в ближайшие десятилетия в крупных городах Земли, приведут к колоссальным жертвам, если власти этих городов не ускорят строительство сейсмоустойчивых зданий.

В американской газете «Washington Post» в своё время вышла статья, в которой говорилось, что после разрушительных землетрясений на Гаити и в Чили ученые были очень обеспокоены этой проблемой. Они отмечали, что большого количества жертв и разрушений можно было бы избежать, если бы здания проектировались и возводились в соответствии с нормами и правилами строительства в сейсмоопасных районах. Примером может служить разрушение здания президентского комплекса в г. Порт-о-Пренсе, Гаити (см. Рис. 1.1.) землетрясением магнитудой  $M_w = 7$ , произошедшим 12 января 2010 года.

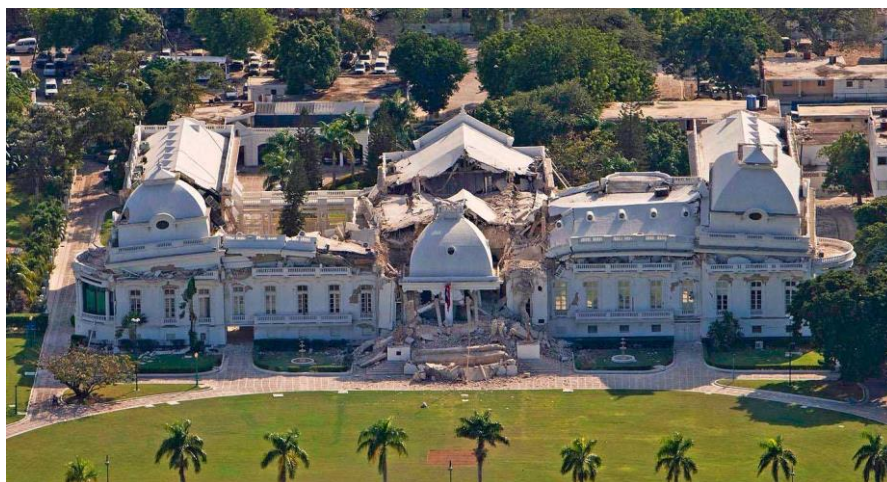


Рисунок 1.1. Обрушение конструкций президентского комплекса в Гаити [74].

Официальная резиденция президента – Национальный дворец в г. Порт-о-Пренсе, Гаити – была построена в 1914-1920 гг. в стиле боз-ар по проекту гаитянского архитектора Жоржа Боссана в соответствии с французскими проектными нормами того времени. В 2004 г. здание было реконструировано и оборудовано системой сейсмоизолирующих устройств. При обследовании разрушенного здания были выявлены многочисленные трещины в фундаментных конструкциях дворцового комплекса [74].

А также в 24 января 2022 г. «Европейско-Средиземноморский сейсмологический центр» сообщил, что землетрясение магнитудой 5,3 произошло в районе Гаити в департаменте Нип. Согласно управлению гражданской защиты в Нипе, в результате этого землетрясения, 191 дом был разрушен, 591 дом был поврежден, пострадали 52, и погибли 2 человека. Из всех рассмотренных случаев можно сделать вывод, что в этом плане одноименные острова западного полушария Земли, включающие Доминиканскую республику и республику Гаити в наибольшей опасности в связи с их географической особенностью.

При землетрясении в Ашхабаде 6 октября 1948 г. сильные повреждения получили промышленные здания с железобетонным каркасом [4], например, полностью обрушились здания мясокомбината и мельницы (см. Рис. 1.2). Причинами обрушения этих зданий оказались сильно заниженные расчётные сейсмические нагрузки и низкое качество железобетонных конструкций (низкая прочность бетона и недостаточное количество поперечной арматуры).





Рисунок 1.2. Землетрясение в Ашхабаде. 1948 г. [4].

Здания и сооружения в Гаити и Чили были проектированы без учета возможных сейсмических воздействий. По словам учёного Чака ДеМетса из Северо-Западного университета Иллинойса, такие безответственные отношения к проектированию сейсмостойкого строительства приводят к колоссальным жертвам [123].

По мнению сейсмолога Роджера Билхэма сейчас наблюдается рост урбанизации и демографический подъем, и к середине 21-ого века это приведет к тому, что человечеству потребуется более чем 1 млрд. жилых строений. При этом, жилищные строения он назвал оружием массового поражения. Роджер Билхэм считает, что проектировщики должны уделять особое внимание строительству сейсмоустойчивых зданий. Он отмечал, что необходимо разработать специальную программу строительного надзора в крупных городах, находящихся в зоне повышенной сейсмичности [123].

Из всех вышерассмотренных и других связанных источников можно сделать вывод о том, что существует острая необходимость во внедрении в сейсмостойкую строительную отрасль новых методов и технологий проектирования. А их взаимоувязка с традиционными методами тоже очень важна.

## **1.2. Основные типы сейсмических барьеров**

- Горизонтальные барьеры

По-видимому, впервые идея применения горизонтальных барьеров для защиты от сейсмических волн была высказана в работе Кузнецова [39]. В основе концепции горизонтального барьера лежит теорема Чадвика [25], которая утверждает, что рэлеевские волны не могут распространяться вдоль заземлённой границы полупространства.

В соответствии с условиями теоремы Чадвика в работах [39-42] рассматривался относительно тонкий слой с модифицированными физико-механическими свойствами, по сравнению со свойствами подлежащего полупространства (см. Рис. 1.3).



Рисунок 1.3. Концептуальный вид горизонтального барьера [40].

Принцип действия горизонтального барьера заключается в том, что наличие такого поверхностного слоя с модифицированными свойствами уменьшает интенсивность проходящих через него рэлеевских волн, так что за барьером образуется зона «волновой тени», что говорит о принципиальной возможности использования такого барьера для территориальной сейсмозащиты (см. Рис. 1.4).

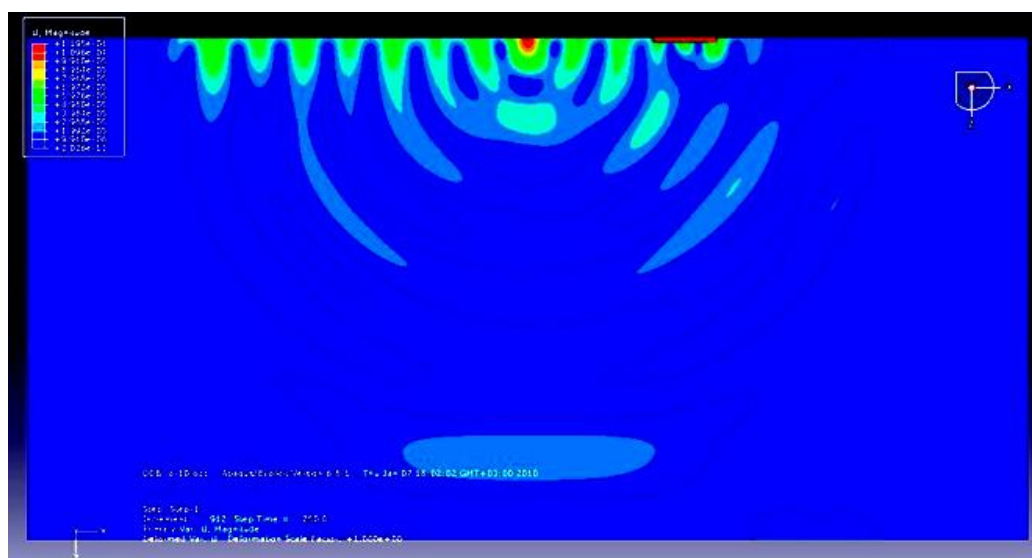


Рисунок 1.4. Процесс взаимодействия рэлеевских волн с горизонтальным барьером [40].

Проведенные в работах [40-42] расчёты показали, что наибольшая эффективность горизонтального барьера достигается, когда его плотность больше, а модуль упругости меньше, чем у подлежащего полупространства. Следует отметить, что в данных работах расчёты были ограничены в основном плоскими моделями, так что остаются неисследованными пространственные задачи с горизонтальными барьерами, например, когда барьер имеет форму кольца, охватывающего защищаемую территорию.

- Вертикальные барьеры

Исследования по вертикальным барьерам значительно больше, чем исследований по горизонтальным барьерам. Большая часть теоретических работ по вертикальным барьерам связана с решением плоских задач с помощью метода конечных элементов.

Первые результаты экспериментальных исследований по пустотелым вертикальным барьерам опубликованы в работах [19, 22]. В данных работах исследовались прямолинейные барьеры конечной глубины. В экспериментах обнаруживалась зона «волновой тени» в защищаемой зоне за барьером. Авторы

пришли к выводу, что пустотелые траншеи могут служить для защиты от волновых воздействий.

Из экспериментальных исследований [57, 67] стало известно, что заполненные жидкостью или различными растворами (цементными или глинистыми) вертикальные барьеры так же могут служить для защиты территорий от сейсмических волн. Модель такого кольцевого барьера показана на Рис. 1.5. Например, для кольцевого барьера, заполненного глинистым раствором, коэффициент снижения амплитуды вертикальной компоненты рэлеевских волн составил 1.33 при отношении глубины барьера к длине волны равному 0,6. Стоит, однако, отметить, что с целью уменьшения геометрических размеров барьеров исследования проводились для относительно высоких частот волнового воздействия (200-350 Гц).

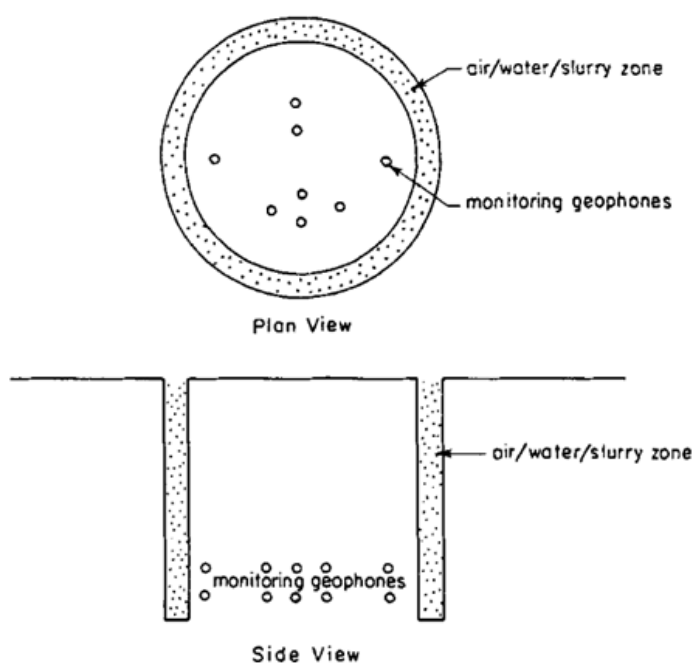


Рисунок 1.5. Модель кольцевого барьера вертикального типа [67].

Теоретические исследования по пустотелым вертикальным барьерам в виде траншей проводились в [46, 47, 59] с помощью метода конечных элементов. Причём в [46, 47] исследовались траншеи естественного происхождения – глубокие каньоны (см. Рис. 1.6). Исследованные в данных работах траншеи имели ширину 30 м и глубину 150 м. Отметим, однако, что в работах [46, 47] рассматривалось

взаимодействие с барьером только и SH-волн. Для барьера, показанного на Рис. 1.6, коэффициент ослабления колебаний свободной поверхности за барьером имел практически значимую величину во всём исследованном диапазоне частот – 1.5-6 Гц, на основе чего было сделано заключение, что глубокие каньоны естественного происхождения выступают в роли барьеров для объёмных волн.

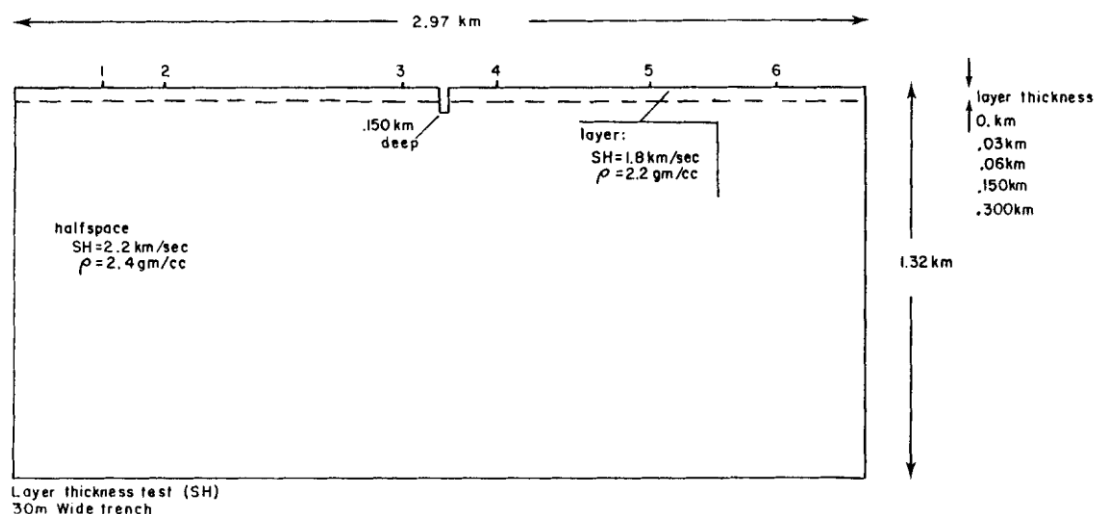


Рисунок 1.6. Модель барьера, имитирующая глубокий каньон естественного происхождения [46] [47].

Большое количество публикаций по вертикальным барьерам связано с защитой от колебаний антропогенной природы. В работах [15, 17, 24, 34, 35, 49, 68] с помощью плоских конечно-элементных моделей исследовалась эффективность прямолинейных вертикальных барьеров в части территориальной защиты от вибрационных воздействий, вызванных движением железнодорожного транспорта (см. Рис. 1.7). Рассматривались пустотелые барьеры в виде траншей, а также вертикальные барьеры с различными заполнителями. По результатам этих исследований получены весьма противоречивые результаты: различия между барьерами, заполненными разными материалами, в части их эффективности практически отсутствуют; более того, само наличие барьера не даёт практически никакого эффекта. Примером могут служить графики из работы [24] – см. Рис. 1.8.

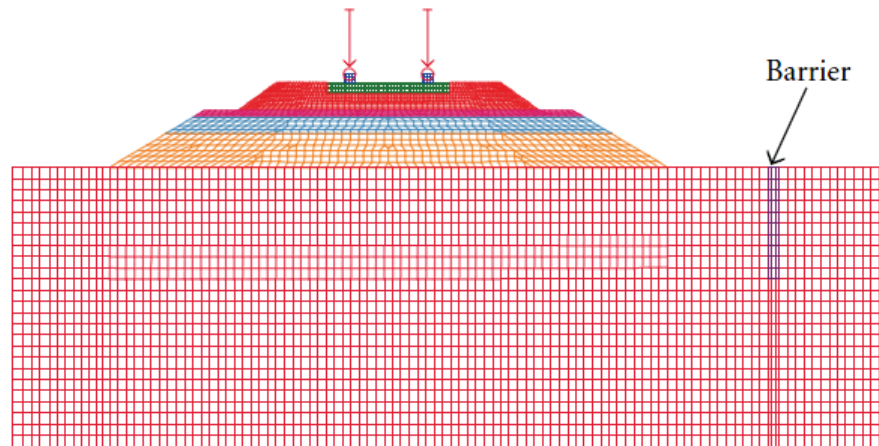


Рисунок 1.7. Вертикальный барьер от вибраций железнодорожного транспорта [24].

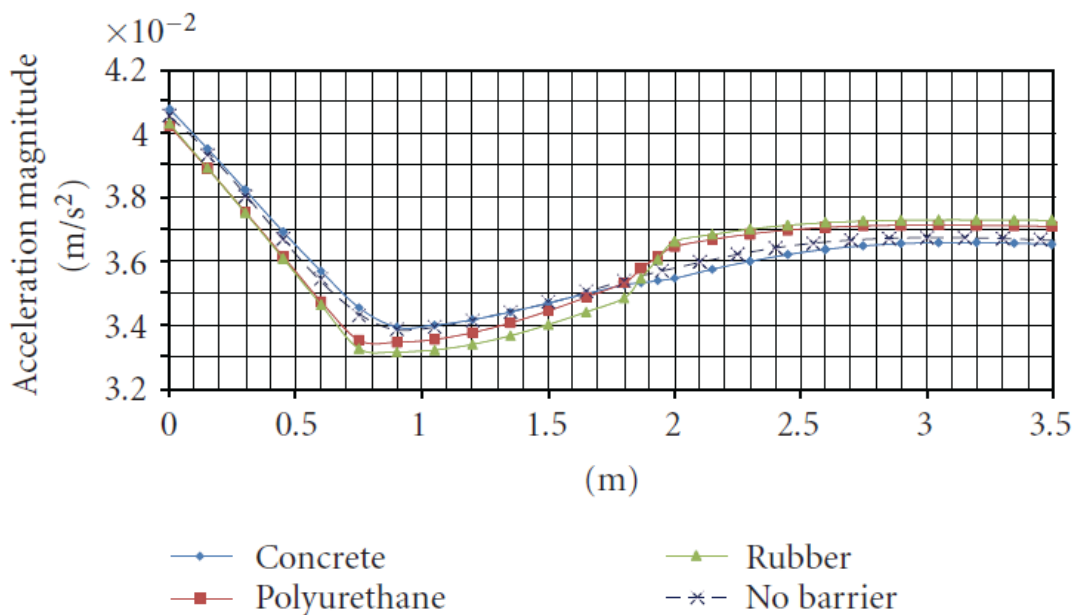


Рисунок 1.8. Графики амплитуд ускорений в точках наблюдения, расположенных за барьером, в различных расчётных ситуациях (наличие/отсутствие барьера и заполнение барьера разными материалами) [24]

В работах [21] [56] предлагалось использовать вертикальные барьеры конечной длины для защиты от акустических волн в грунте, вызванных взрывом. Барьеры в данных исследованиях были заполнены акустически более мягким материалом, чем окружающий грунт. Были рассмотрены как плоские, так и

пространственные модели прямолинейных вертикальных барьеров (см. Рис. 1.9). Посредством численных расчётов было определено, что вертикальные барьеры глубиной до 5 м способны уменьшить амплитуду перемещений в защищаемой зоне за барьером приблизительно в 1.5 раза.

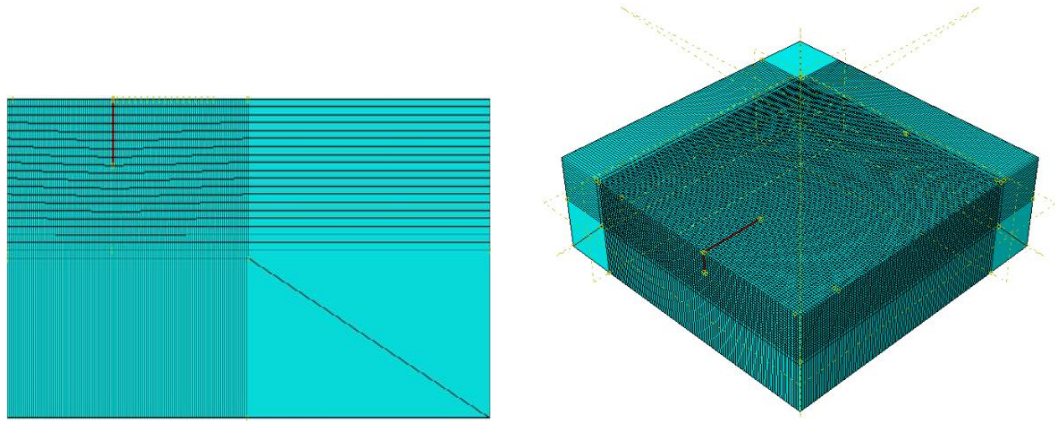


Рисунок 1.9. Плоская и пространственная модели вертикальных барьеров для защиты от акустических волн в грунте, вызванных взрывом [21].

В итоге этой работы, стало известно, что вертикальные барьеры глубины до 5 м, способны уменьшить амплитуды перемещений приблизительно в 1.5 раза в защищаемой зоне.

В ряде других исследований [16, 29, 30, 61] с помощью аналогичной методики были смоделированы вертикальные барьеры для защиты от вибрационных и сейсмических воздействий. В данных работах рассматривались плоские модели, что, безусловно, ограничивало возможности исследования диффракционных эффектов. Отдельно следует остановиться на работе [16], где, помимо результатов расчетов, приведены результаты натурного эксперимента по применению барьера, заполненного полиуретаном GeoFoam, для защиты от вибрационных воздействий частотой 40-50 Гц.

- Свайные барьеры

Свайные барьеры для защиты территории обычно устраиваются в виде свайного поля (см., например, Рис. 1.10). Основная идея такого решения

заключается в том, что при падении на барьер рэлеевских волн каждая свая выступает источником рассеивания энергии сейсмических волн.

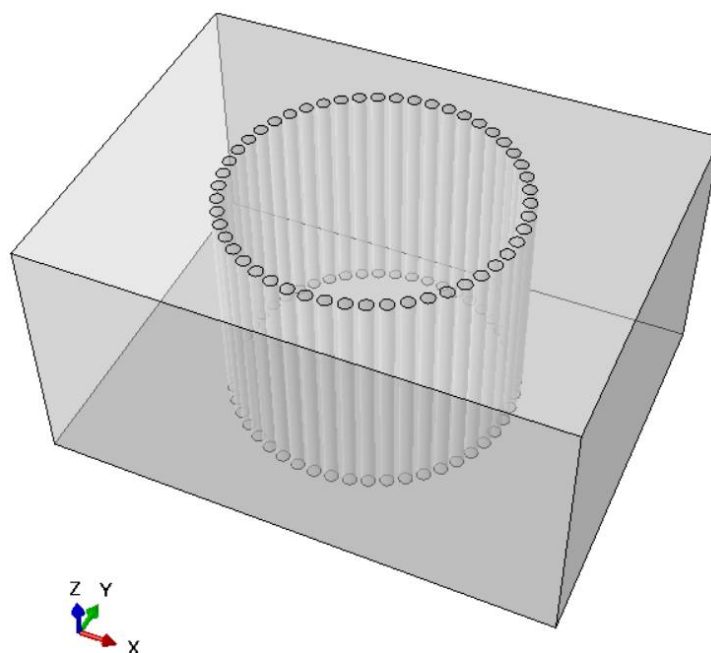


Рисунок 1.10. Свайные барьеры в виде свайного поля [8].

Впервые в работе [119] были рассмотрены взаимодействие свайных барьеров с поверхностными волнами Рэля. В результате данного исследования было доказано, что энергии сейсмических волн рассеиваются на свайном поле.

### 1.3. Примеры применения сейсмических барьеров на практике

Примерами применения на практике сейсмических барьеров могут служить:

- Кафедральный собор в г. Верный (Казахстан), построенный в 1907 году российским архитектором Зенковым А.П.,
- Мост Васко Да Гама в Португалии, построенный в 1995-1998 гг. по проекту французского инженера Мишеля Вирложо.
- Мост Рион-Андирион в Южной Греции, построенный в 1997-2004 гг. французским инженером Аленом Пекером.

Вознесенский кафедральный собор. А. П. Зенков предлагал использовать для сейсмозащиты кольцевую подземную галерею, которая должна была отражать приходящие на здания сейсмические волны. Этот метод он реализовал в



фундаменте Вознесенского кафедрального собора в г. Верный (Казахстан), по всему периметру отделив фундамент от прилегающего грунта бревенчатой клетью (см. Рис. 1.11).



Рисунок 1.11. Кафедральный собор г. Верный. 1907 г. Северный фасад [6].

Дом самого Зенкова был окружен канавой, которая оказалась довольно эффективным защитным сооружением – при землетрясении 1911 года дом колебался гораздо меньше, чем другие городские строения. Во время этого землетрясения вблизи собора в земле возникла внушительная трещина, в которую мог бы опуститься человек. Ось трещины проходила непосредственно через храма, однако само здание трещина обогнула, что, возможно, свидетельствует об эффективности предложенного Зенковым метода. (Напоминаем, что в результате исследований взаимодействия акустических волн с пустыми траншеями было обнаружено, что при падении объемных волн наблюдается их отражение от стенок траншеи (Рис. 1.12.), а при падении поверхностных волн – обтекание ими траншеи (Рис. 1.13.).

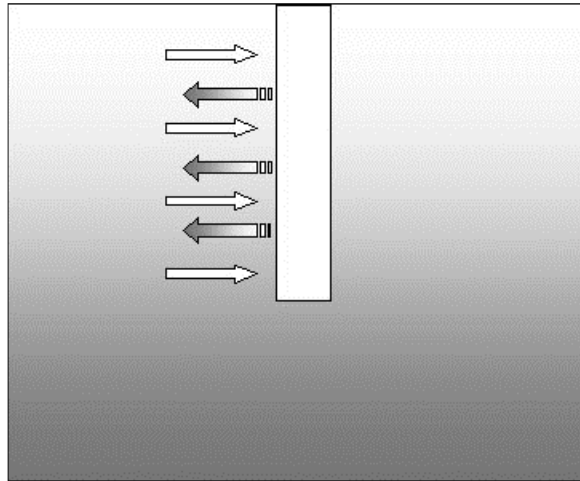


Рисунок 1.12. Отражение от свободной поверхности объемных волн пустой траншеи [59].

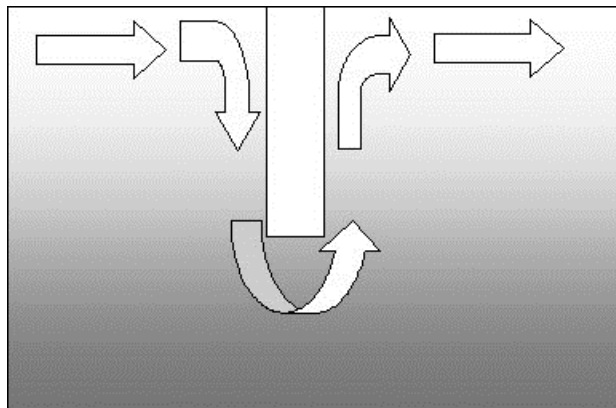


Рисунок 1.13. Обтекание волной Рэлея пустой траншеи [59].

Мост Васко Да Гама. Впервые идея устройства свайных барьеров нашла свое применение при проектировании моста Васко Да Гама в районе Португалии с высокой сейсмичностью. Строительство моста началось в сентябре 1994 г. и закончилось в декабре 1997 г. На подготовку к строительным работам ушло 18 месяцев, и столько же ушло на возведение моста. Мост Васко Да Гама – шедевр мировой архитектуры конца XX века, гигантская железобетонная конструкция протяженностью 17.2 км и шириной 30 метров, состоит из вантового моста, виадука и подъездных дорог (см. Рис. 1.14).

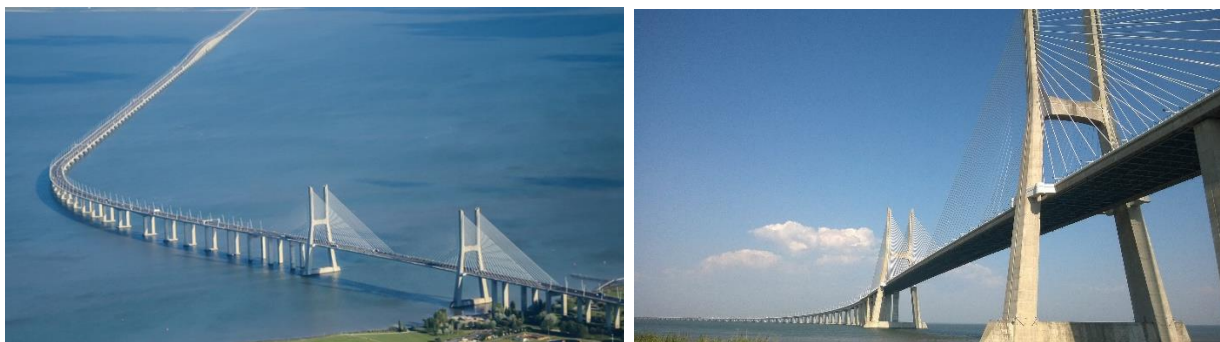


Рисунок 1.14. Мост Васко Да Гама. Общий вид [2].

Автором проекта является французский инженер Мишель Вирложе, который в проекте учёл различные нюансы строительства, включая климатические условия, сейсмическую активность Португалии и даже кривизну земного шара, чтобы избежать разницу в высотных отметках на разных концах моста, которая могла бы достигать 80 см.

Сооружение опирается на железобетонные сваи диаметром более 2 метров, погруженные в дно на глубину до 95 метров. Это позволяет конструкции выдерживать большие нагрузки и будет способствовать её целостности в случае землетрясения. Со стороны Лиссабона у моста имеется секция с вверной вантовой конструкцией, опирающаяся на два Н-образных пилона высотой 155 метров. Высота основного пролёта моста над водой составляет 47 метров, что позволяет беспрепятственно проходить под ним океанским судам.

Конструкция моста способна выдержать порывы ветра скоростью до 250 км/ч. Мост устойчив к землетрясению силой в 4.5 раза большей, чем то, что разрушило Лиссабон в 1755 году (магнитудой 8.7 по шкале Рихтера). Минимальный срок эксплуатации сооружения составляет 120 лет.

Мост Рион-Андирион Данный мост соединяет два города Греции, находящихся на разных берегах Коринфского залива: Рион и Андирион (см. Рис. 1.15.). Сам залив достаточно широкий и имеет максимальную глубину 65 метров.



Рисунок 1.15. Мост Рион-Андирион. Общий вид [55].

С момента, когда в 1880 году премьер-министр Греции Харилас Трикоупис выдвинул идею сооружения подобного моста, прошло более 100 лет, прежде чем реализация столь масштабного проекта стала возможной. Официальной датой начала проекта можно считать 24 декабря 1997 г. После этого был 7-летний период строительства, который включал в себя:

- 2-летний предварительный период (1998-1999 гг.), в течение которого велась разработка заключительного проекта моста и проводилась подготовка строительной площадки.
- 5-летний период (2000-2004 гг.) фактического строительства моста.

Мост Рион-Андирион на сегодняшний день является самым длинным вантовым мостом в Европе. Его длина составляет 2883 метра, из них 2252 метра – это пролёты над водой. На этапе проектирования рассматривались различные конструктивные схемы моста, в итоге был выбран вантовый вариант с виадуком, опирающимся на 4 пилона (см. Рис. 1.16).

Греции и остальной Европой, этот мост стал самым длинным на сегодняшний день вантовым мостом. Он составляет 2883 метра, из них 2252 метра – пролёты над водой. Рассматривались разные варианты проекта моста, в итоге был выбран вантовый вариант с виадуком, опирающимся на 4 пилона, см. на рисунок 1.16.

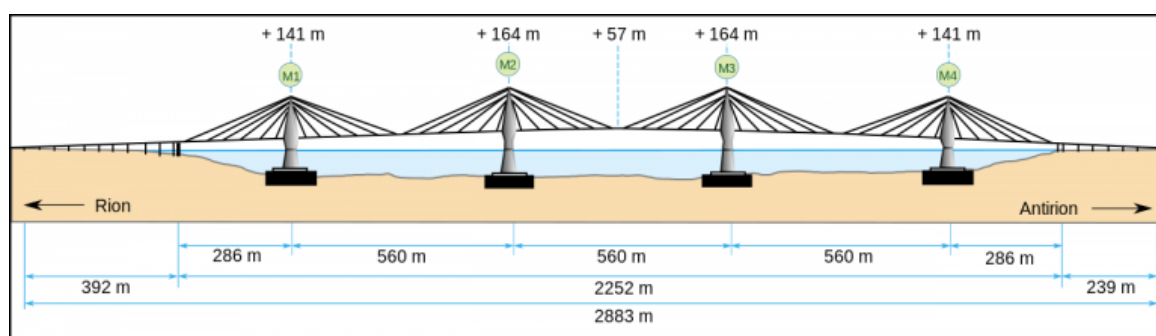


Рисунок 1.16. Схема вантового моста Рион-Андирион [55].

Афинская область – зона сейсмической активности в Греции. Сложная сейсмическая ситуация в этом районе, относительно большая глубина Коринфского залива и низкие прочностные характеристики грунтов основания были большой проблемой при проектировании этого моста. Скальное основание было обнаружено лишь на глубине около 800 м от дна залива (см. Рис. 1.17).

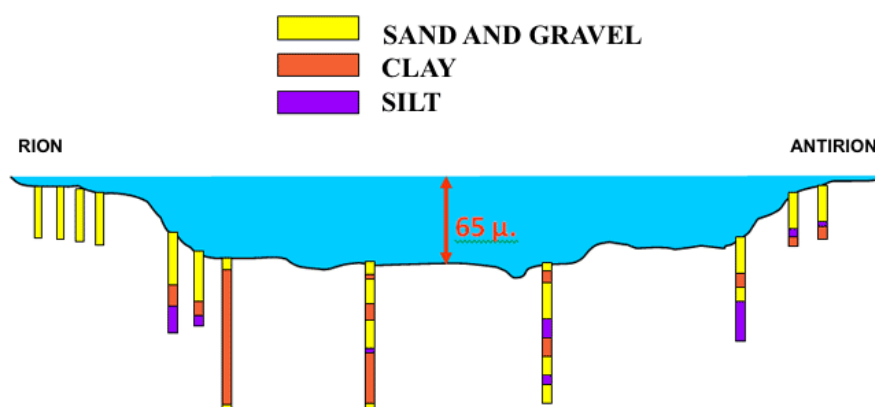


Рисунок 1.17. Распределение глубины Коринфского залива и геологический разрез в створе моста Рион-Андирион [55]

Опоры моста у основания имеют диаметр 90 метров. Отдельные элементы моста могут сдвигаться друг относительно друга для компенсации движения полуострова Пелопоннес относительно материковой Греции. Одной из наиболее инновационных конструктивных особенностей моста является 2252-метровая подвесная палуба, которая в случае землетрясения может раскачиваться, как маятник. Четыре демфирующих устройства, соединенных с палубой и вершиной каждого пилона, обеспечивают неподвижность палубы в процессе нормальной эксплуатации (см. Рис. 1.18).

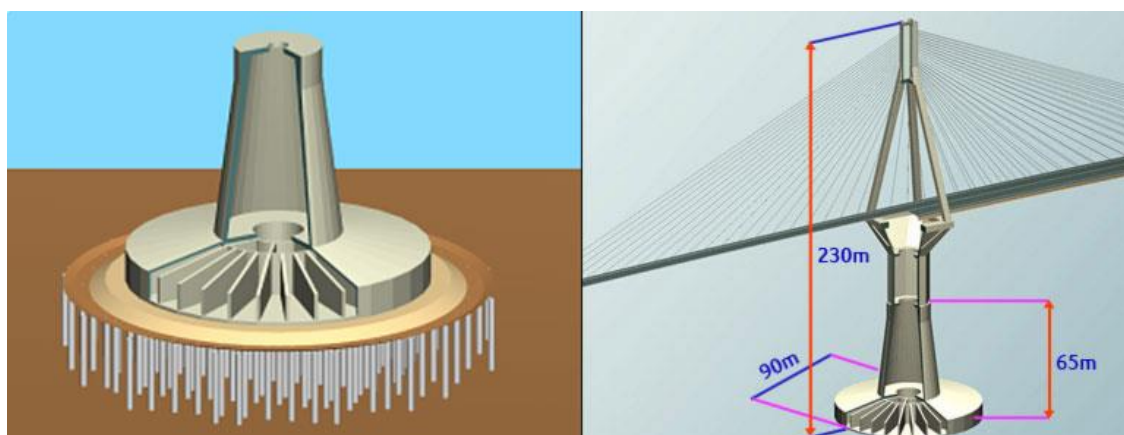


Рисунок 1.18. Общий вид пилона вантового моста Рион-Антирион [55].

При устройстве фундаментов пилонов использовались металлические свай-оболочки диаметром 2 м и длиной 30 м, которые, помимо своей основной несущей функции, были ещё призваны укрепить слабый грунт основания, что весьма актуально при землетрясениях. Для установки свай была спроектирована специальная плавучая платформа на основе баржи, проектное положение которой обеспечивали 4 якоря весом по 680 тонн каждый, которые были погружены на глубину 60 метров. Для обеспечения строго горизонтального положения оснований пилонов на свайное поле укладывали гравийную подушку высотой 3 метра. Данные гидролокаторов подтвердили горизонтальность опорных площадок пилонов с точностью до 5 см.

#### 1.4. Другие территориальные методы для сейсмической защиты

С обзором территориальных методов сейсмической защиты можно ознакомиться в работе [118].

Похожее на барьеры решение предложено в работе [36], где для сейсмозащиты используются массивы из специальных пустотелых коробов, выступающих в роли антирезонаторов (см. Рис. 1.19). Авторы называют такие массивы метабарьерами. Результаты проведённого в этой работе КЭ-моделирования взаимодействия сейсмических волн с такими метабарьерами



отчётливо демонстрируют образование области «волновой тени» за метабарьером (см. Рис. 1.20).

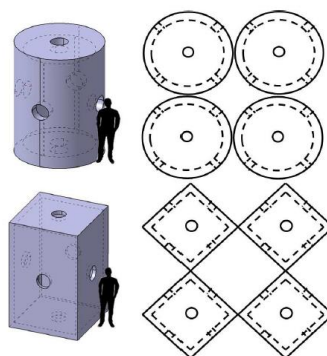


Рисунок 1.19. . Вид коробов, составляющих метабарьер [36].

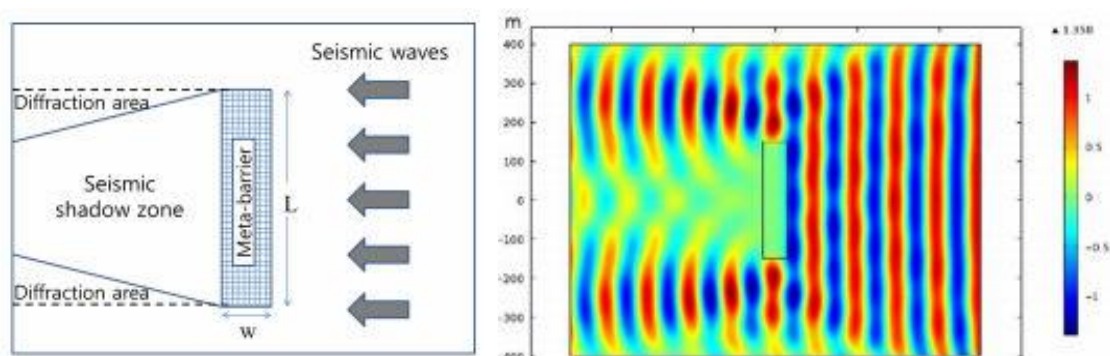


Рисунок 1.20. Расчетная схема и результаты КЭ моделирования взаимодействия сейсмических волн с метабарьером [36].

К методам территориальной сейсмической защиты относится концепция «шероховатой» поверхности полупространства, которую можно реализовать на практике в виде периодической системы траншей и гребней (см. Рис. 1.21). В работах [44, 60, 62, 69] показано, что волны Рэлея затухают при распространении вдоль «шероховатой» поверхности полупространства при условии, что период волн и период поверхностных несовершенств согласованы.

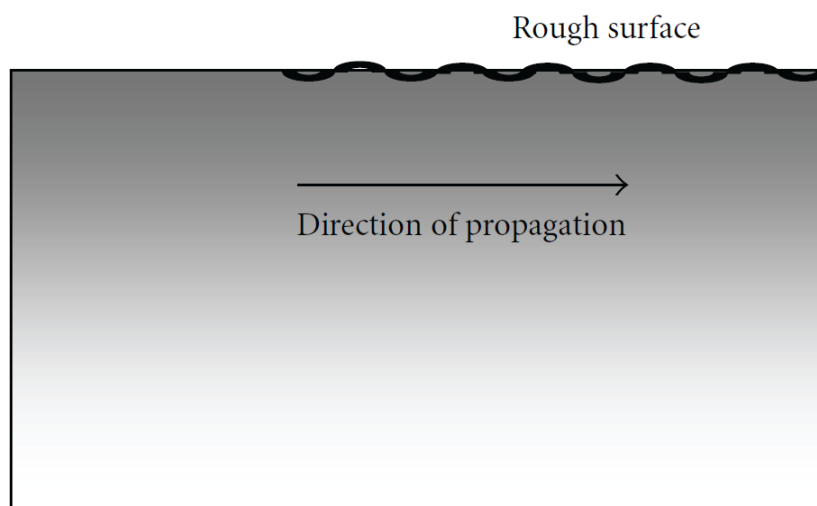


Рисунок 1.21. «Шероховатая» поверхность полупространства, используемая для защиты от волн Рэлея [69].

В теоретических результатах этих исследований было показано, что волны Рэлея затухают при распространении вдоль грубой поверхности, при условии согласованности периода гармонических волн и периода поверхностных несовершенств.

Еще одним способом территориальной защиты от землетрясений является устройство системы скважин, единственное требование к которой для обеспечения её эффективности – это расположение скважин в строгом соответствии с узлами заранее рассчитанной двухмерной решётки. В соответствии с идеей советского физика Виктора Веселаго, занимающегося вопросами электродинамики веществ [5], колебания определённой частоты не могут распространяться в такой «кристаллической решётке» из скважин (см. Рис. 1.22).



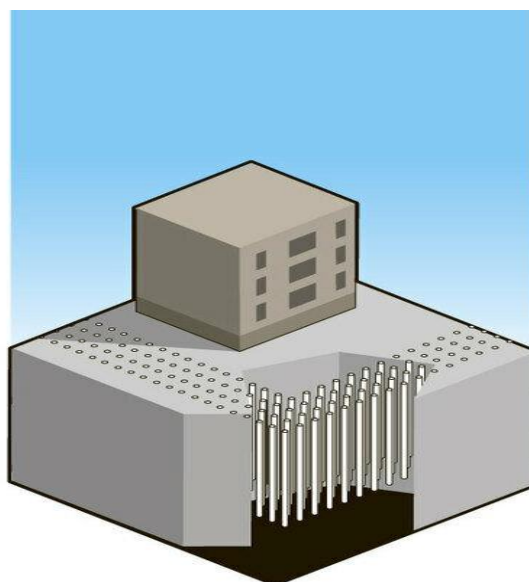


Рисунок 1.22. Система скважин, имитирующая плоскую линзу Веселаго-Пендри [7].

Работоспособность таких систем была проверена в реальном эксперименте. В 2012 году недалеко от Лиона французские ученые испытали подобную систему сейсмозащиты, которая состояла из 24 скважин диаметром 32 см и глубиной 5 м. В качестве источника колебаний выступал промышленный вибратор. Вибродатчики показывали существенное снижение энергии колебаний в области за «акустической решёткой». Система эффективно работала как при высоких, так и при низких частотах колебаний. Главной проблемой с «методом скважин» является то, что среда, в которой распространяются сейсмические волны, всегда неоднородна; нужно учитывать это обстоятельство и рассчитывать эффективную структуру системы индивидуально для каждого случая.

Ещё один метод территориальной сейсмозащиты – метод масс-резонаторов. В грунт вокруг защищаемой территории погружается множество тяжёлых «точечных» элементов, соединенных друг с другом пружинами. Одиночный элемент такой системы выступает в роли механического маятника, а вся система становится антисейсмическим метаматериалом, способным задерживать волны определенной частоты. Настроенные на определенную частоту сейсмических колебаний массы-резонаторы во время прохождения волны колеблются в противофазе, рассеивая её энергию. Практическая реализация метода может быть

различной. Например, в качестве отдельных элементов системы могут быть использованы стальные шары диаметром около метра или цилиндрические композитные конструкции из бетона, резины и стали (см. Рис. 1.23).

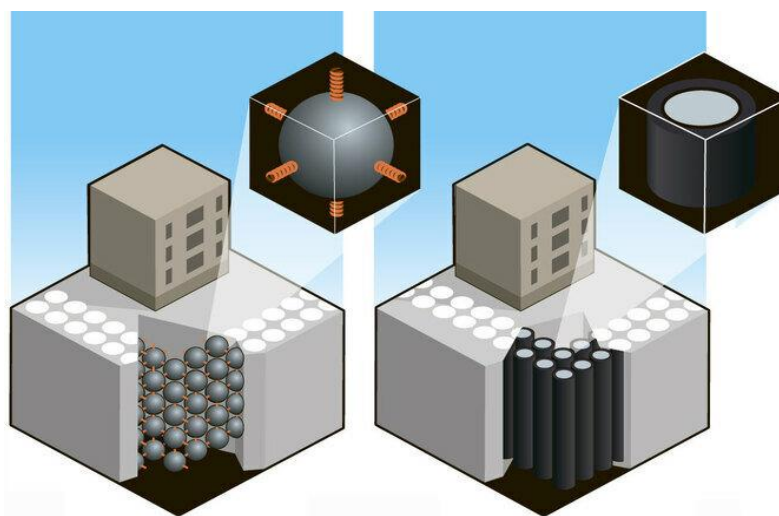


Рисунок 1.23. Различные варианты реализации метода масс-резонаторов [7].

Не менее интересный способ, имеющий физическую природу, основан на использовании ауксетиков. Необычное свойство этих материалов – при растяжении вдоль одной оси они также расширяются и в перпендикулярном направлении. В природе такие материалы встречаются очень редко. Но их можно создать, используя, например, стальные «конструкции-бабочки», которые состоят из метрового профиля с размахом около 10 м. Расчеты показывают, что система закопанных под фундамент стальных «бабочек» позволяет в разы ослаблять действие сейсмических волн на здание.

Ученые из Имперского колледжа Лондона и университета Марсея сравнительно недавно опубликовали свое исследование по поверхностным сейсмическим волнам, в котором говорится о том, что довольно эффективным антисейсмическим метаматериалом может быть обычная лесопосадка. Было продемонстрировано, что стволы деревьев выступают в роли антенн, которые создают запрещенную зону для поверхностных колебаний определенной частоты (см. Рис. 1.24).

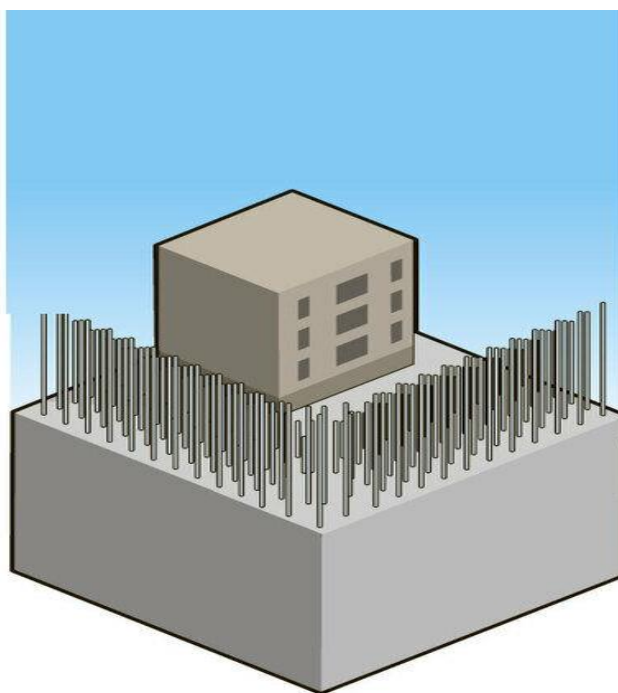


Рисунок 1.24. Лесопосадка как сейсмический «металес» [7].

Для этого достаточно расположить деревья так, чтобы их высота плавно изменялась от наружной границы лесопосадки к границе защищаемой территории. В этом случае приходящие поверхностные сейсмические волны могут отразиться от лесопосадки вглубь земли. Данный метод пока был протестирован лишь в паре экспериментов, но сама по себе идея «зелёной» сейсмозащиты выгодно выглядит с точки зрения экологии.

Казанцев М.М., кандидат геолого-минералогических наук, для защиты города Алматы от землетрясений предлагал метод «искусственного землетрясения» [9]. В своём исследовании он обосновал, что сильнейшие землетрясения можно значительно ослабить или даже предотвратить. Для этого в сейсмических зонах необходимо пробурить глубокие скважины и произвести в них подземные взрывы. От таких взрывов территория Алматы испытает тектонические колебания небольшой силы (3-4 балла); при этом произойдёт уменьшение магнитуды будущих землетрясений и удастся предотвратить катастрофическое разрушение города. По словам автора, данный проект актуален, потому что в нем впервые предпринимается попытка предупреждения сильного землетрясения в Алматы.

## 1.5. Выводы по главе 1

Завершая работу над обзором и анализом территориальных методов сейсмозащиты, ещё раз подчеркнём, что рассмотренные методы сейсмозащиты на основе сейсмических барьеров различного вида необходимы, когда требуется защита фундаментных конструкций зданий и сооружений от возможного разрушения. Сейсмические барьеры могут применяться совместно с другими традиционными методами сейсмозащиты. Это особенно актуально в тех случаях, когда для применения сейсмоизолирующих устройств необходимо снизить балльность площадки строительства.

Описанные выше проблемы строительства в сейсмоопасных районах и последствия разрушительных землетрясений прошлого позволяют считать исследования по сейсмическим барьерам всех основных типов значимыми и актуальными. Разработка и усовершенствование территориальных методов сейсмической защиты будет способствовать развитию сейсмоустойчивого строительства во всем мире.

## **Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БАРЬЕРА С СЕЙСМИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ**

Для исследования взаимодействия свайных сейсмических барьеров с сейсмическими волнами в настоящей главе приводятся теоретические основы характеристик и параметров распространения как объемных так и поверхностных волн. Это важно для более полного понимания природы сейсмических волн.

В исследовании основное внимание уделяется изучению взаимодействия свайных барьеров с рэлеевскими волнами. В главе представлена концептуальная модель свайных сейсмических барьеров и его особенности при взаимодействии с поверхностными волнами.

Также в главе рассматриваются основные уравнения, используемые при описании среды, в которой распространяются сейсмические волны, и уравнения, применяемые для описания внешнего сейсмического воздействия.

### **2.1. Объемные сейсмические волны**

Сейсмические волны могут являться примером волн, возникающих в упругом твердом теле в ограниченной области пространства и распространяющихся на большие расстояния под поверхностью Земли.

Объемные волны делятся на продольные «Р-волны» и поперечные «S-волны». На рисунке 2.1 представлена схема распространения Р и S волны.

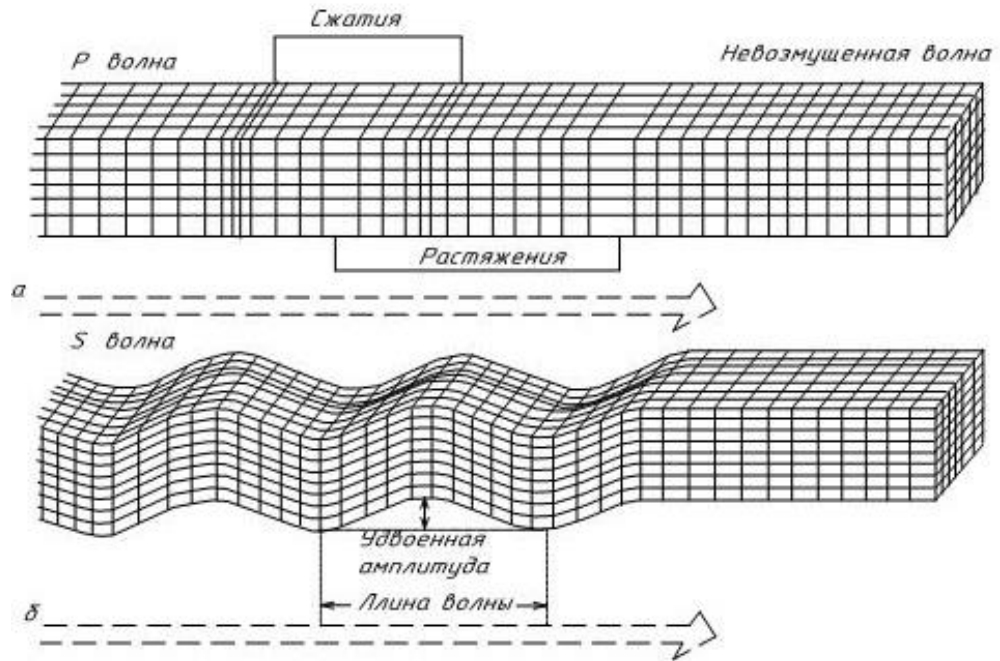


Рисунок 2.1. Схема распространения Р и S волны [136].

Р-волны создают в среде объемные деформации сжатия-растяжения, т.к. при воздействии этих волн элементарные частицы упругой среды направляются вдоль распространения действующих волн. А S-волны создают деформации сдвига, при воздействии которых элементарные частицы упругой среды колеблются в направлении, перпендикулярное направлению распространения волны.

Скорость продольных волн примерно в 1.7 раз больше скорости поперечных волн. На сейсмографе впервые регистрируется Р-волна (первичная - primary), а затем S-волна (вторичная - secondary).

Скорости объемных волн меняются с глубиной в зависимости от структуры Земли. Скорости объемных волн возрастают при переходе от коры к мантии, а при переходе от мантии к ядру убивается, в связи с наличием жидкого внешнего слоя. Далее в ядро происходит возрастание скорости Р-волн из-за нарастания давления. А поперечные S-волны не могут распространяться во внешней жидкой части ядра. На рисунке 2.2. показана глубинная зависимость скорости объемных волн. Показанная модель Земли, разбитой на три области является классической моделью Джеффиса-Гутенберга.

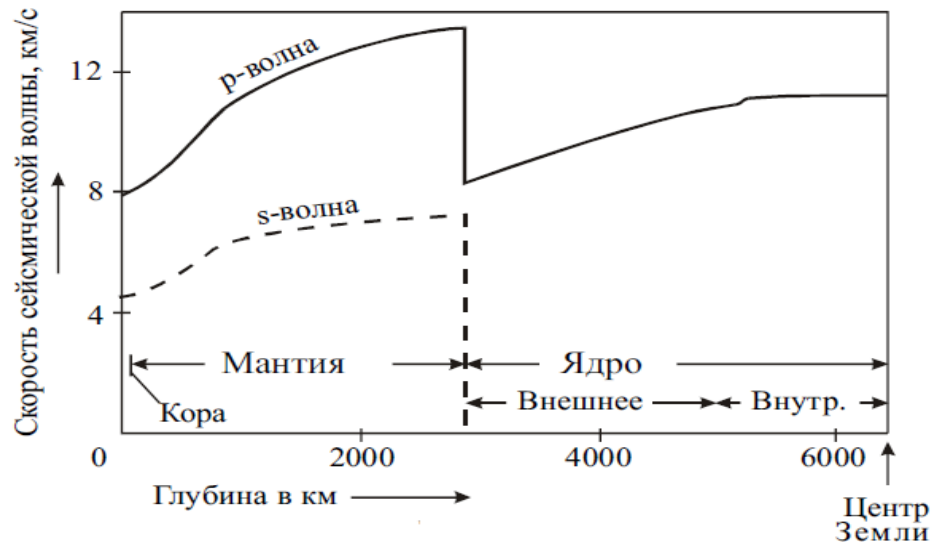


Рисунок. 2.2. Скорости продольных и поперечных волн в Земле [134].

В зависимости от пройденного расстояния волн от источника, амплитуда объемных волн уменьшается. Это может быть из следующих причин [134]:

- геометрическое расхождение от эпицентра. Убывание происходит обратно пропорционально пройденной пути.
- переход части энергии волны в тепло вследствие неоднородности Земли.

Уменьшение амплитуды волн также характеризуется коэффициентом затухания. Коэффициент затухания  $\alpha$  пропорционален частоте распространения волны, следовательно короткие волны затухают быстрее длинных. Коэффициенты затухания для продольных и поперечных волн могут быть записаны в виде соотношения [134]:

$$\begin{aligned} \alpha_s \text{ (км}^{-1}\text{)} &\sim 1 \cdot 10^{-3} \nu \text{ (Гц)} \\ \alpha_p \text{ (км}^{-1}\text{)} &\sim 0,25 \cdot 10^{-3} \nu \text{ (Гц)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

«Частоты волн лежат в инфразвуковом диапазоне  $0,1 \text{ Гц} < \nu < 10 \text{ Гц}$ , что для для волн с частотой  $\sim 1 \text{ Гц}$ , уменьшение амплитуды происходит в  $e$  раз на пути 1000 км у S-волны, а у P-волны - на пути 4000 км».

## 2.2. Поверхностные сейсмические волны

Помимо объёмных волн, по Земле распространяются и поверхностные волны, которые бывают двух главных типов:

- Волны Рэлея. В 1885 году Дж. Рэлей обнаружил этот тип волн. В волне Рэлея частицы грунта двигаются по эллиптической траектории в вертикальной плоскости вдоль направления распространения волн, см. на рисунок 2.3.

Волны Рэлея локализованы при поверхностном слое, а вертикальные компоненты у них примерно в  $\sim 1.4$  раза больше горизонтальных. Амплитуды колебания у этих волн экспоненциально и быстро затухают с глубиной. Из-за своей низкой частоты, времени действия и высокой амплитуды поверхностные волны являются одними из самых разрушительных из всех типов сейсмических волн, приходящих на земную поверхность. Рэлеевские волны, как правило, сопровождают короткофокусные землетрясения [3, 132].

Скорость рэлеевской волны может определяться по приближенной формуле Бергманна-Викторова [131]:

$$C_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} C_S \quad (2.2)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $C_S$  – скорость S-волн.

По приближенной формуле (2.2), при любом значении коэффициента Пуассона, скорость рэлеевской волны меньше скорости поперечной волны.

Волны Рэлея возникают на определенном расстоянии от эпицентра. Соответствующая формула для этого расстояния имеет следующий вид [131]:

$$r = \frac{C_R H}{\sqrt{C_S^2 - C_R^2}} \quad (2.3)$$

где  $r$  – расстояние от эпицентра до точки зарождения волн,  $H$  – глубина очага.

Если значения коэффициента Пуассона лежат в диапазоне  $\nu \in (0,2 ; 0,4)$ , то:

$$r \approx (2,1 \div 2,3)H \quad (2.4)$$



Таким образом, при выполнении условия (2.4), пришедшие на поверхность волны представляют собой рэлеевские волны.

- Волны Лява. Теоретически предсказаны Лявом в 1911 году. В волне Лява частицы грунта смещаются в горизонтальной плоскости поперек распространения волны, см. на рисунок 2.3.

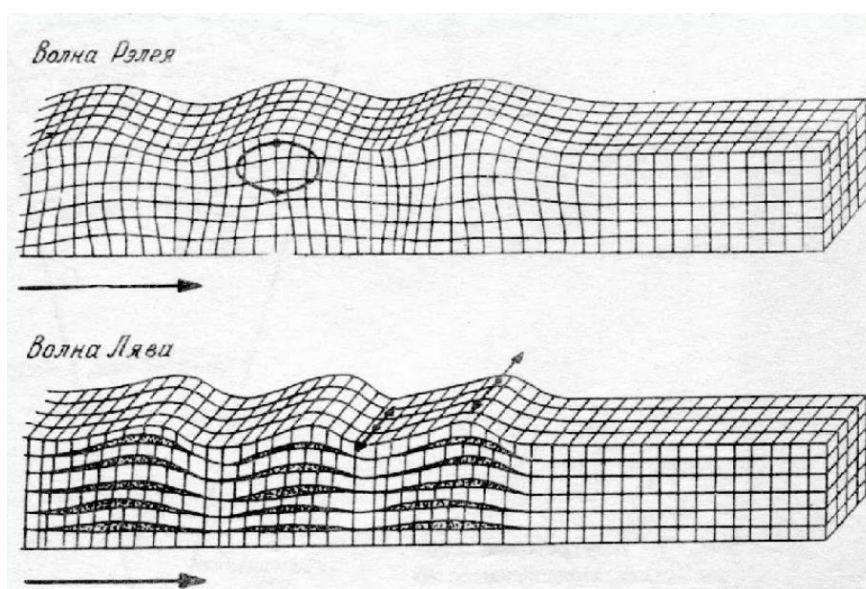


Рисунок 2.3. Схема распространения поверхностных волн Рэля и Лява [136].

Длина поверхностных волн Лява находится в промежутке от десятков до сотен километров. Затухание поверхностных волн происходит гораздо медленнее, чем у объемных волн. Именно из этого волны Лява могут обогнуть земной шар, даже и несколько раз. Скорость этих волн зависит от частоты.

В [80] дано Лявом условие существования этих волн в виде ограничения на скорости поперечных объемных волн в слое и полупространстве.

$$c_s^{\text{полупр}} > c_s^{\text{слой}} \quad (2.5)$$

Причем, если условие (2.5) не выполняется, волны Лява не существуют.

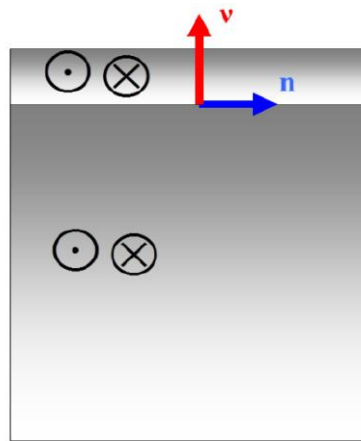


Рисунок 2.4. Поляризация волн Лява; вектор  $n$  указывает направление распространения,  $v$  – нормаль к общей границе полупространства [131].

В редких случаях, по данным сейсмологических наблюдений, возникают волны Лява с разрушительными последствиями [131]. Помимо условия (2.5), наличие вертикального разлома и сдвиговых компонент взаимных перемещений тектонических плит приводит к возникновению волны Лява, см. на рисунок 2.5.

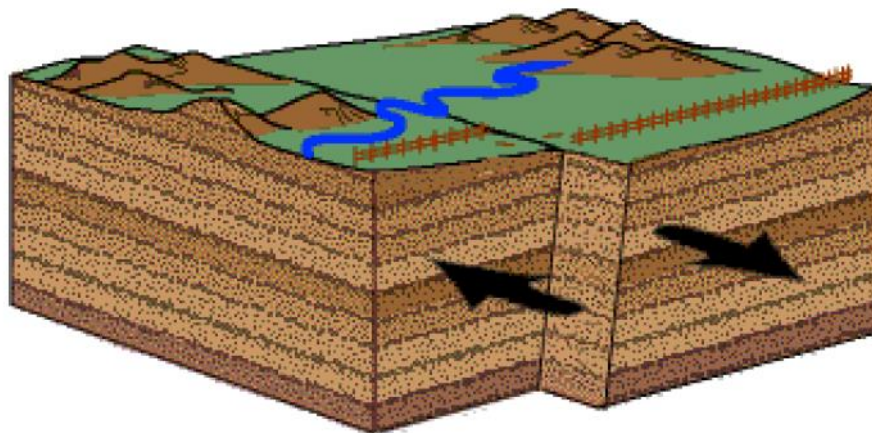


Рисунок 2.5. Механизм «strike fault»; условие возникновения волн Лява.

([geomaps.wr.usgs.gov](http://geomaps.wr.usgs.gov))

В [131] была показана карта тектонических разломов, в которой взаимное перемещение тектонических плит для волны Лява наблюдается в районе San-Andreas, на границе между Северо-Американской и Тихоокеанской тектоническими платформами, см. на рисунок 2.6.

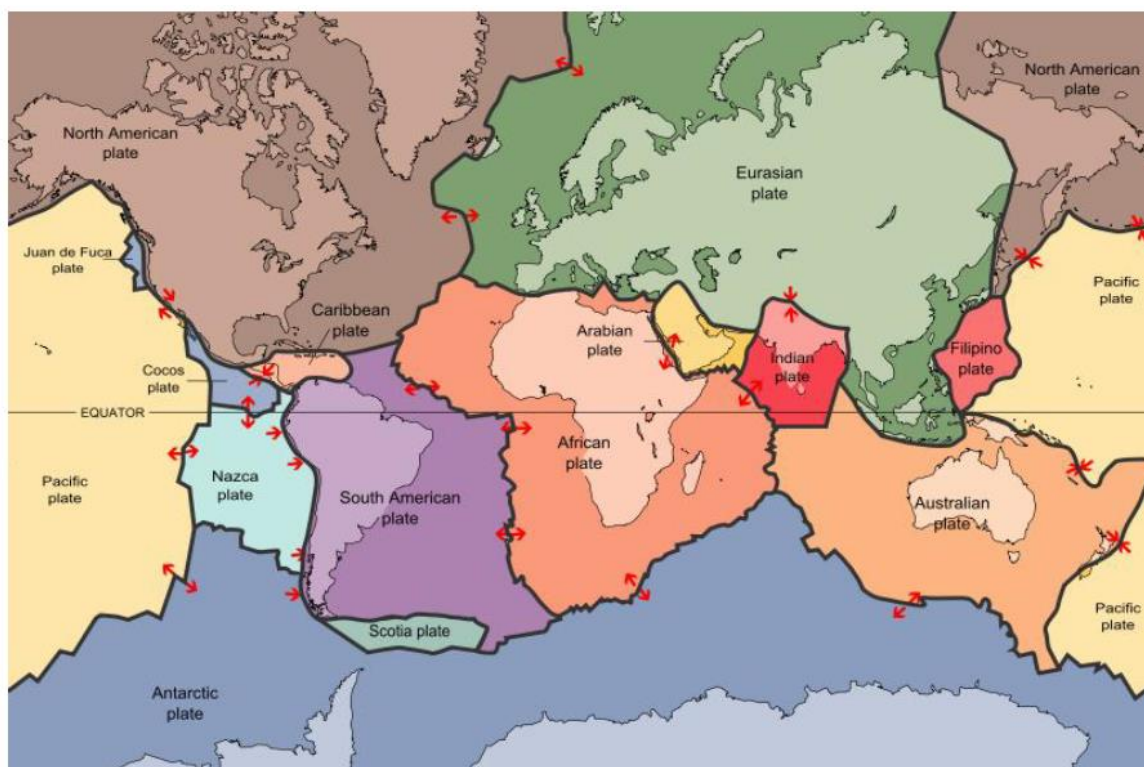


Рисунок. 2.6. Карта тектонических разломов; стрелками отмечены направления движения тектонических плит [131].

### 2.3. Концепция свайных сейсмических барьеров

Тематика настоящей работы связана с разработкой метода сейсмической защиты с использованием именно свайного барьера. В работе рассматривается комплекс вопросов, связанных с изучением взаимодействия барьеров с поверхностными волнами Рэлея.

По экспериментальным исследованиям пустых траншей [59] стало известно, что рэлеевские волны могут огибать пустые траншеи. Поэтому, для эффективной защиты от волн Рэлея, свайные барьеры должны быть сплошными, либо заполненными материалом.

Для изучения взаимодействия свайных барьеров с рэлеевскими волнами предлагается такая концепция, в которой свайные барьеры в виде свайного поля окружают территорию, чтобы сейсмические волны не смогли проникнуть во внутрь защищаемой территории, см. на рисунок 2.7.

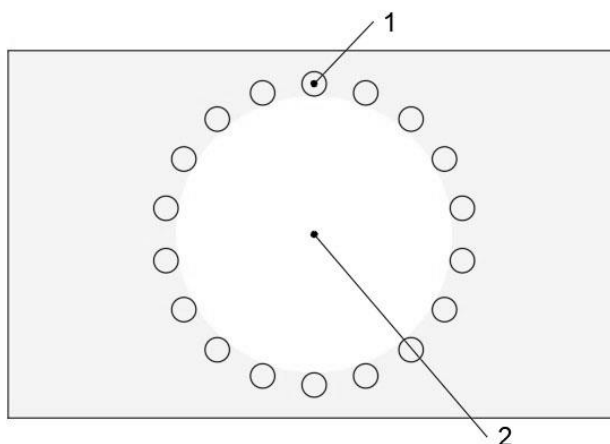


Рисунок 2.7. Свайные барьеры в виде свайного поля; 1 – круговой барьер, 2 – защищаемая территория

Пространственная модель данной концепции представлена на рисунке 2.8.

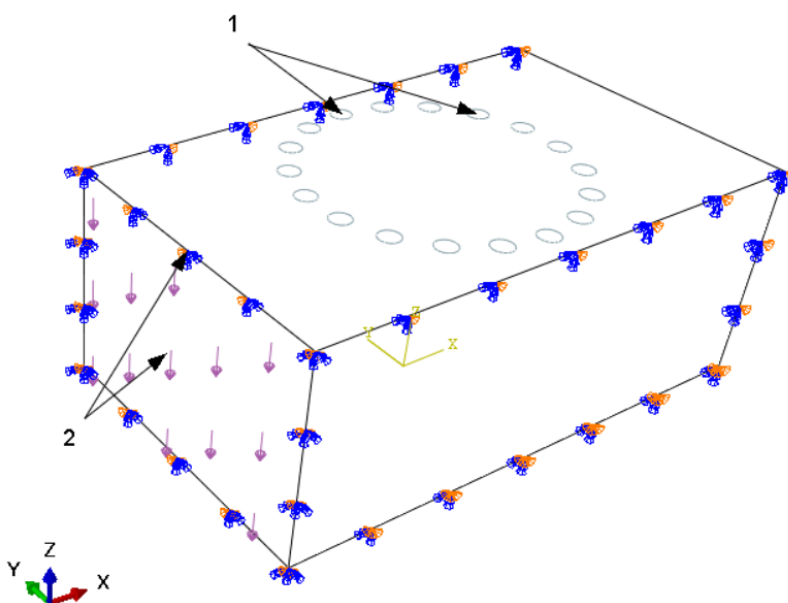


Рисунок 2.8. Пространственная концептуальная модель свайного поля; 1- сваи, 2 – нагрузка, генерирующая волны.

В настоящей работе на основании разных пространственных моделях свайного поля даются сравнительные анализы барьеров с различными физико-механическими и геометрическими параметрами, на основании которых приводится оценка их эффективности.

В свайном поле сваи могут быть из разного материала, как металл, дерево и железобетон.

В работе для решения задач сравнительных анализов и оценки эффективности свайных барьеров рассматриваются забивные железобетонные сваи, разновидности которых представлены на рисунок 2.9.



Рисунок 2.9. Разновидности железобетонных свай.

(<https://www.beststroy.biz/ru/vidy-svaj>)

В следующей главе, во всех сравнительных задачах материал барьера должен иметь большую плотность чем грунт.

#### 2.4. Основные уравнения при описании модельной среды

В исследовании, опираясь на работы [1, 14, 20, 26, 37, 51, 64, 130], будем моделировать среду, учитывая нижеследующие факторы.

Уравнение движения взаимодействия вертикального сейсмического барьера с поверхностными волнами Рэлея в изотропной упругой плоскости может быть записано в виде:

$$c_p^2 \nabla \operatorname{div} \mathbf{u} - c_s^2 \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{u} + p(t) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \mathbf{v} = \ddot{\mathbf{u}} \quad (2.6)$$

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:

$$\mathbf{t}_\nu \equiv (\lambda \operatorname{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})\mathbf{I} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon}) \cdot \mathbf{v} = 0, \mathbf{x}' \in \Pi_\nu \quad (2.7)$$

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

Уравнения (2.6) и (2.7) дополнены начальными условиями:  $\mathbf{u}(\mathbf{x},t)|_{t=0} = 0$ ;  $\partial_t \mathbf{u}(\mathbf{x},t)|_{t=0} = 0$ .

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

$$\mathbf{E} = 120 \text{ МПа}; \nu = 0,25; \rho = 1400 \text{ кг/м}^3 \quad (2.8)$$

где  $\mathbf{E}$  - модуль Юнга;  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $\rho$  - плотность среды;

При (2.8) выполняется условие Пуассона  $\lambda = \mu$ , а скорости соответствующих волн вычисляются по формулам:

$$C_p = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}}; C_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}; C_R = \frac{0,84 + 1,22\nu}{1 + \nu} C_s \quad (2.9)$$

## 2.5. Внешнее воздействие при сейсмических нагрузках

В качестве внешнего воздействия в настоящем разделе рассматривается вертикальная сосредоточенная сила, изменяющаяся во времени по треугольному закону [135]:

$$p(t) = p_0 \times \begin{cases} \frac{t}{T}, & 0 < t < T \\ \frac{(2T - t)}{T}, & T < t < 2T \end{cases} \quad (2.10)$$

где  $p_0$  – магнитуа нагрузки;  $(0, T)$  – интервал роста,  $(T, 2T)$  – интервал убывания нагрузки.

По исследованиям [10, 135] – при решении динамических задач разностными методами, воздействиями вида (2.10) обычно моделируют временные  $\delta$  – импульсы. А  $\delta$  – импульс, в свою очередь, моделирует упругий удар с отскоком, когда энергия от падающего груза передается за короткое время. Такой род воздействия используется на практике при моделировании сейсмических рэлеевских волн с помощью с ударных нагрузок падающим грузом.

Графическое представление соотношения (2.10) показано на рисунке 2.10.

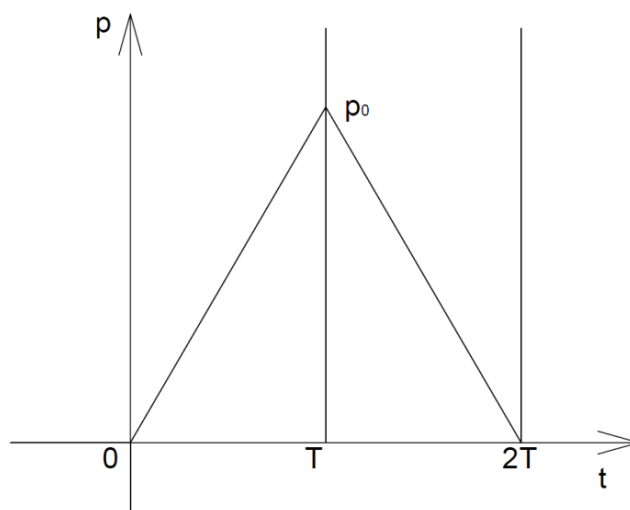


Рисунок 2.10. Изменение сосредоточенной вертикальной силы по треугольному закону [10].

Для исключения осцилляций за волновым фронтом выполняется следующая эмпирическая оценка:

$$T \geq 50 \times \Delta t \quad (2.11)$$

где  $\Delta t$  – Курантов инкремент,  $\Delta t = \Delta x / C_p$ ;  $\Delta x$  – характерный размер ячейки элемента;  $C_p$  – скорость продольной волны.

Для наглядного представления наличия осцилляций представлены следующие графики: рисунок 2.11 – Теоретический график зависимости

распространения амплитуды волн от времени; рисунок 2.12 – численный график при «узком» треугольнике; рисунок 2.13 – численный график при «широком» треугольнике.

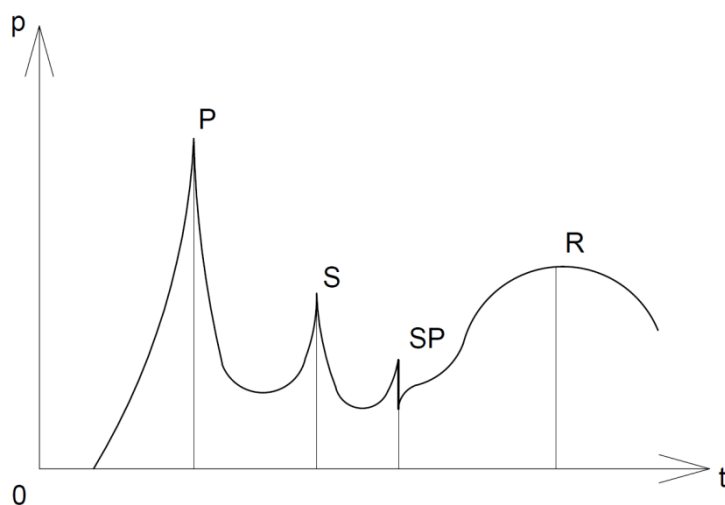


Рисунок 2.11. Теоретический график зависимости распределения амплитуды волн от времени [10].

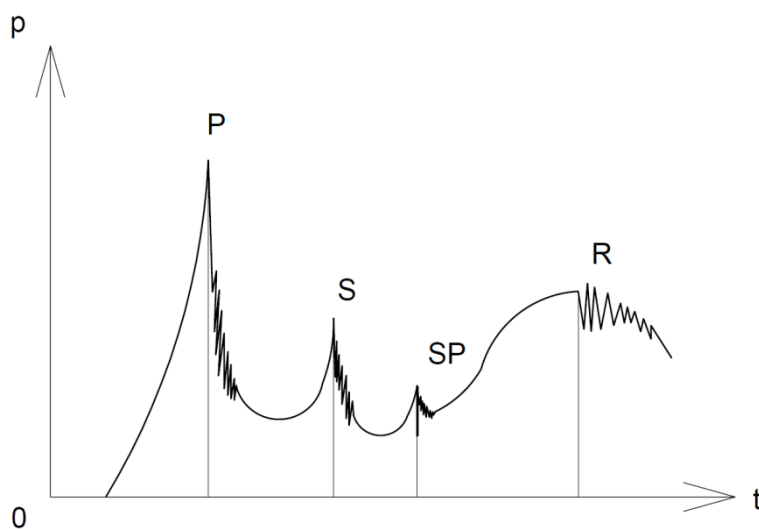


Рисунок 2.12. Численный график при «узком» треугольнике [10].

На графике при «узком» треугольнике наблюдается большие осцилляции за фронтом волны.



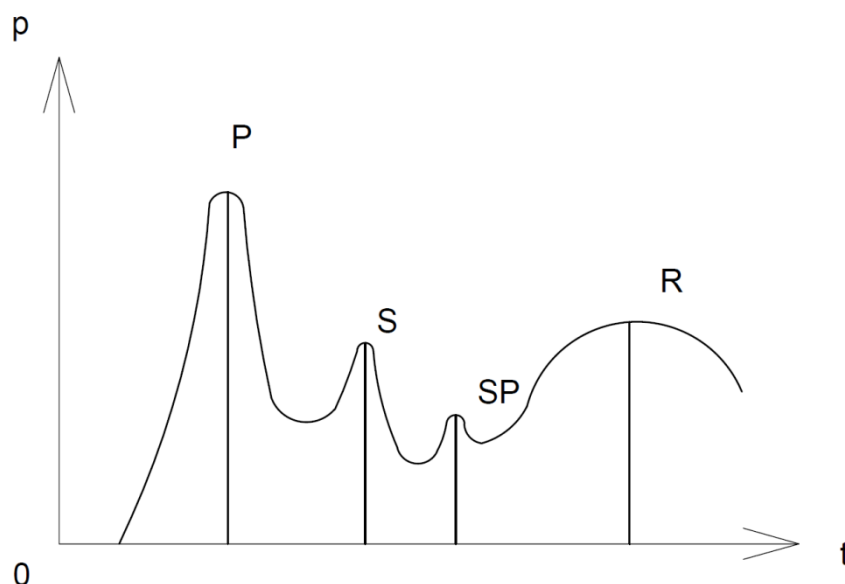


Рисунок 2.13. Численный график при «широком» треугольнике [10].

В последнем случае больших осцилляций за фронтом волны не наблюдаются.

Таким образом, графики, основанные на вычислениях с воздействием (2.10) при выполнении эмпирической оценки (2.11) показали, что осцилляции от  $S$ -волны за фронтом волны в точках наблюдения - весьма незначительные.

## 2.6. Выводы по главе 2

В настоящей главе приведены результаты теоретических и численных исследований по распространению объемных и поверхностных сейсмических волн в модельных задачах.

Стоит отметить, что в настоящей работе особое внимание уделено поверхностным волнам Рэлея. Это объясняется их разрушительным влиянием на здания, а так же экспериментально известными фактами, характеризующими возможность их распространения на большие расстояния от эпицентра. Т.е. рэлеевские волны могут оказывать влияние даже на весьма удаленные от источника сейсмической волны здания и сооружения.

В разделе 2.3 представлена концептуальная модель свайных сейсмических барьеров, позволяющая понять суть сейсмической защиты с использованием свайного поля от воздействия поверхностных волн Рэлея. На основании

приведенных здесь пространственных моделей свайных барьеров, в следующей главе ВКР проведем численный анализ взаимодействия свайных барьеров с волнами Рэлея методом КЭ с использованием ПК Abaqus.

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.

### **Глава 3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ 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. Будет проведено исследование 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. Численное моделирование взаимодействия сейсмических волн с барьерами проводится с помощью явной разностной схемы интегрирования по времени с пространственной дискретизацией методом конечных элементов.

#### **3.1. Влияние свайных барьеров на рассеяние энергии сейсмических волн**

Решение задач о влиянии свайных барьеров на рассеяние энергии сейсмических волн проводилось с помощью явной разностной схемы второго порядка точности методом конечных элементов. Для этого в программном комплексе Abaqus 6.14 был смоделирован массив грунта со свайным полем, (см. на рисунок 3.1.) на боковых поверхностях X0Z которого задано условие симметрии относительно соответствующих плоскостей (4 и 5), на нижней поверхности Y0X которого - условие симметрии PINNED ( $U_1=U_2=U_3=0$ ). На участке Y0Z (3) вдоль оси симметрии приложена линейная гармоническая нагрузка с круговой частотой 0.2 рад/с, генерирующая поверхностную волну Рэлея. На верхней свободной горизонтальной поверхности Y0X на некотором расстоянии от поверхности симметрии было смоделировано свайное поле.

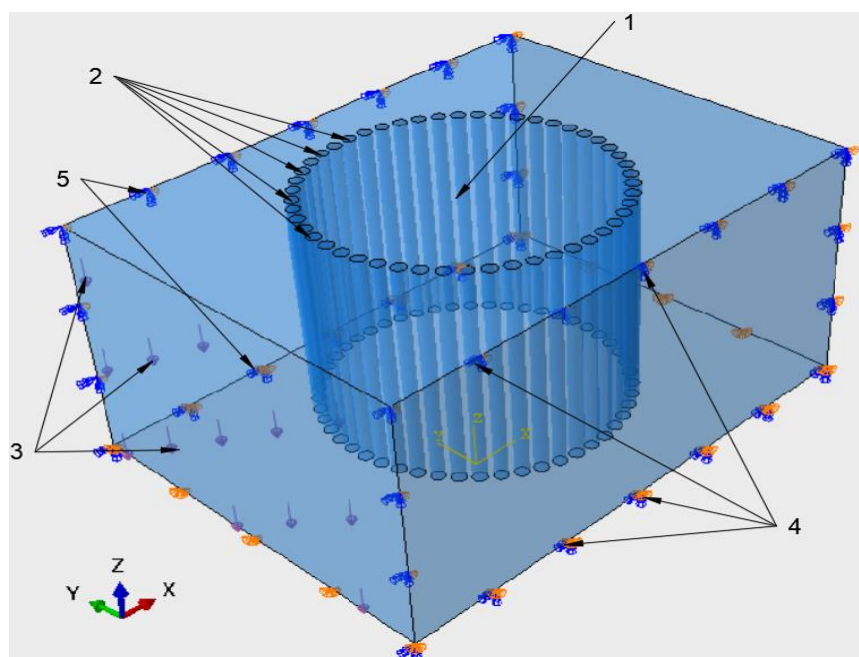


Рисунок 3.1. Пространственная расчетная модель свайного поля. 1- защищаемая территория внутри свайного поля. 2- сваи. 3- нагрузка, генерирующая волны. 4,5- условия симметрии.

В соответствии с П-теоремой размерности, которая утверждает, что в системе измерения физических величин выделяется некоторое количество основных (независимых) единиц измерения, а все остальные выражаются через них, следовательно, поле перемещений в любой точке наблюдения, находящейся внутри свайного поля, может быть описано безразмерными величинами.

П-теорема: Связь между  $(n + 1)$  размерными величинами  $a, a_1, \dots, a_n$ , независимая от выбора системы единиц измерения из  $k$  простых единиц, приобретает вид соотношения между  $(n + 1 - k)$  величинами  $\Pi, \Pi_1, \dots, \Pi_{n-k}$ , представляющими собой безразмерные комплексы из  $(n + 1)$  размерных величин. Т.е. функция связи  $n$  независимых размерных величин  $a, a_1, \dots, a_n$  с размерной величиной  $a$  вида:

$$a = f \left( \underbrace{a_1, a_2, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n}_n \right) \quad (3.1)$$

И может быть представлена как связь безразмерной величины  $\Pi$  с  $(n - k)$  безразмерными комплексами  $\Pi, \Pi_1, \dots, \Pi_{n-k}$  вида:

$$\Pi = f\left(\underbrace{1, 1, \dots, 1}_k, \underbrace{\Pi_1, \dots, \Pi_{n-k}}_{n-k}\right) \quad (3.2)$$

Из этой теоремы также следует, что представление физических зависимостей через безразмерные величины позволяет сократить общее число рассматриваемых в расчетах параметров, вследствие чего упрощается исследования задачи.

При таком представлении: а) выбирают характерные значения для всех переменных и вводят безразмерные переменные как отношение их размерных величин к характерным значениям; б) Константы задачи и константы обезразмеривания образуют некоторые безразмерные комплексы, число которых значительно меньше числа размерных констант.

В соответствии с этой теоремой для наших расчетов влияния свайных барьеров на рассеяние сейсмических волн, были составлены следующие безразмерные комплексы в поле перемещений ' $u$ ':

$$u\left(\frac{E_{pile}}{E_{soil}}; \frac{\rho_{pile}}{\rho_{soil}}; \frac{h}{\lambda}; \frac{d}{\lambda}; \frac{S}{\lambda}; \nu_{pile}; \nu_{soil};\right) \quad (3.3)$$

где индекс *soil* обозначает соответствующие параметры материала полупространства, т.е. грунта, а индекс *pile* – соответствующие параметры материала барьера;  $E_{pile}, E_{soil}$  – соответствующие модули упругости Юнга,  $\rho_{pile}, \rho_{soil}$  – соответствующие плотности,  $h$  - длина сваи,  $d$  – диаметр сваи,  $S$  – расстояние между сваями,  $\lambda$  – длина волны,  $\nu_{pile}, \nu_{soil}$  – коэффициенты Пуассона свайного барьера и грунта.

Эффективность защитных свойств свайного поля оценивалась на основе значения магнитуд перемещений и коэффициентов редукиции в защищаемых зонах. В наших исследованиях коэффициентом редукиции является коэффициент снижения уровня колебания, определяющийся отношением деформаций, напряжений,

перемещений, скоростей, ускорений в точках модели с барьером к тем же точкам модели без барьера. Исходя из этого, для определения коэффициентов редукции, требуется решить 2 задачи, одна с барьерами, а другая – без барьера. Для решения 1-ой задачи смоделирован грунт со сваями, материал которого отличается от материала свай, и соответственно, для решения 2-ой задачи смоделирован грунт без свай, см. на рисунок 3.2.

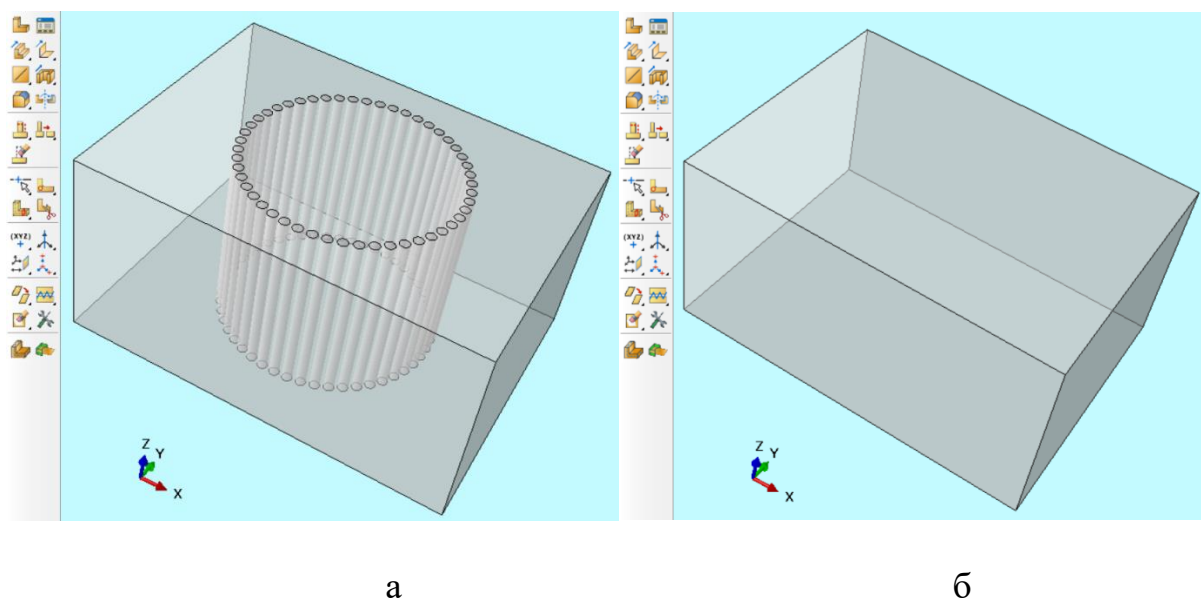
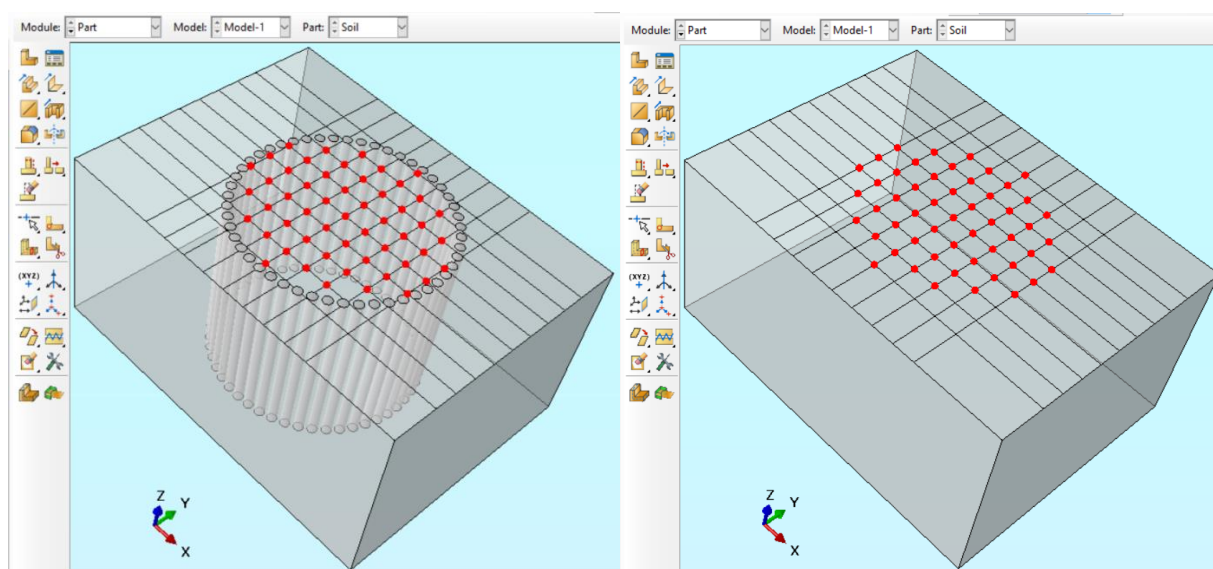


Рисунок 3.2. Пространственные модели для исследования влияния свайных барьеров на рассеяние волн Рэлея. (а) – массив грунта со сваями, (б) – массив грунта без свай.

Конечно-элементные модели свайных барьеров были созданы в виде свайного поля, окружающего защищаемую территорию, рисунок 3.2.а.

Для расчета по определению коэффициента редукции, в каждой модели созданы по 53 точек наблюдения в защищаемой территории, которые выделены красным цветом на рисунке 3.3.



а

б

Рисунок 3.3. Точки наблюдения в защищаемых территориях. (а) – в грунте со сваями, (б) – в грунте без свай.

Приложенная на поверхности  $Y0Z$  периодическая нагрузка вдоль оси  $X$  вызывает распространение гармонических волн, подобных сейсмическим волнам, которая задавалась в виде:

$$P(t) = P \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

где  $P = 0.01$  Па - амплитуда;  $\omega$  – круговая частота в рад/с; причем  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \nu$ ,  
 $T$  – период и  $\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}$  – частота в герцах.

Исследовались магнитуды перемещения во всех точках наблюдения на свободной поверхности  $Y0X$ , вызванные воздействием рэлеевских волн, см. на рисунок 3.4 и 3.5.



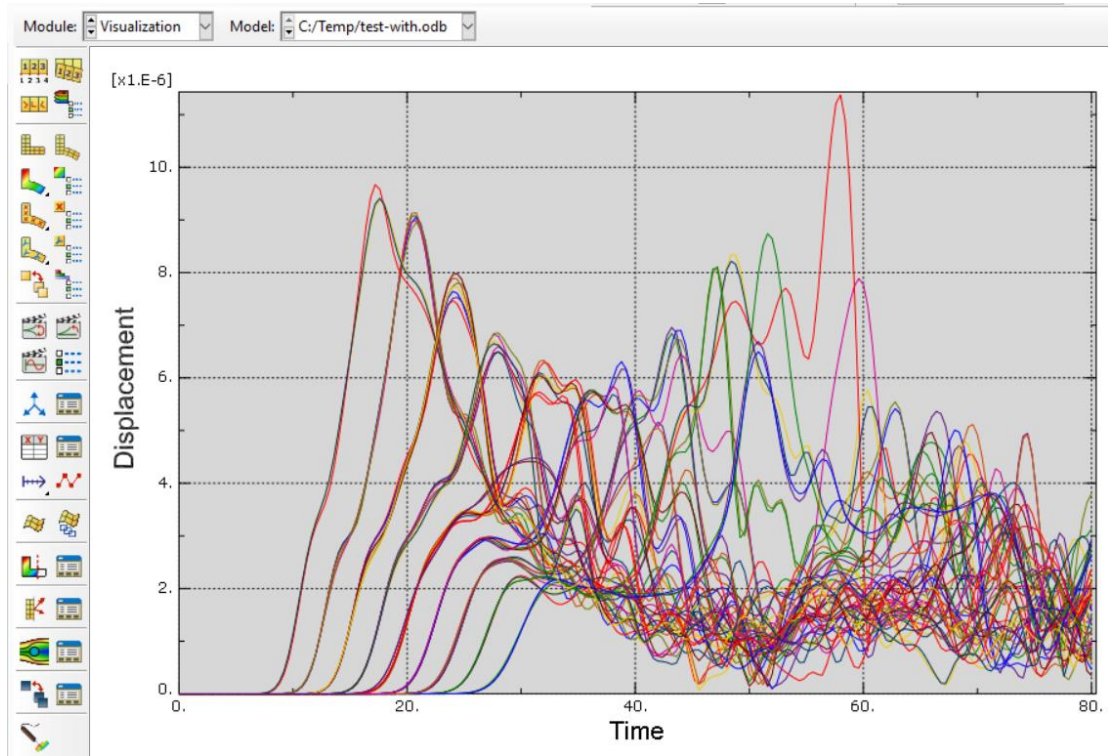


Рисунок 3.4. График изменения магнитуд перемещений в зависимости от времени в 1-ой задаче «с барьером».

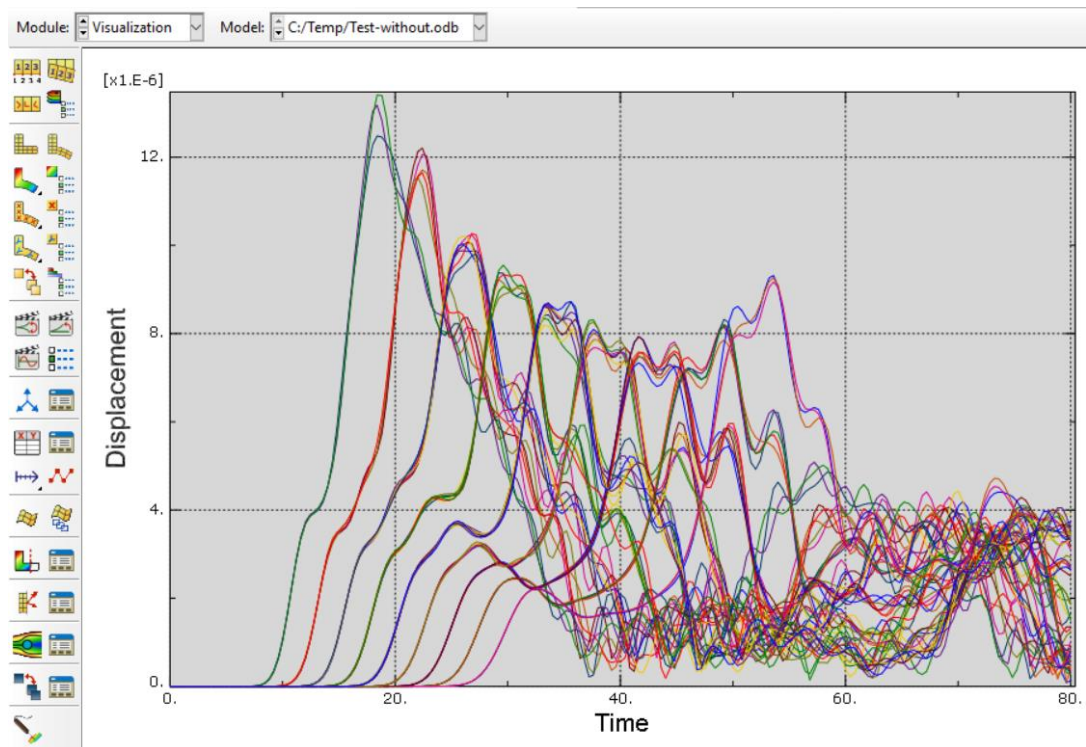


Рисунок 3.5. График изменения магнитуд перемещений в зависимости от времени в 2-ой задаче «без барьера».



Сравниваем значения магнитуд перемещений в точках наблюдения в модели с барьерами и тем же точкам модели без барьера, см. на рисунок 3.6.

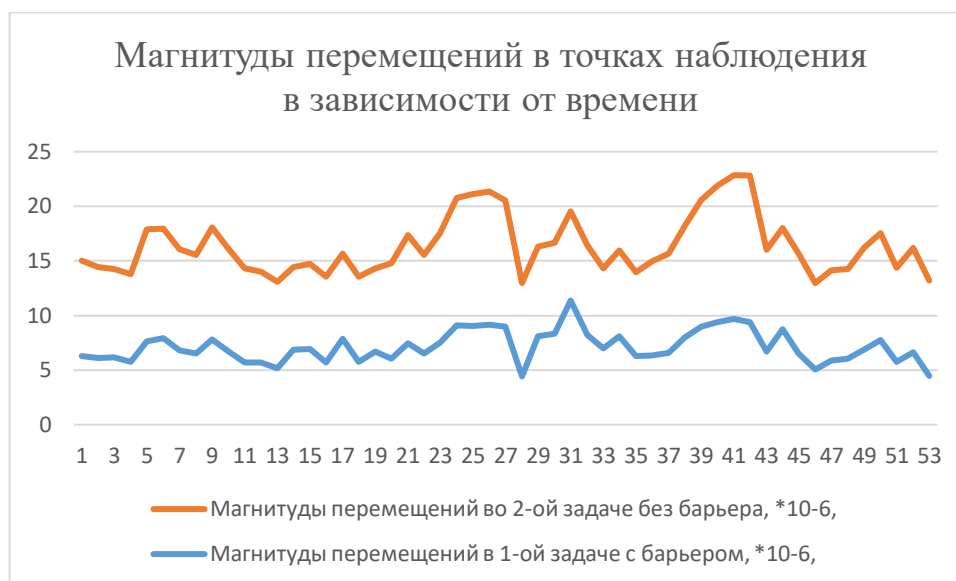


Рисунок 3.6. Сравнительные графики магнитуд перемещений в точках наблюдения.

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 свайное поле снижает уровень колебаний.

Коэффициенты редукции в наших исследованиях определяются отношениями:

$$K_1 = \frac{U_1^{(bar)}}{U_1^{(0)}}, \dots, K_N = \frac{U_N^{(bar)}}{U_N^{(0)}}, \quad (3.5)$$

где  $U_1^{(bar)} \dots U_N^{(bar)}$  – магнитуды перемещений в грунте «с барьером»;  $U_1^{(0)} \dots U_N^{(0)}$  – магнитуды перемещений в грунте «без барьера»;  $1 \div N$  – точки наблюдения.

Из график магнитуд перемещений следует таблица 1, где желтым цветом выделены наибольшие и наименьшие значения коэффициентов редукции и соответствующие их номера узлов.

Таблица 1. Значения коэффициентов редукции в точках наблюдения.

Номера точек наблюдения	Магнитуды перемещений в 1-ой задаче с барьером, *10 <sup>-6</sup> ,	Магнитуды перемещений во 2-ой задаче без барьера, *10 <sup>-6</sup> ,	Коэффициенты редукции, $K_N$
1	6,29986	8,69783	0,7243
2	6,0983	8,34406	0,7309
3	6,16488	8,09386	0,7617
4	5,76329	8,01453	0,7191
5	7,6422	10,2466	0,7458
6	7,8953	10,0719	0,7839
7	6,82493	9,22326	0,74
8	6,49605	9,07588	0,7158
9	7,8032	10,27	0,7598
10	6,70556	9,37513	0,7153
11	5,68032	8,62578	0,6585
12	5,68588	8,30999	0,6842
13	5,16163	7,92905	0,651
14	6,8419	7,58846	0,9016
15	6,90051	7,81158	0,8834
16	5,67833	7,85655	0,7228
17	7,88448	7,75292	1,0168
18	5,72637	7,84175	0,7302
19	6,71946	7,60462	0,8836

20	6,04547	8,7193	0,6933
21	7,46967	9,88094	0,756
22	6,49963	9,06582	0,7169
23	7,53016	10,0303	0,7507
24	9,07632	11,7097	0,7751
25	9,05172	12,0624	0,7504
26	9,13688	12,2092	0,7575
27	8,99138	11,5447	0,7788
28	4,41519	8,55034	0,5164
29	8,11274	8,19444	0,99
30	8,3365	8,32185	1,0018
31	11,3743	8,15544	1,3947
32	8,21803	8,2071	1,0013
33	6,95826	7,33908	0,9481
34	8,09211	7,8548	1,0302
35	6,30717	7,67987	0,8213
36	6,33522	8,61759	0,7352
37	6,60078	9,04323	0,7299
38	7,97953	10,2088	0,7816
39	8,94883	11,6485	0,7682
40	9,38949	12,4822	0,7522
41	9,66873	13,1784	0,7337

42	9,40877	13,411	0,7016
43	6,69074	9,31634	0,7182
44	8,73807	9,26178	0,9435
45	6,49755	9,17307	0,7083
46	5,05228	7,93435	0,6368
47	5,84422	8,26246	0,7073
48	6,05069	8,19142	0,7387
49	6,85473	9,33662	0,7342
50	7,72624	9,795	0,7888
51	5,73168	8,63508	0,6638
52	6,64918	9,55229	0,6961
53	4,479	8,73002	0,5131

Вставляя полученные значения коэффициентов редукиции на схему расположения точек наблюдения, рисунок 3.7, с помощью пиковых их значений можно определить зону «тени» в защищаемой территории внутри свайного поля.

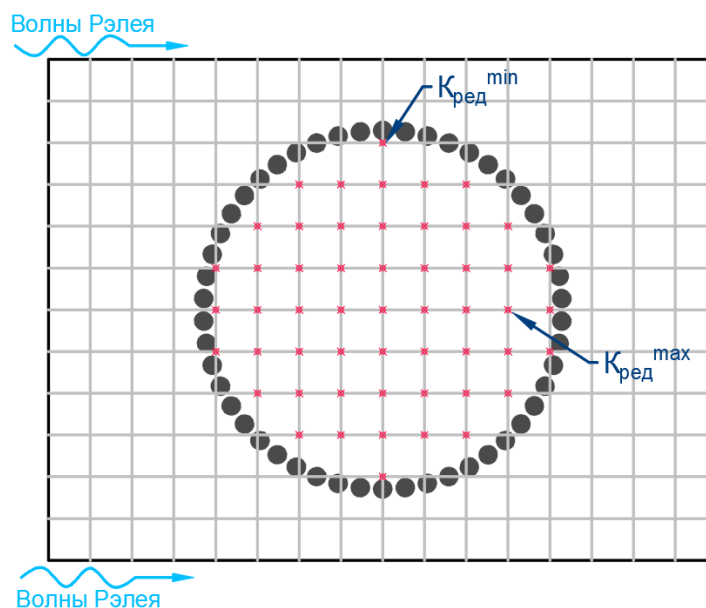


Рисунок 3.7. Схема расположения точек наблюдения.

Максимальное значение коэффициента редуции оказалось в точке наблюдения узла 31,  $K_{ред}^{max} = 1,3947$ , минимальное значение – в точке наблюдения узла 53,  $K_{ред}^{min} = 0,5131$ . Значения ближе максимальному находятся в диапазоне между 0,8834 и 1,0168 включительно. А значения ближе к минимальному от 0,5131 до 0,651. По пиковыми этими значениями коэффициентов редуции построена цветовая схема, рисунок 3.8.

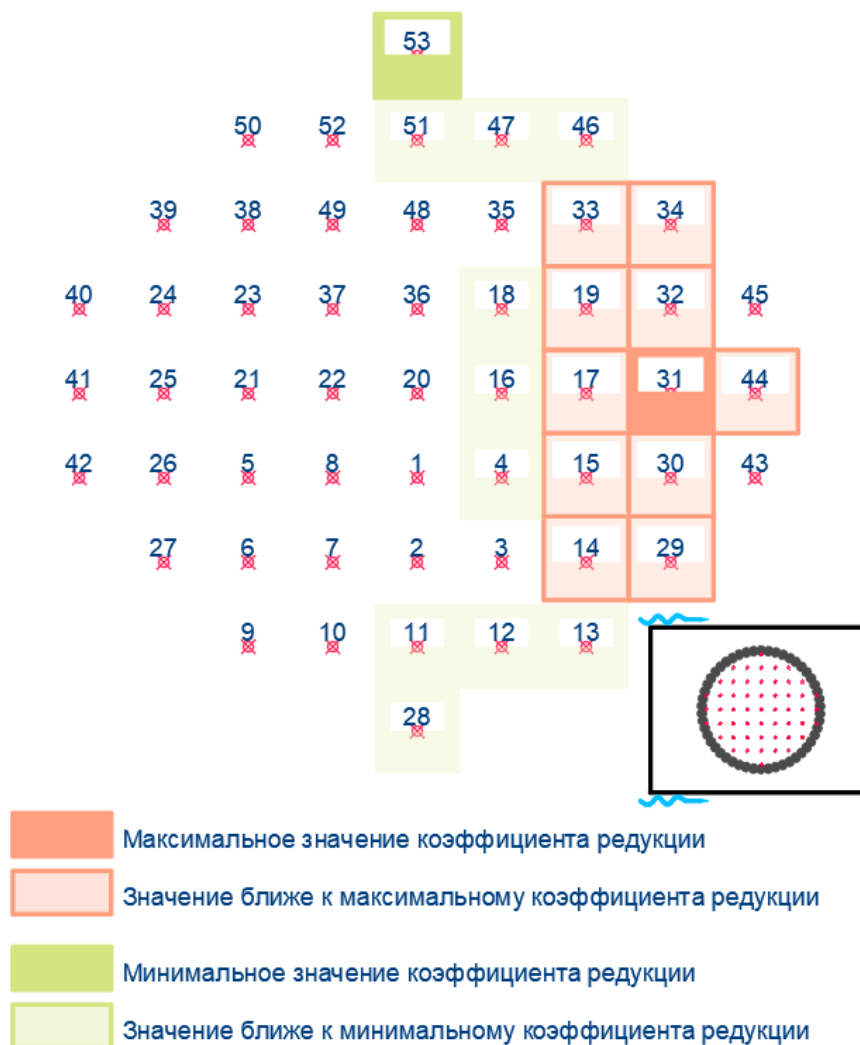


Рисунок 3.8. Цветовая схема по пиковыми значениями коэффициентов редукции.

Окрашенная часть цветовой схемы по обозначениями, выделенными персиковыми и салатными цветами, дает нам известность об очертании и расположении зоны тени в данных исследованиях, откуда можно сделать вывод о том, что в задней части защищаемой территории, где находится зона тени, интенсивность рэлеевских волн более снижена. Для наглядности полученных результатов, на рисунке 3.9 показан процесс распространения волн Рэлея по свободной поверхности и их взаимодействие со свайным полем.

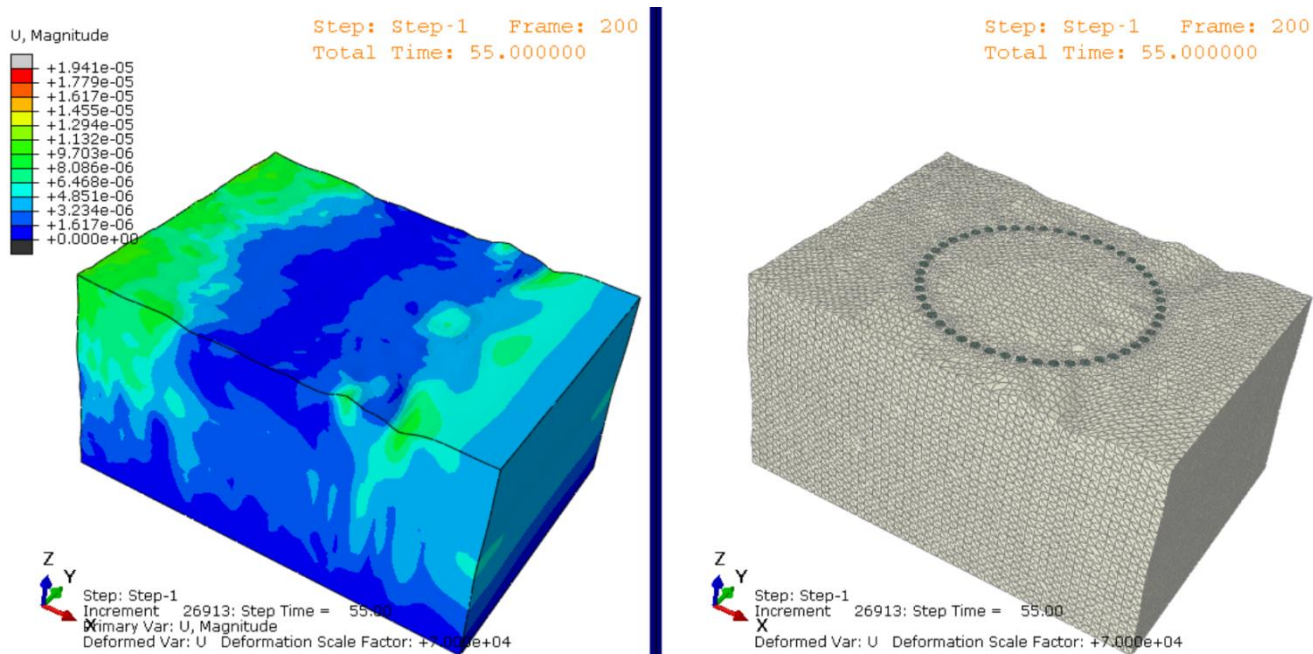


Рисунок 3.9. Процесс распространения волн Рэлея и их взаимодействие со свайным полем, слева – напряженное состояние грунта, справа – поле перемещений.

### 3.2. Анализ эффективности свайных барьеров при изменении их геометрии

Сравнительные исследования для оценки эффективности свайных барьеров из разных размеров выполняются с помощью явной разностной схемы Лакса-Вендроффа второго порядка, при выполнении условия Куранта для обеспечения численной устойчивости [10] [43].

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 3.10.

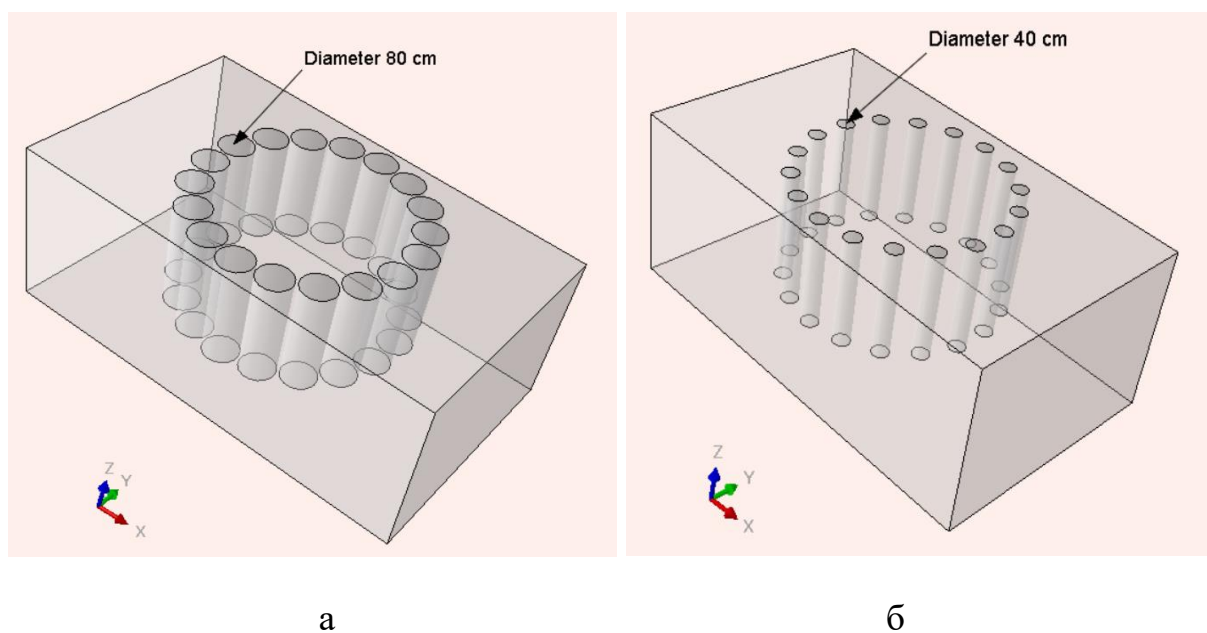
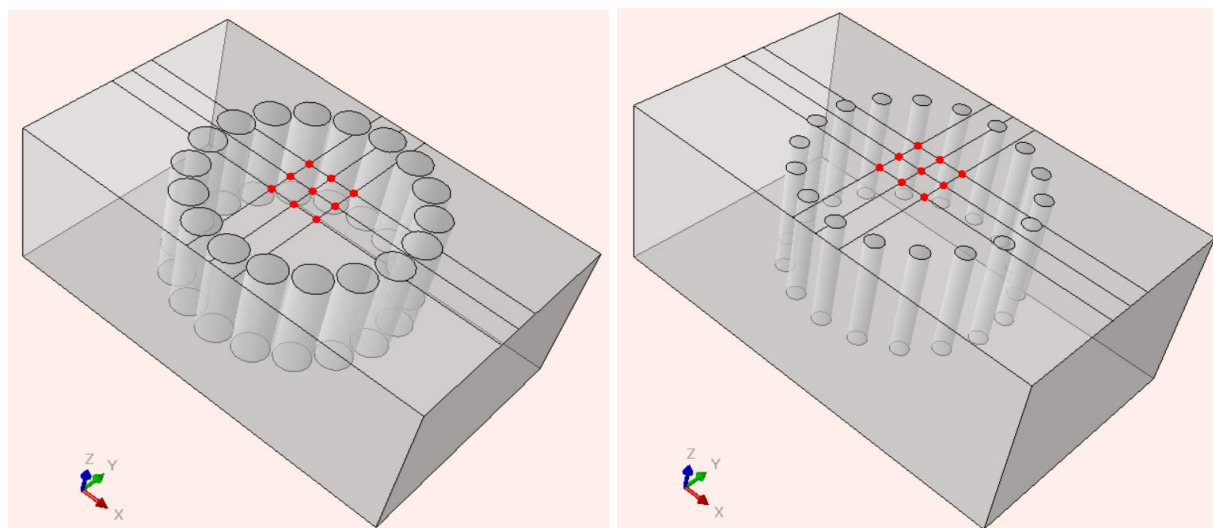


Рисунок 3.10. Модели свайного поля для сравнительного анализа. (а) – модель с большими сваями,  $\varnothing = 80$  см; (б) – модель с небольшими сваями,  $\varnothing = 40$  см.

Глубины барьеров в сравнительных расчетах принимаются 5 м. Материалы барьеров выполняются с плотностью как минимум вдвое больше, чем плотность грунта.

Исследуются вызванные сейсмическими волнами перемещения и деформации во все моменты времени в каждой модели. С целью сравнения данных значений в каждой модели внутри свайного поля собраны по 9 произвольных точек для наблюдения, см. на рисунок 3.11.





а

б

Рисунок 3.11. Точки наблюдения в защищаемых территориях, (а) – в модели с большими сваями, (б) – в модели с небольшими сваями.

Рассмотрим для визуального сравнения картинки перемещений, полученные на результатах расчетов, рисунок 3.12.

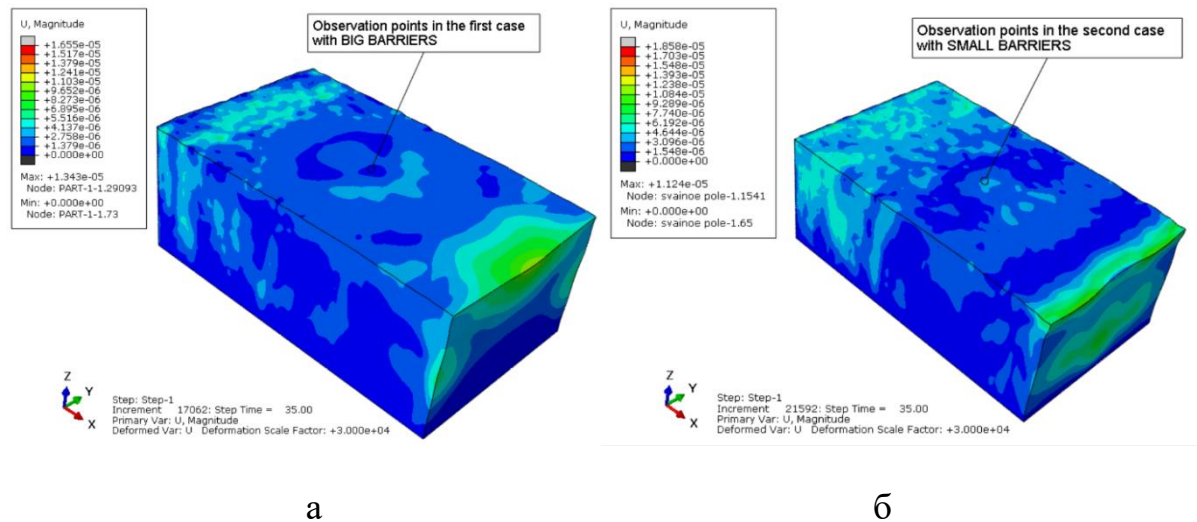


Рисунок 3.12. Изополя перемещений в глобальной системе. (а) – поле перемещений в 1-ой задаче с барьерами диаметром 80 см, (б) – во 2-ой задаче с барьерами диаметром 40 см.

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 3.12, разброс цветов в диапазоне от синего до серого. Зеленые и зелено-желтые цветы в полях перемещений соответствуют большим значениям магнитуд перемещений, а 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 [50].

Рассмотрим подробнее эти значения в точках наблюдения, см. на рисунок 3.13, 3.14 и таблицу 2:

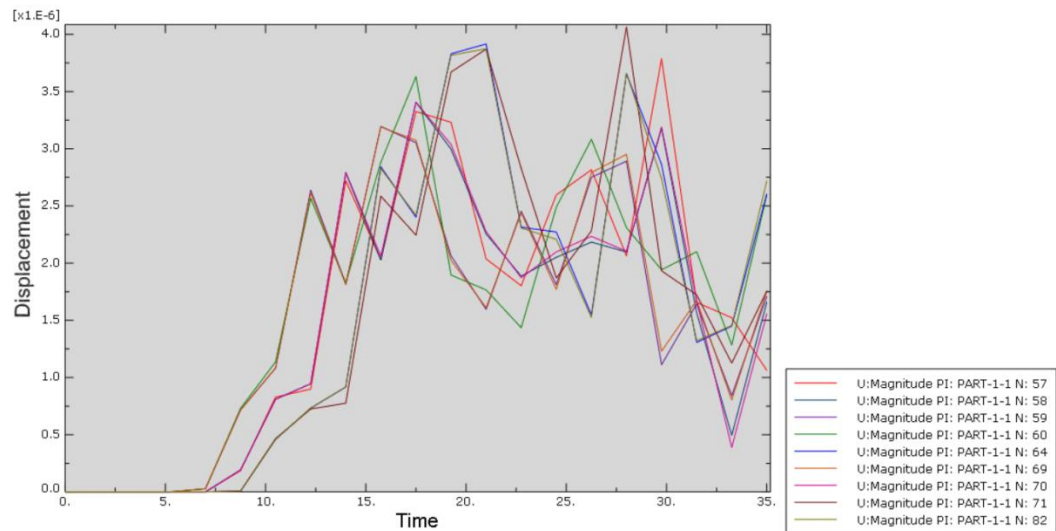


Рисунок 3.13. График изменений магнитуд перемещений от времени при диаметре свай 80 см.

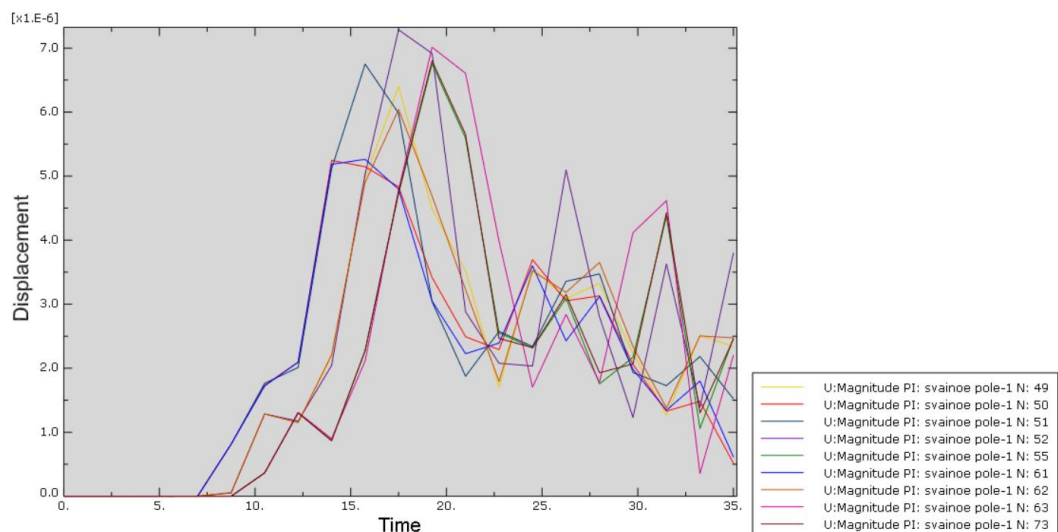


Рисунок 3.14. График изменений магнитуд перемещений от времени при диаметре свай 40 см.

Таблица 2. Значения магнитуд перемещений в точках наблюдения.

Номера точек наблюдения	Соответствующие номера узлов в расчетной модели со сваями диаметра 80 см	Соответствующие номера узлов в расчетной модели со сваями диаметра 40 см	Соответствующие значения магнитуд перемещений, когда $\varnothing_{\text{свай}}=80$ см, $\cdot 10^{-6}$	Соответствующие значения магнитуд перемещений, когда $\varnothing_{\text{свай}}=40$ см, $\cdot 10^{-6}$
1	59	50	3,19513	5,2475
2	58	49	3,40614	6,40029
3	64	55	3,91561	6,75431
4	60	51	3,62949	6,75057
5	57	52	3,78646	7,28584
6	71	63	4,06482	7,01293
7	69	61	3,19011	5,2626
8	70	62	3,40759	6,04156
9	82	73	3,87336	6,80155

Извлекая соответствующие значения магнитуд из график в каждой точке наблюдения каждой расчетной модели, построим графики значений магнитуд перемещений для сравнения, см. на рисунок 3.15.

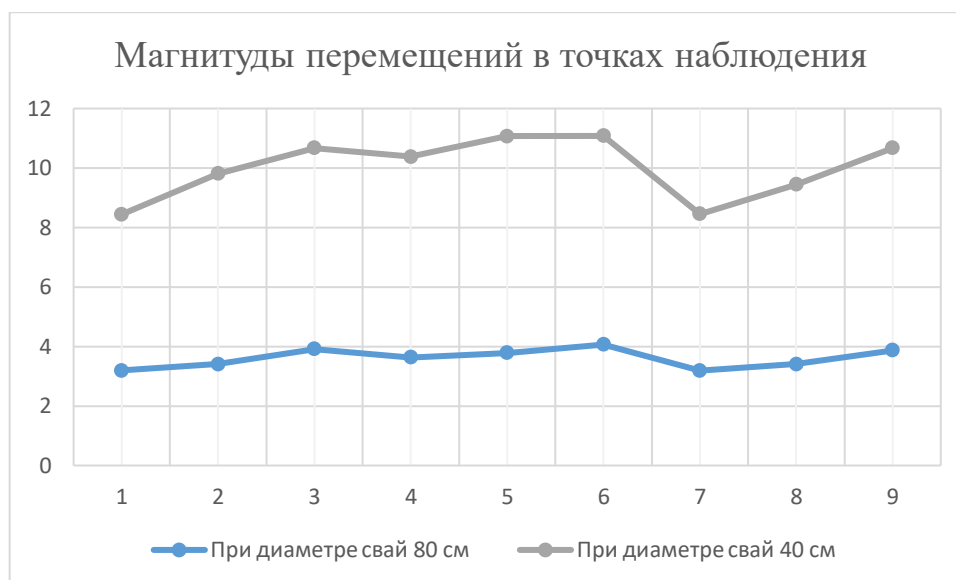


Рисунок 3.15. Сравнительные графики магнитуд перемещений в исследуемых точках.

Полученные данные при сравнительном анализе, приведенные в таблице 2 и графиках 3.15 показали, что возникающие сейсмическими волнами значения магнитуд перемещений во всех точках наблюдения в первом исследовании «с большими барьерами» примерно в  $\sim 1,8$  раза меньше значений магнитуд перемещений во втором исследовании «с небольшими барьерами». 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 [38] [28], эти волны весьма отчетливо диагностируются на трёх координатных сейсмограммах.

### 3.3. Сравнительный анализ свайных барьеров из разных материалов

В настоящих 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 3.16.

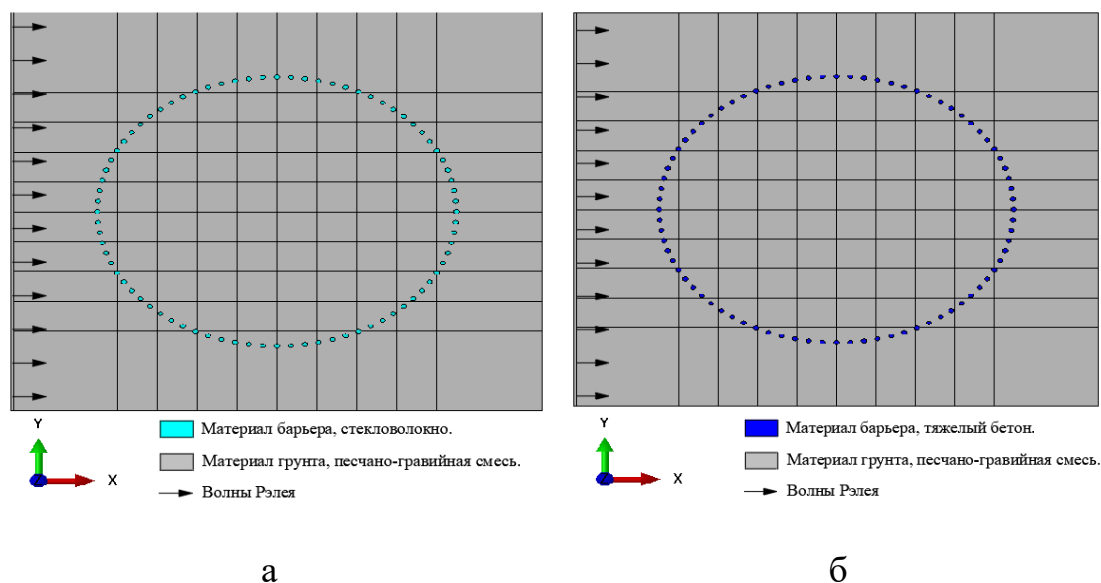


Рисунок 3.16. (а) – модель пустых свай, (б) – модель жестких свай.

Исследования выполняются с помощью явной разностной схемы Лакса-Вендроффа второго порядка точности, при выполнении условия Куранта для обеспечения численной устойчивости [10] [43].

В качестве материала для пустых свай может служить звукопоглощающий материал стекловолокно с объемной массой  $70 \text{ кг/м}^3$ , имеющее ячеистое строение, которое, снижая энергию отраженных звуковых волн, благоприятной изменяют характеристику звукового поля. А для жестких свай можно использовать тяжелый бетон класса В20 с объемной массой  $2500 \text{ кг/м}^3$ .

Для того, чтобы сравнивать результаты по значениям вызываемых сейсмических волн перемещений и деформаций было создано в каждой расчетной модели 23 произвольных точек наблюдения внутри свайного поля, подразделяющихся на три части – вертикальные, горизонтальные и диагональные, см. на рисунок 3.17.

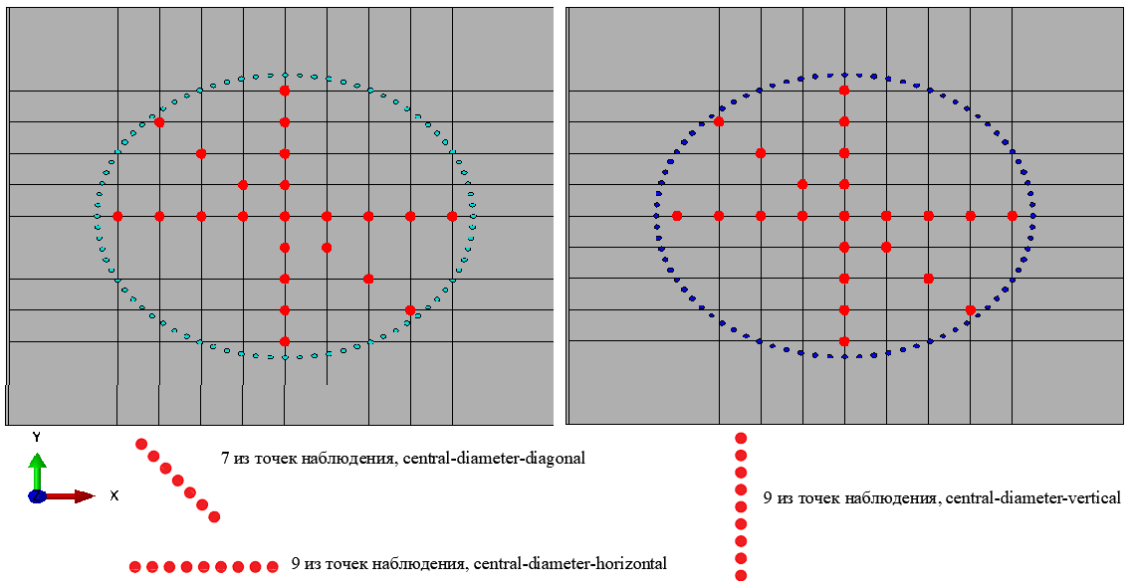


Рисунок 3.17. Точки наблюдения внутри свайных полей из разных материалов.

Рисунок 3.18 представляет процесс распространения волны Рэля по направлению вдоль оси  $Ox$  по свободной поверхности и вызванные сейсмическими волнами деформации и перемещения в расчетных моделях.

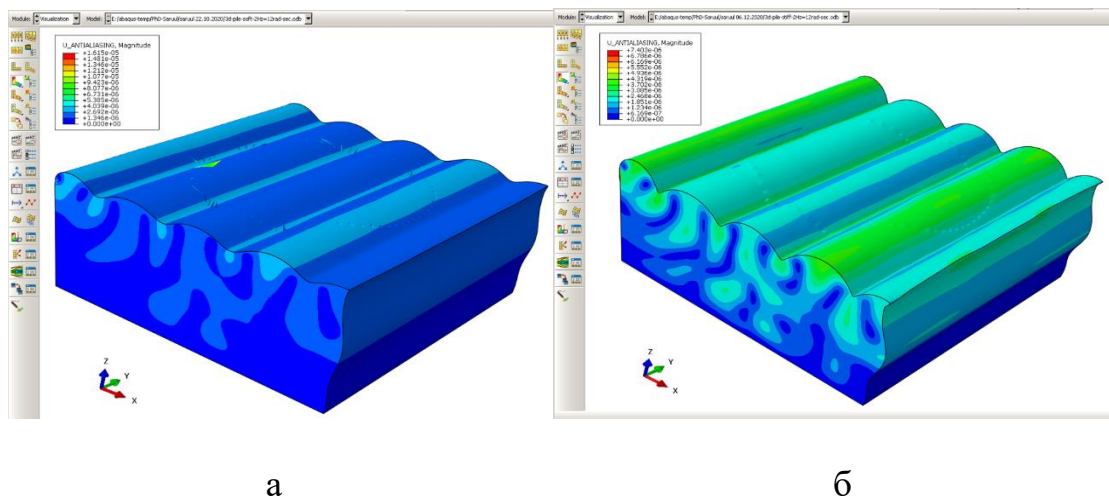


Рисунок 3.18. Деформированное состояние массива грунта (а) – для пустых свай, (б) – для жестких свай.

Рассмотрим графики изменений магнитуд перемещений во всех 23 точках наблюдения, в первом случае, когда барьеры заполнены из акустически мягких материалов стекловолокон, см. на рисунок 3.19 а, б, в.

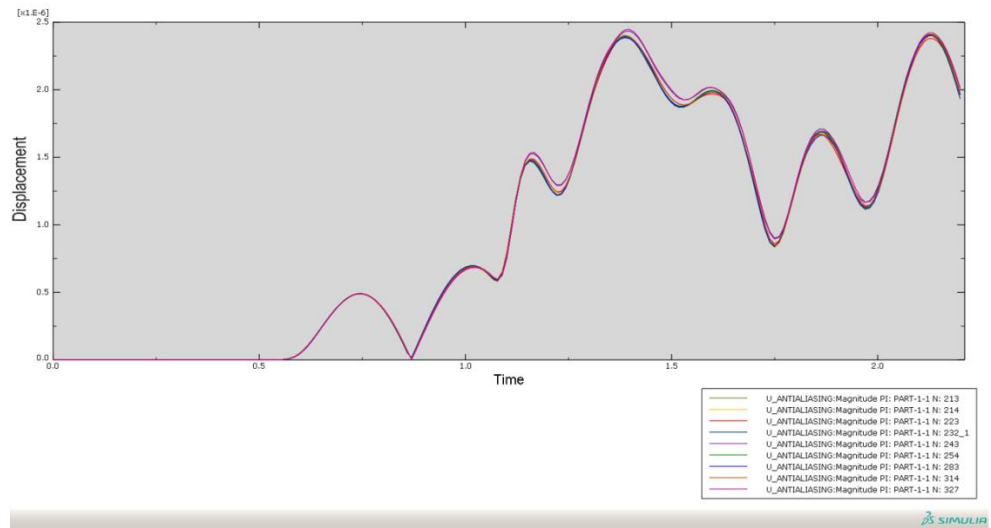


Рисунок 3.19. (а) – Магнитуды перемещений в зависимости от времени во вертикальных точках наблюдения, максимальное значение которых равно  $2,44806 \cdot 10^{-6}$ .

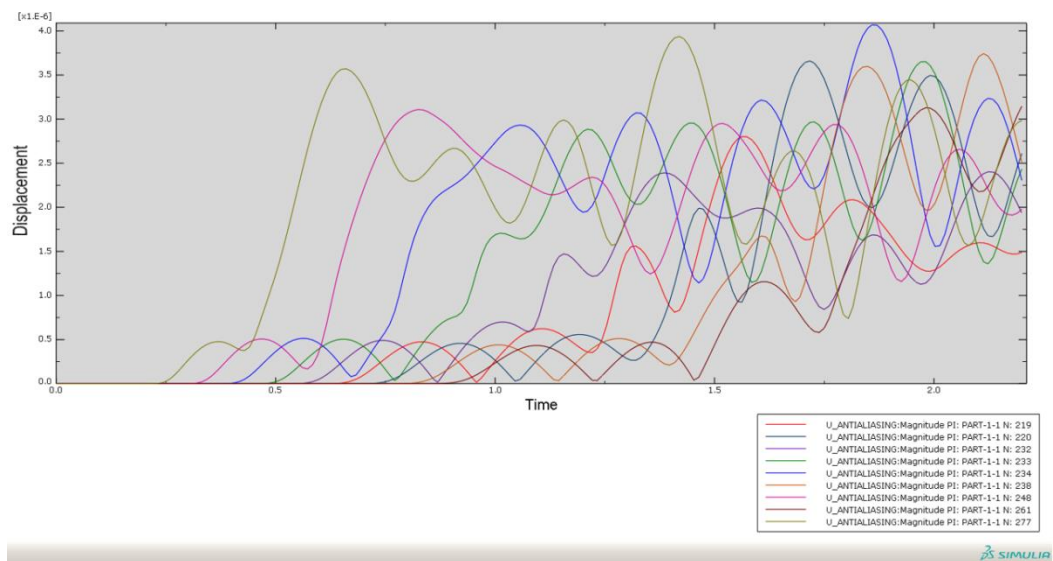


Рисунок 3.19. (б) – Магнитуды перемещений в зависимости от времени в горизонтальных точках наблюдения, максимальное значение которых равно  $4,06907 \cdot 10^{-6}$ .



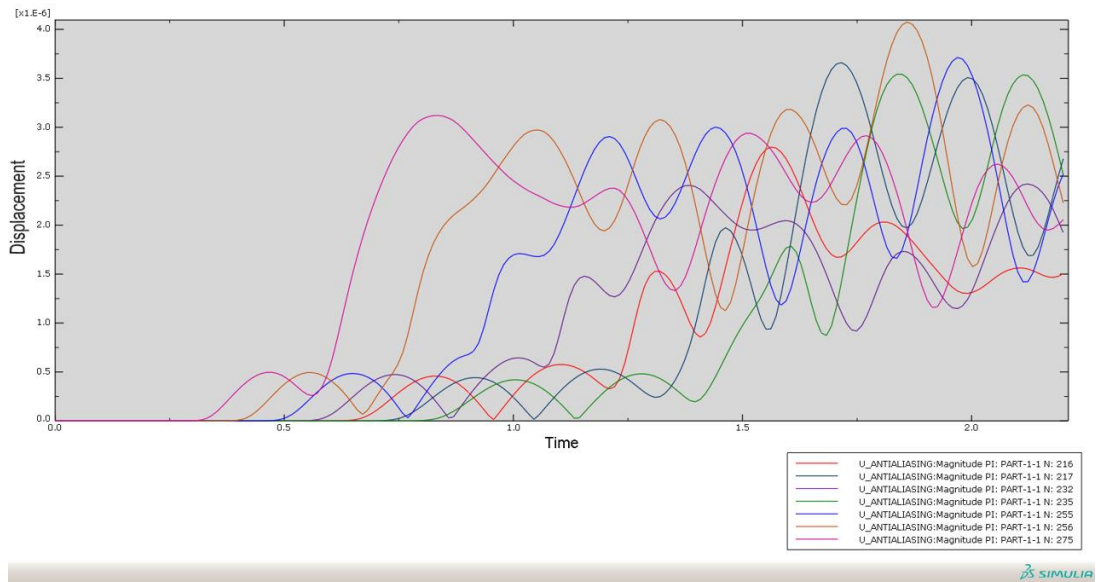


Рисунок 3.19. (в) – Магнитуды перемещений в зависимости от времени в диагональных точках наблюдения, максимальное значение которых равно  $4,05905 \cdot 10^{-6}$ .

Рассмотрим графики изменений магнитуд перемещений во всех 23 точках наблюдения, во втором случае, когда барьеры заполнены из тяжелых бетонов класса В20, см. на рисунок 3.20 а, б, в.

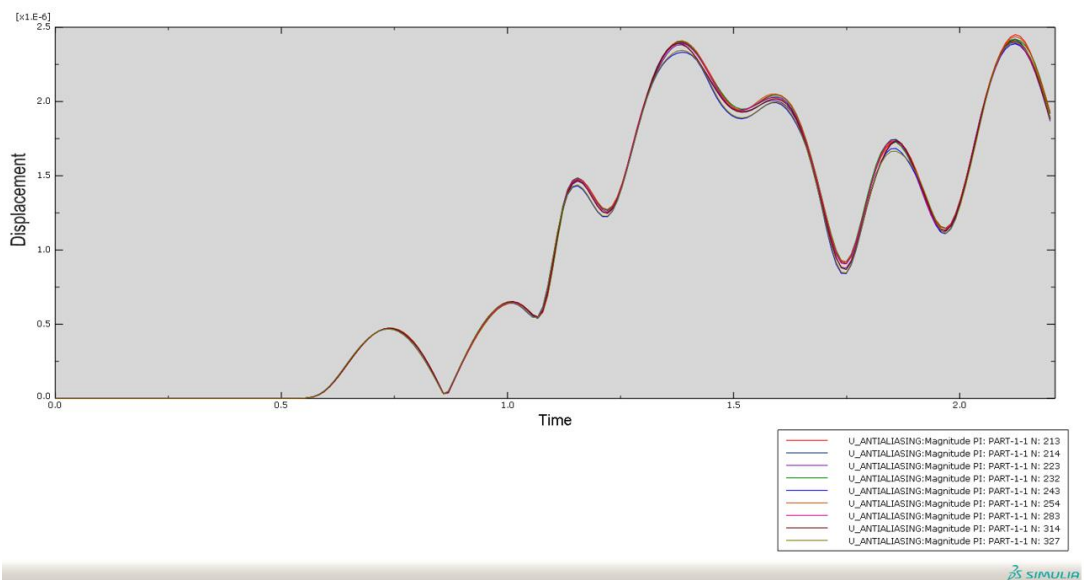


Рисунок 3.20. (а) – Магнитуды перемещений в зависимости от времени во вертикальных точках наблюдения, максимальное значение которых равно  $2,45006 \cdot 10^{-6}$ .



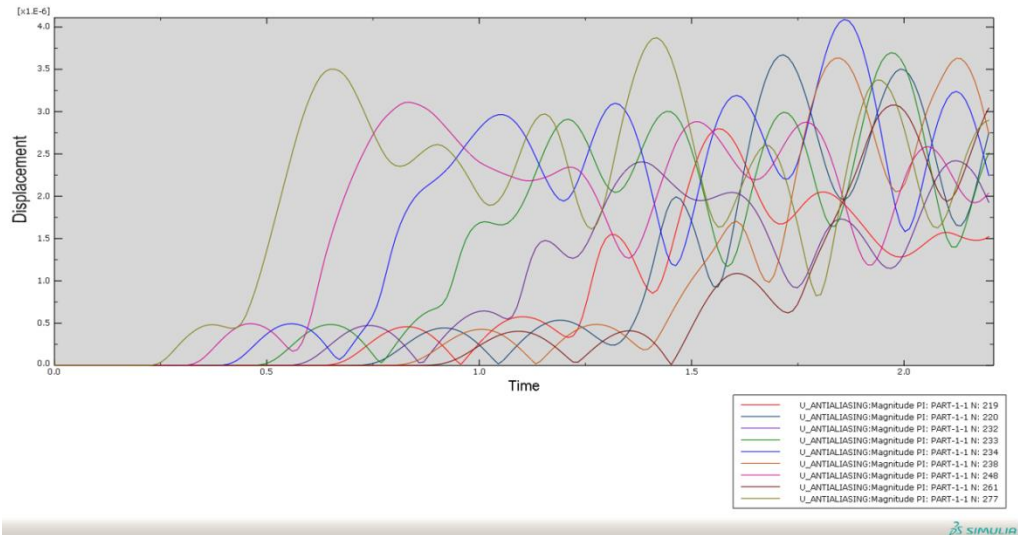


Рисунок 3.20. (б) – Магнитуды перемещений в зависимости от времени в горизонтальных точках наблюдения, максимальное значение которых равно  $4,08879 \cdot 10^{-6}$ .

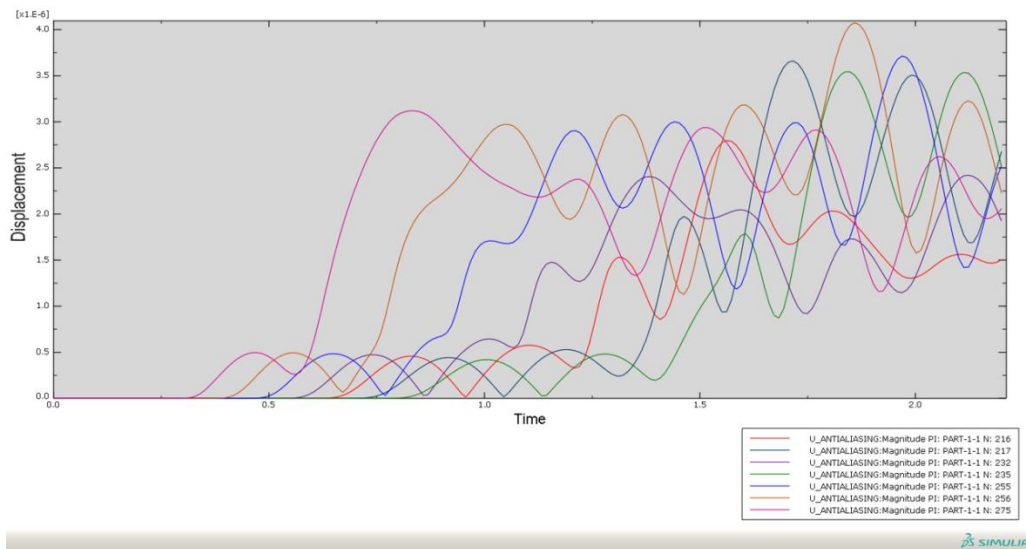


Рисунок 3.20. (в) – Магнитуды перемещений в зависимости от времени в диагональных точках наблюдения, максимальное значение которых равно  $4,07416 \cdot 10^{-6}$ .

Для удобства сравнения результатов, собираем максимальные значения магнитуд перемещений из вышепоказанных графиков, в таблицу 3.

Таблица 3. Максимальные значения магнитуд перемещений в точках наблюдения.

Точки наблюдения	Соответствующее максимальное значение магнитуд перемещений в барьерах из стекловолокна	Соответствующее максимальное значение магнитуд перемещений в барьерах из тяжелого бетона В20
Вертикальные	$2,44806 \cdot 10^{-6}$	$2,45006 \cdot 10^{-6}$
Горизонтальные	$4,06907 \cdot 10^{-6}$	$4,08879 \cdot 10^{-6}$
Диагональные	$4,05905 \cdot 10^{-6}$	$4,07416 \cdot 10^{-6}$

Полученные данные, приведенные в таблице 3 показали, что 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.

#### **3.4. Исследование защитных свойств композитных свай-оболочек.**

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 сваи. 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 3.20, где выделены оболочка сваи и ее заполняющий материал красным цветом.

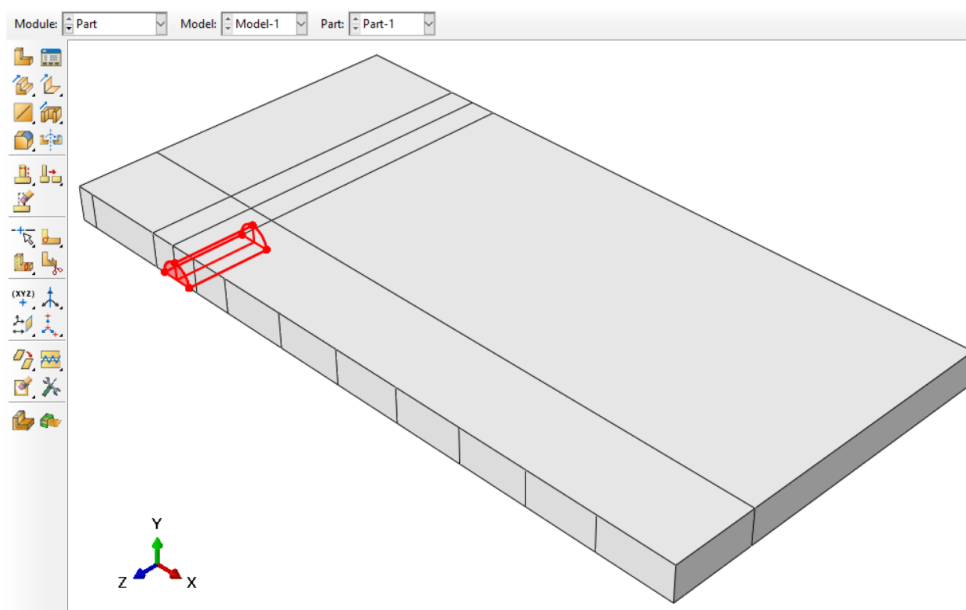


Рисунок 3.20. Модель для барьера сваи-оболочки.

Вдоль вертикальной оси  $Y$  на поверхностях  $XOZ$  были заданы условия симметрии относительно оси  $Y$ , на свободной поверхности  $Y0X$  вдоль оси симметрии приложена нагрузка, вызывающая гармонические колебания в толщах пород грунта, которые распространяются по свободной поверхности Земли с частотой 5 Гц, на двух других участках  $Y0Z$  заданы неотражающие границы, см. на рисунок 3.21.

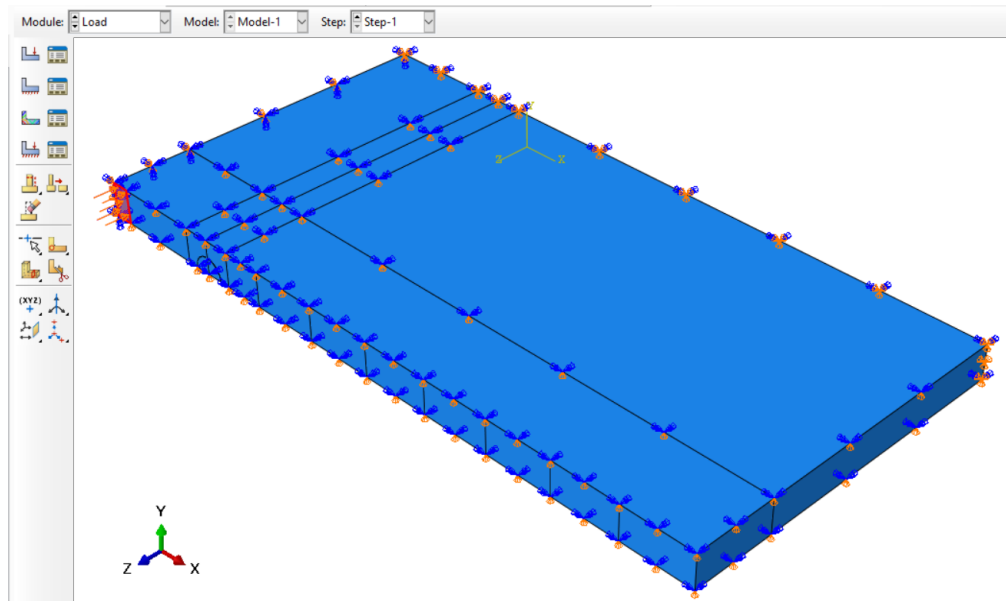


Рисунок 3.21. Граничные условия модели сваи-оболочки.

В зоне за барьером для исследования защитных свойств созданы 14 точки наблюдения, 7 из которых – по центрам свай, 7 – между сваями, см. на рисунок 3.22.

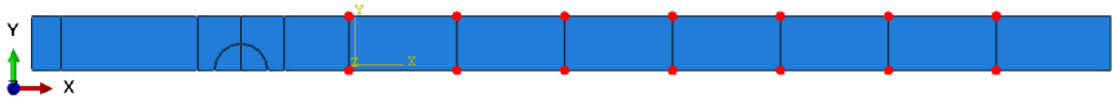


Рисунок 3.22. Точки наблюдения для барьера в виде сваи-оболочки.

Полученные графики изменения магнитуд перемещений в точках наблюдения в зависимости времени, рисунок 3.23, позволяет анализировать на каком участке зоны за барьером амплитуды колебания ниже, и на каком выше.

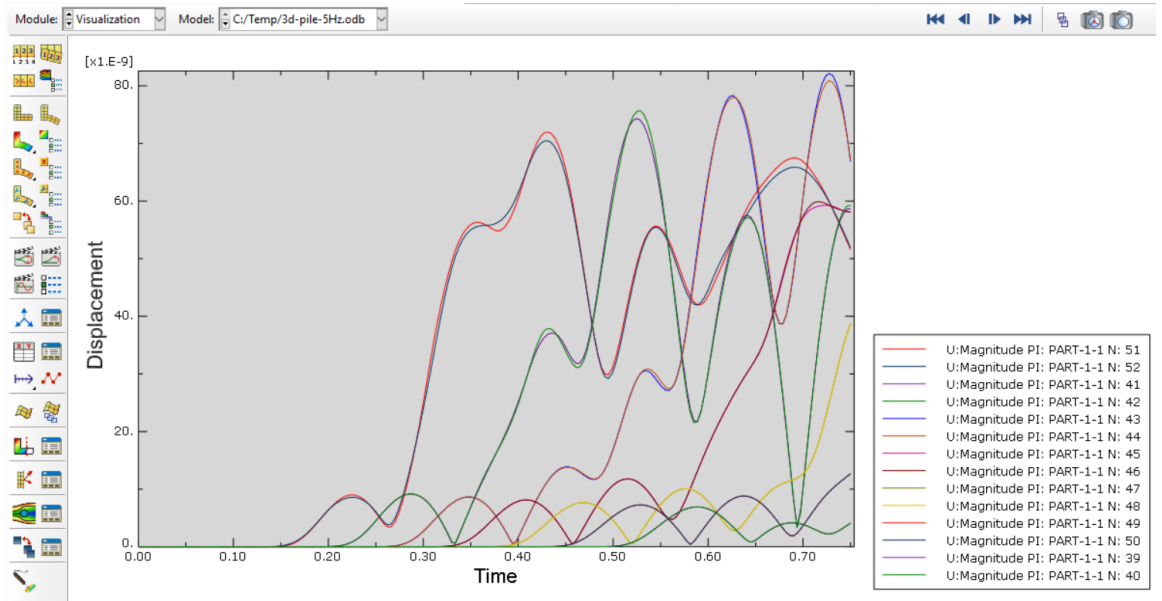


Рисунок 3.23. Графики изменения магнитуд перемещений в точках наблюдения для барьера сваи-оболочки.

Представим полученные данные на схеме расположения точек наблюдения, где показаны и их расстояния от барьера, рисунок 3.24, для более подробного анализа результатов, рисунок 3.25.

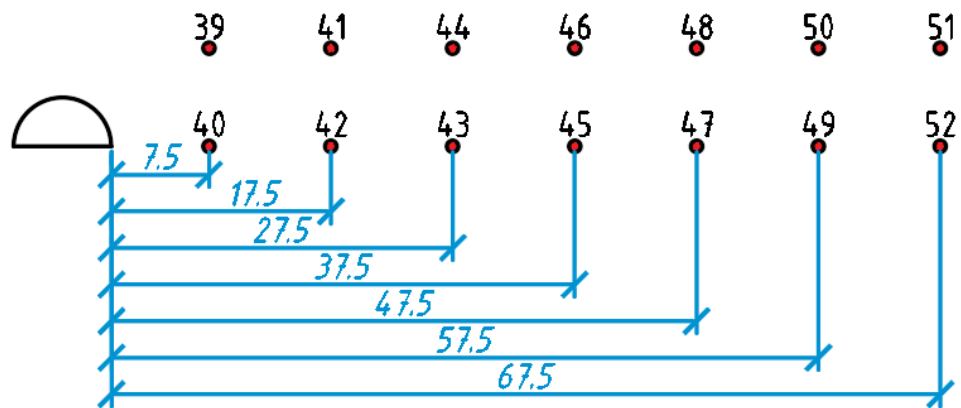


Рисунок 3.24. Схема расположения точек наблюдения для барьера сваи-оболочки.

6,918	7,433	8,09	5,99	3,875	1,269	7,199
6,917	7,565	8,216	5,926	3,868	1,269	7,045

Рисунок 3.25. Значения магнитуд перемещений с  $\cdot 10^{-9}$ , в точках наблюдения для барьера сваи-оболочки.

Эти же результаты-сравнения посмотрим в виде гистограммы, рисунок 3.26.

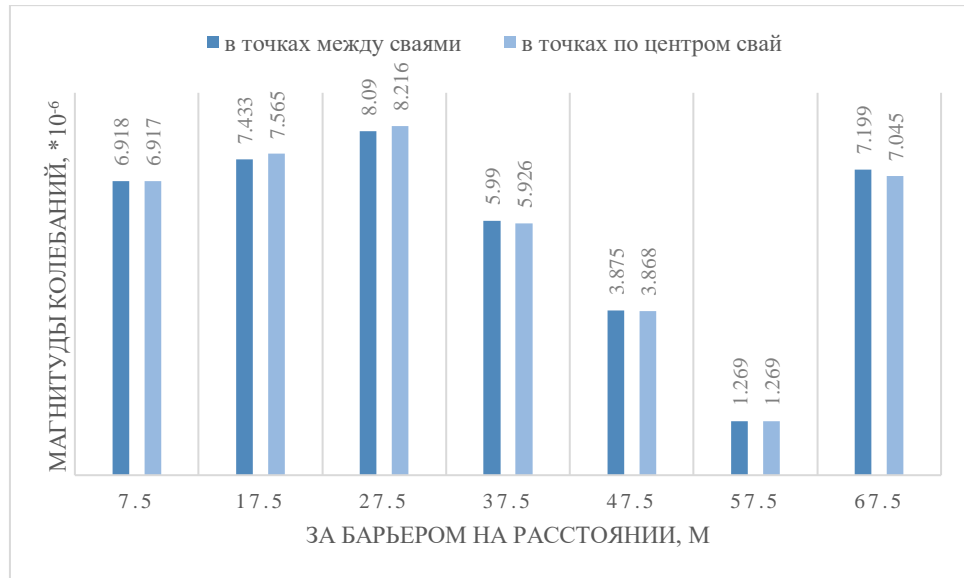


Рисунок 3.26. Гистограмма значений магнитуд в точках наблюдения для исследования барьера сваи-оболочки.

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 3.27.

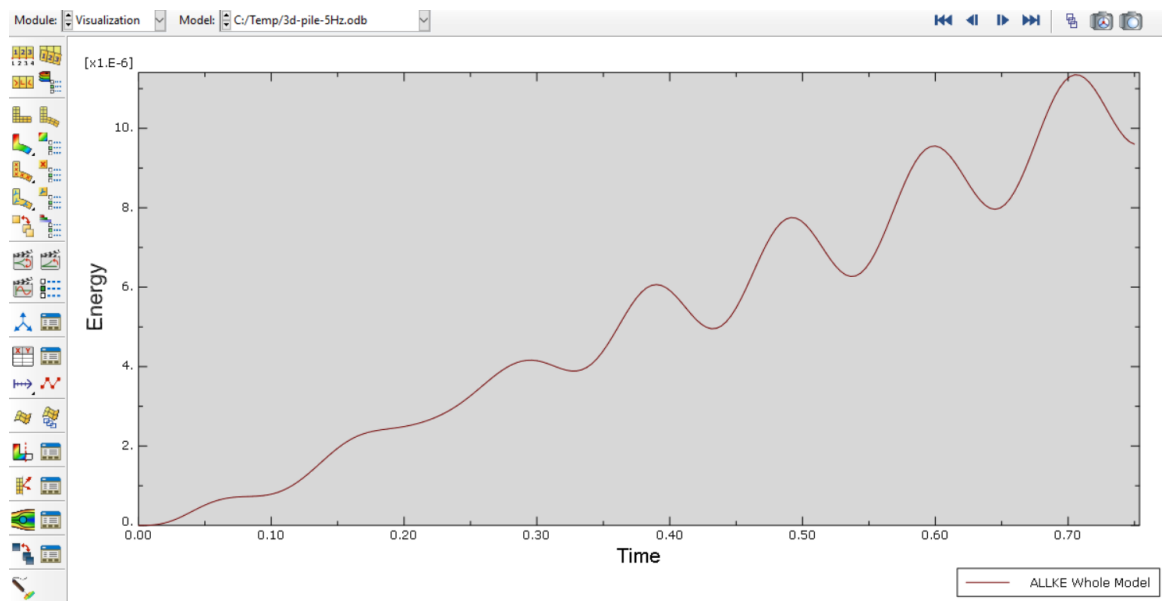


Рисунок 3.27. График изменения кинетических энергий в зависимости от времени для исследования барьера сваи-оболочки.

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 3.26 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.

### 3.5. Сравнение эффективности сплошных и композитных свай

В данном подглаве проведены расчетно-теоретические исследования для сравнения эффективности сплошных и композитных свай.

Расчеты производились численной методике по схеме Лакса-Вендроффа [11], 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 3.28.

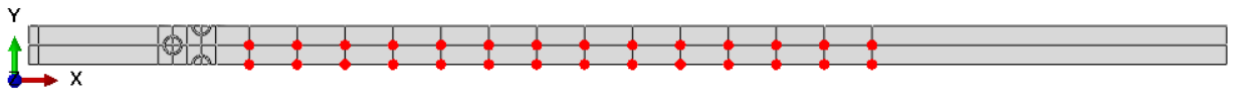


Рисунок 3.28. Модель барьеров для сравнительных исследований сплошных и композитных свай.

По максимальным значениям возникающих магнитуд перемещений в каждой точке наблюдения, вызванных нагрузками, генерируемыми поверхностные волны Рэлея сделаем сравнение сплошных и композитных свай, см. на рисунок 3.29.

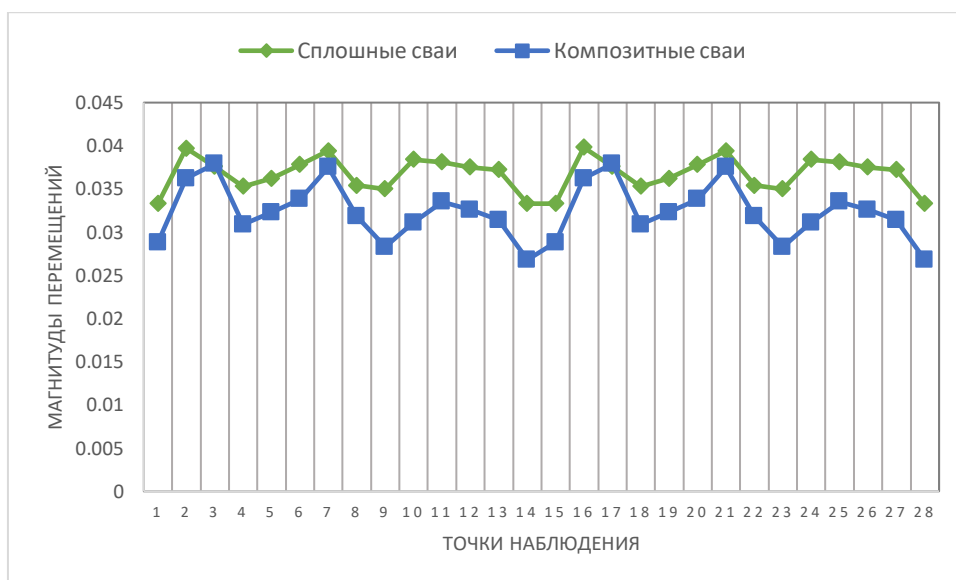


Рисунок 3.29. Магнитуды перемещений в точках наблюдения в сравнительных исследованиях сплошных и композитных свай.

Выведенные графики на рисунке 3.29 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.

### 3.6. Выводы по главе 3

На основании проведенных в настоящей главе расчетов для исследования свайных барьеров различного типа, можно сделать следующие выводы:

- Свайные барьеры в виде свайного поля по расчетно-теоретическим исследованиям в 3.1 доказали свою эффективность в рассеянии энергии поверхностных волн Рэлея. В защищаемой зоне внутри свайного поля интенсивность рэлеевских волн снижена примерно в 1,3 раза.



- По пиковыми значениями коэффициентов редукиции в защищаемой территории внутри свайного поля определены зоны «тени», т.е. зоны ослабления колебаний за барьером, в 3.1.
- Численные результаты расчетных исследований барьеров с разными размерами в 3.2 показали, что 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.
- По полученным данным в 3.2, для модели со сваями большого диаметра территория внутри свайного поля защищена на 4.5 балла, а для модели со сваями небольшого диаметра на 3.5 балла.
- Проведены сравнительные исследования пустых и жестких свай в 3.3, в результате которых стало известно, что свайное поле из стекловолокна работают чуть эффективнее на 0,5 % по сравнению со свайным полем из тяжелого бетона. С учетом стоимости материалов на одну сваю, что стекловолокно в 3 раза дороже чем бетон, можно считать, что в итоге бетонные сваи являются оптимальным решением сейсмической защиты.
- В расчетно-теоретическом исследовании для композитных свай-оболочек в 3.4 была предложена модель барьера в виде металлической оболочки, заполненной гальками с малым трением, главная функция которых - одновременные рассеивания энергии волн на барьерах и поглощения энергии материалом свай.
- В результате проведенных расчетов в 3.4 стало известно, что защитные свойства барьеров зависит от расстояния между барьером и защищаемым объектом. Был найден наиболее оптимальный вариант расположения защищаемого объекта – примерно на расстоянии 50 м за барьером.
- По результатам сравнительных исследований сплошных и композитных свай в 3.5 было обнаружено, что композитные сваи с гальками работают эффективнее на 13,5% сплошных бетонных свай.

## Глава 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ

Оптимизационная задача настоящей главы – это максимизация выгодных параметров барьеров и минимизация расходов материалов.

С точки зрения математики оптимизационная задача – это задача нахождения экстремума целевой функции, управляемые и неуправляемые переменные в которой должны быть оптимизированы одновременно. Задачи решаются итерационным методом с целью получения улучшенного решения [124]. Поиск оптимального значения может быть записан в виде соотношения:

$$X_{k+1} = X_k \pm \Delta X_k \quad (4.1)$$

где знак «+» используется для нахождения максимального значения целевой функции, а знак «-» - для минимального значения.  $X_k$  – значение вектора управляемых параметров.

Приращение вектора управляемых параметров в большинстве случаев вычисляется по формуле:

$$\Delta X_k = \lambda \cdot S(X_k) \quad (4.2)$$

где  $X_k$  – значение вектора управляемых параметров на k-ом шаге,  $\lambda$  – шаг расчета,  $S(X_k)$  – направление поиска экстремума функции.

По наличию или отсутствию ограничений задачи оптимизации и методы их решения могут разделяться на «условные» и «безусловные». Условные с ограничениями характерны для реальных задач. Поскольку условные оптимизации с помощью специальных методов могут быть сведены к задачам без ограничений, безусловные оптимизации также представляет большой интерес.

### 4.1. Обзор методов оптимизации

#### 4.1.1. Безусловная оптимизация. Метод наискорейшего спуска.

В методе наискорейшего спуска, который называется в английской литературе «method of steepest descent», оптимизационные задачи решаются

итерационным численным методом. По данным методом экстремум целевой функции записывается в виде:

$$X^{k+1} = X^k \pm \lambda^k \cdot \bar{S}_k \quad (4.3)$$

где  $\bar{S}_k = \frac{\nabla f(X^k)}{|\nabla f(X^k)|}$  – единичный вектор направления,  $\lambda^k$  – константа величины шага, одинаковая для всех  $i$ -х направлений, которая определяется по одномерной оптимизации в направлении возрастания или убывания функции:

$$\lambda^k \Rightarrow f(x_k \pm \lambda_k \cdot S_k) \rightarrow \text{extr} \quad (4.4)$$

или по решению данного уравнения:

$$\frac{\partial f(X_k \pm \lambda \cdot S_k)}{\partial \lambda} = 0 \quad (4.5)$$

Таким образом, в этом методе поиск экстремума происходит определенными шагами с последовательным улучшением функции.

#### 4.1.2. Условная оптимизация. Метод дихотомии.

Метод дихотомии (в англ. литературе «Dichotomy method-method of division in halves») – метод половинного деления, основанный на последовательном делении отрезка локализации корня пополам.

Метод дихотомии может быть использован для работы с унимодальными функциями. Суть метода заключается в том, что начальный интервал  $[a, b]$  необходимо поделить при помощи средней точки на два подинтервала  $[a, c]$  и  $[c, b]$ , в одном из которых располагается точка минимума функции [125].

Чтобы определить подинтервал для хорошо дифференцируемой функции, следует вычислить в точке  $c$  производную выполнить анализ её знака. Если значение производной больше нуля, то значит точка минимума функции расположена слева от точки  $c$ , т.е. на отрезке  $[a, c]$ . Если же значение производной меньше нуля, то значит, что точка минимума функции расположена справа от точки  $c$ , т.е. на отрезке  $[c, b]$ . А если производная равняется нулю, то это означает, что определена точка минимума функции.

Если же функция является не дифференцируемой, то следует определить направление убывания рассматриваемой унимодальной функции. Для этого нужно

задать точку  $c + h$ , где  $h > 0$  является малой величиной. Далее следует вычислить ординату  $f_0(c + h)$ .

В случае, если приращение функции меньше нуля:

$$\Delta f_0(c) = f_0(c) - f_0(c + h) < 0 \quad (4.6)$$

то точка минимума функции расположена справа от точки  $c$ , т.е. на отрезке  $[c, b]$ .

Если же приращение функции больше нуля:

$$\Delta f_0(c) = f_0(c) - f_0(c + h) > 0 \quad (4.7)$$

то точка минимума функции находится слева от точки  $c$ , т.е. на отрезке  $[a, c]$ .

В случае, когда приращение функции равняется нулю, то это означает, что определена точка минимума.

После того, как выбран подинтервал, в котором расположен минимум функции, к примеру,  $[c, b]$ , следует переопределить левую границу  $a = c$  (при выборе  $[a, c]$  следует изменить правую границу  $b = c$ ) [125].

Если величина отрезка  $[b-a]$  меньше величины допустимой ошибки, то точка минимума найдена. В противном случае следует снова поделить отрезок  $[b-a]$  пополам и опять определить в каком из подинтервалов находится минимум.

Так как интервал, в котором находится корень, уменьшается в 2 раза за каждую итерацию, метод дихотомии позволяет значительно уменьшить объем вычислений в оптимизационной задаче.

#### **4.1.3. Генетические алгоритмы.**

В генетическом алгоритме ГА (в английской литературе genetic algorithm) решения задач оптимизации производится путем последовательного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров по механизму, напоминающему биологическую эволюцию.

Чтобы получить оптимальные решения в сложной комбинаторной задаче, надо правильно установить эволюционные алгоритмы, в которых сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде:

- Особь – наименьшая неделимая единица, являющаяся существующий организм, в теории ГА показываються хромосомами.
- Популяция – конечное множество особей.
- Хромосомы – цепочки последовательности генов.
- Ген – атомарный элемент хромосомы.
- Генотип – набор хромосом данной особи.
- Фенотип – совокупность признаков организма, в теории ГА фенотип представляет собой множеством параметров решения задачи.
- Аллель – значение конкретного гена, от которой зависит наследственный признак.
- Лocus – местоположение данного гена в хромосоме.
- Функция приспособленности – В ГА часто называется целевой функцией.
- Скрещивание (кроссовер, кроссинговер) – операция передачи потомкам признаков родителей, где хромосомы особей обмениваются своими частями. В ГА называется поколением. Т.е. процесс скрещивания в ГА заключается в создании нового поколения, чтобы пробные решения в нем были бы ближе к глобальному экстремуму целевой функции.
- Мутация – случайное изменение одного или нескольких генов в хромосоме для улучшения приспособленности.

Простой эволюционный алгоритм состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Создание начальной популяции

Шаг 2. Скрещивание или мутация

Шаг 3. Селекция

Шаг 4. Формирование нового поколения

Шаг 5. Если достигнут результату

В 70-х годах прошедшего века возникли два разных направления в сфере эволюционных алгоритмов: генетический алгоритм Холланда и эволюционные

стратегии (ЭС) Речёнберга и Швифела, которые моделируют естественную эволюцию с помощью непарной репродукции [128].

ГА кроме в задачах оптимизации применяются при разработке программного обеспечения, в системах искусственных нейронных систем и в других разных отраслях. К настоящему времени по ГА созданы многочисленные программные комплексы, в частности, приложение GeneHunter компании НейроПроект, пакет программного обеспечения Auto2Fit от CPC-X Software, Genesis, MATLAB Genetic Algorithm Toolbox, Neuro-Genetic Optimizer и др.

В работах зарубежных ученых [31] [54] [33] [70] [27] [71] рассмотрены развития теории ГА и практические их применения. В выводах данных исследований было установлено, что ГА могут получить более широкое распространение при интеграции с другими методами и технологиями. А в работах [126, 127] доказана эффективность интеграции ГА и методов теории нечеткости, а также нейронных вычислений и систем .

#### **4.1.4. Методы оптимизации Парето.**

Метода оптимизации Парето предназначены для построения оптимизационных алгоритмов для задач, включающих несколько взаимоисключающих целевых функций. Классический пример связан с минимизацией целевой функции при наличии одного или нескольких ограничений в виде неравенств. Один из известных приемов состоит в ведении множества лагранжевых мультипликаторов, при этом исходная задача становится задачей условной минимизацией (оптимизацией). Решение этой последней задачи во многих случаях неудобно, поскольку требуется отыскание, вообще говоря, многомерной седловой точки. Это, естественно, не позволяет применять технику безусловной оптимизации по отысканию глобального минимума (максимума).

В этой связи, теоретические основы методов оптимизации Парето связаны с введением ограничивающего равенства, отвечающего предельно допустимого значения ограничивающего параметра, и далее отыскания минимума однопараметрической задачи при значении другого параметра, связанного с

ограничивающим равенством. Впервые этот метод был разработан В. Парето (1848-1923) [129].

Рассмотрим  $n$ -мерные множества ( $n$ -мерные векторы) управляющих параметров

$$\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n), \mathbf{b} = (b_1, \dots, b_n) \in R^n \quad (4.8)$$

В выражениях (4.8) предполагается, что  $n$ -мерный вектор  $\mathbf{a}$  доминирует над вектором  $\mathbf{b}$  ( $\mathbf{a} \succ \mathbf{b}$ ), условие доминирования означает, что при условии, когда  $a_i \leq b_i$  при всех  $1 < i < n$  и, кроме того,  $a_i < b_i$  по меньшей мере для одного  $1 < i < n$ . При нарушении этого условия, считается, что условие доминирования не выполняется.

В том случае, когда ( $\mathbf{a} \not\succeq \mathbf{b}$ ) или ( $\mathbf{b} \not\succeq \mathbf{a}$ ), то векторы  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  несравнимы.

В качестве (возможного) решения задачи оптимизации является Парето, принимается подмножество всех, так называемых, точек оптимальности, которые доминируют над всеми другими допустимыми точками  $n$ -мерных множеств. В теории [129] точки оптимальности называются точками фронта Парето, рисунок 4.1.

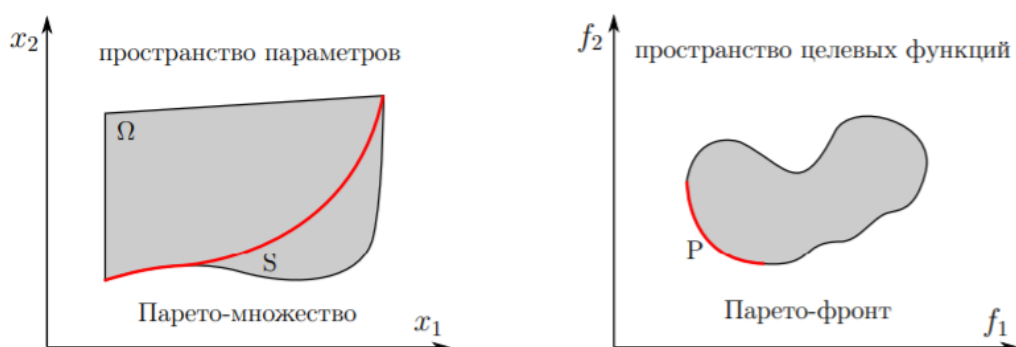


Рисунок 4.1. Множество оптимальных параметров Парето (слева); Парето-фронт (справа) [129].

Здесь надо отметить, что решение задачи Парето (Парето фронт) представляет собой, как правило, некоторое множество допустимых значений параметров, что, принципиально отличает решение задачи Парето от задач

безусловной оптимизации. В заключительном замечании отметим, что во многих практически важных случаях Парето фронт представляет собой компактное подмножество в множестве управляющих параметров [129].

Таким образом, в отличие от однокритериальной задачи, ответом является не одна точка, а множество точек. В Парето-множестве точки не сравнимы между собой, т.е. все решения задачи равнозначны.

Для решения задач многокритериальной оптимизации существуют три формулировки – локальная, глобальная и интерактивная. Локальная: Найти одно Парето-оптимальное решение, ближайшее к заданной начальной точке, см. на рисунок 4.2.а. Глобальная: Найти конечное множество Парето-оптимальных решений, достаточно хорошо описывающее истинный Парето-фронт, см. на рисунок 4.2.б.

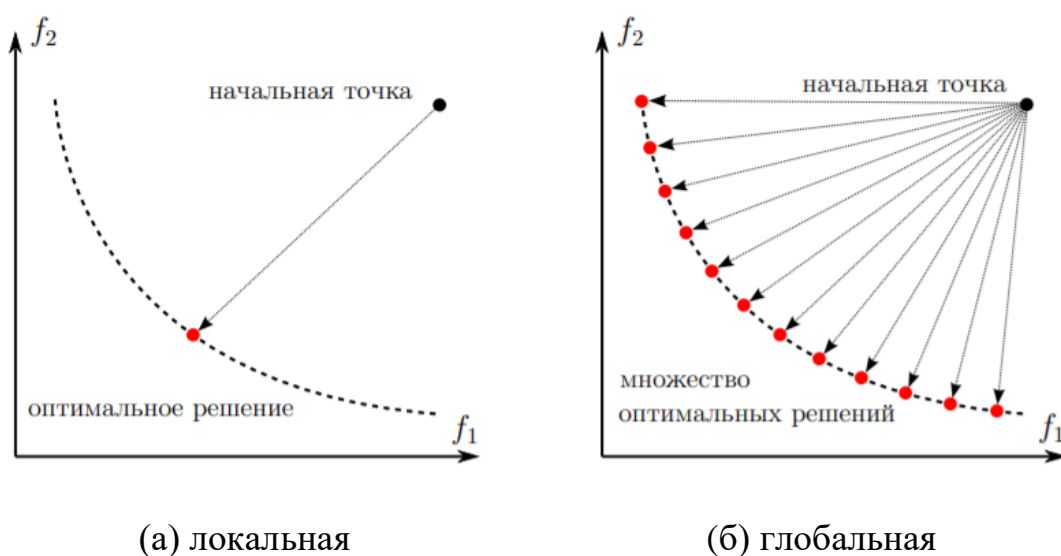


Рисунок 4.2. Формулировки многокритериальной задачи [48].

Формулировка «интерактивная» предполагает участие в процессе решения эксперта-человека, принимающего решения и разбирающегося в предметной области, алгоритм которой – предоставить эксперту вспомогательную информацию о текущем решении (например, насколько увеличится одна из целевых функций, если попытаться уменьшить другую), и возможность выразить свои предпочтения (например, тем или иным образом классифицировать целевые



функции в данной точке). Предпочтения эксперта затем учитываются при нахождении следующего решения, информация о котором также предоставляется пользователю. Подробнее с интерактивным алгоритмом можно познакомиться, например в [48].

В дальнейшем решение задачи оптимизации геометрических параметров сплошных свайных барьеров осуществляется с помощью Парето оптимизации на глобальной формулировке с ограничениями длины и поперечного диаметра свай.

#### 4.2. Решение задачи оптимизации геометрических параметров свайного барьера методом Парето оптимизации

Поставим задачу поиска оптимального расстояния между осями свай  $L_{bar}$  (рисунок 4.3), при фиксированной длине  $h_{bar} = 12\text{м}$  и поперечном диаметре  $d_{bar} = 1\text{м}$ , для решения которой порождаются две взаимоисключающие целевые функции:

$$L_{bar}(\tilde{x}), M_{disp}(\tilde{x}) \quad (4.9)$$

где  $L_{bar}(\tilde{x})$  – шаг барьеров,  $M_{disp}(\tilde{x})$  – магнитуды перемещений и  $\tilde{x}$  – переменные, определяющие эти функции.

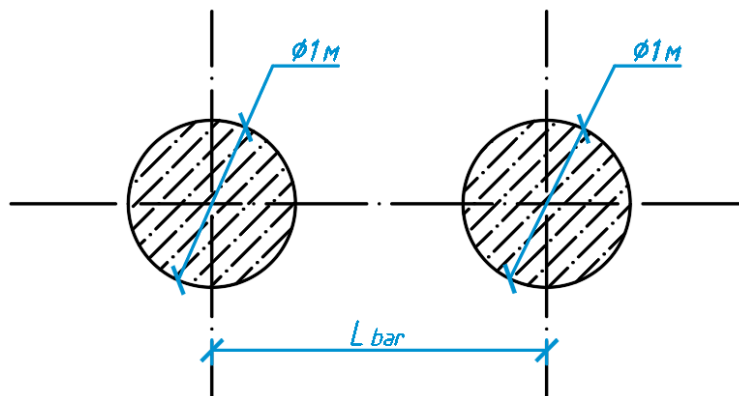


Рисунок 4.3. Расстояние между осями свай.

При заданном поперечном диаметре  $d_{bar}$  расстояние между осями свай  $L_{bar}$  равняется:

$$L_{min} = d_{bar} + 1, L_1 = d_{bar} + 1.1, L_2 = d_{bar} + 1.2, \dots L_{max} = d_{bar} + \Delta_L \quad (4.10)$$

Иными словами, это есть задача математического программирования следующего вида: максимизировать шаг барьеров  $L_{bar}$  с последующим приращением  $\Delta_L$ , при условиях (4.12) и при этом не ухудшать защитные свойства барьеров по магнитудам перемещений, т.е. минимизировать  $M_{disp}$ .

Если анализировать спектрограммы и велоситиграммы, полученных метеорологическими организациями в разных странах, многочисленные исследования, в частности [58] [18] показывают, что пиковые значения амплитуд колебаний находятся при частотах в диапазоне от 1 до 20 Гц, в том числе, основные колебания проходят на частотах от 5 до 15 Гц. Основываясь на этом, круговая частота волны Рэлея в нашей задаче оптимизации полагается постоянной, что она равна  $\omega = 10$  Гц.

В качестве материала барьера принят однородный композит – бетон, а материалом среды принят песчаный грунт.

Целевая функция шага барьеров является функцией следующих параметров:

$$L_{bar}(d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L) \quad (4.11)$$

При заданных параметрах барьеров и круговой частоте целевая функция магнитуд перемещений приобретает вид:

$$M_{disp}(\tilde{E}, \tilde{\rho}, d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L) \quad (4.12)$$

где в соответствии с  $\pi$ -теоремой [32] относительный модуль упругости  $\tilde{E} = \frac{E_{bar}}{E_{soil}}$ , относительная плотность материала барьера  $\tilde{\rho} = \frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}}$ , здесь  $E_{soil}, E_{bar}$  – модули упругости материала грунта и барьера соответственно,  $\rho_{soil}, \rho_{bar}$  – плотности материала грунта и барьера соответственно.

По одним из методов Парето-оптимизации с ограничениями в виде неравенств [45], исходная задача нахождения максимального расстояния между сваями при ограничении на магнитуд перемещений представляется в виде:

$$\max_L(L_{bar}(d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L)) @ M_{disp}(\tilde{E}, \tilde{\rho}, d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L) \leq M_0 \quad (4.13)$$

В уравнении (4.13)  $M_0$  предельно допустимые значения магнитуд перемещений.

Решение задачи (4.13) осуществимо с помощью метода множителей Лагранжа и его обобщения с помощью условий Кунна-Таккера [23] [12]. Вводя положительные множители Лагранжа  $\alpha$  для (4.13) получим необходимые условия экстремума:

$$\begin{aligned} \nabla(L_{bar}(d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L) + \alpha M_{disp}(\tilde{E}, \tilde{\rho}, d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L)) &= 0 \\ \lambda(M_{disp}(\tilde{E}, \tilde{\rho}, d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L) - M_0) &= 0, \quad \alpha \geq 0. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Достаточным условием максимума является отрицательная определённость квадратичной формы:

$$\forall x \in X, x \neq 0 \quad xHx^t < 0, \quad (4.15)$$

где  $x$  – вектор аргументов функции,  $X$  – область значений аргументов функции,  $H$  – матрица Гёссе функции  $H_1 = L_{bar}(d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L) + \alpha M_{disp}(\tilde{E}, \tilde{\rho}, d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L)$ ,  $H = \nabla_x \nabla_x (H_1(\tilde{E}, \tilde{\rho}, d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L))$ , где вектор  $x = (\tilde{E}, \tilde{\rho}, d_{bar}, h_{bar}, \Delta_L)$  обозначает пространство аргументов функции  $H_1$ .

Так как, задача оптимизации относится к нахождению оптимального геометрического параметра барьера, условие (4.13) может упрощаться к виду:

$$\max_L(L_{bar}(\Delta_L)) @ M_{disp}(\Delta_L) \leq M_0 \quad (4.16)$$

с достаточным условием максимума:

$$\forall x \in X, x \neq 0 \quad xHx^t < 0, \quad (4.17)$$

где  $H = \nabla_x \nabla_x (H_1(\Delta_L))$  и  $H_1 = L_{bar}(\Delta_L) + \alpha M_{disp}(\Delta_L)$ ,  $x = (\Delta_L)$  и  $X$  – рассматриваемая область значений  $\Delta_L$ .

Для решения задачи оптимизации (4.16) и уравнения (4.17) их можно переписать в разностной форме:

$$\frac{L_{bar}(\Delta_L) + \alpha (M_{disp}(\Delta_L))}{\Delta(\Delta_L)} = 0 \quad (4.18)$$

Проверочное условие отрицательной определённости принимает вид:

$$\frac{L_{bar}(\Delta_L) + \alpha (M_{disp}(\Delta_L))}{\Delta(\Delta_L)} < 0 \quad (4.19)$$

Таким образом, определение  $L_{bar}$  решением уравнения (4.18) дает оптимальный выбор расстояния между сваями.

На основании расчета с использованием данного метода, для сплошных барьеров из бетона получаются следующие оптимальные расстояния между сваями при ограничении  $M_0$ :

Таблица 4. Результаты расчета Парето-оптимизации для свайных барьеров.

	$h_{bar}$ , м	$d_{bar}$ , м	$L_{bar}$ , м	$M_{disp}$
Сплошной барьер	12	1	7,5 (при $\Delta_L=6,5$ )	$1,02271 \cdot 10^{-7}$

Графическое представление зависимости шага барьеров и магнитуд перемещений из вычисления программного комплекса Abaqus 6.14 показано на рисунке 4.4.

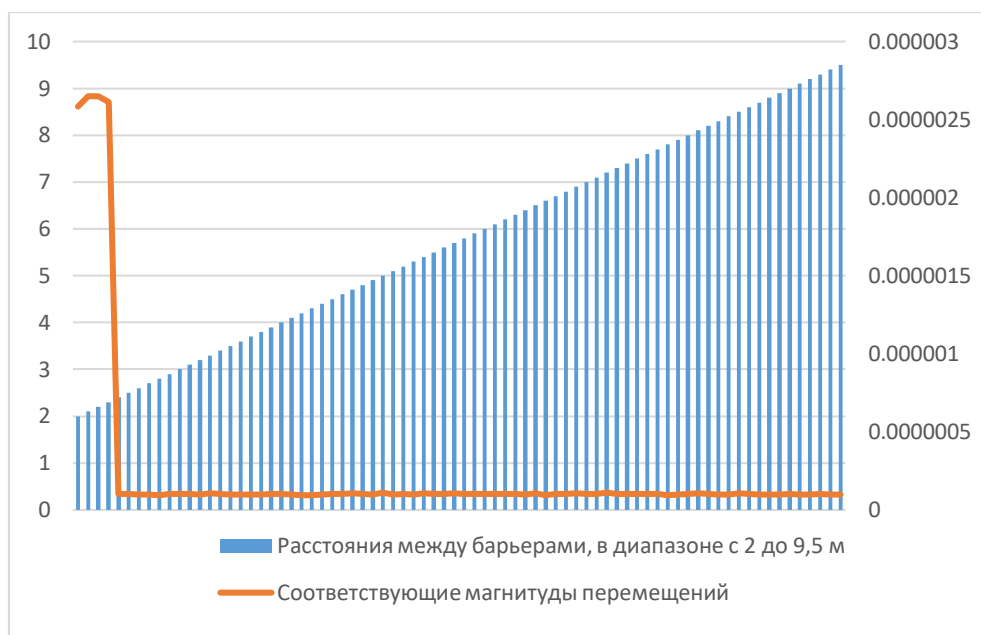


Рисунок 4.4. График зависимости магнитуд перемещений от расстояний между барьерами.

Из графики зависимости 4.4 вытекает парето-гистограмма, представляющая относительную долю каждой критерии, т.е. расстояния между сваями и магнитуд перемещений, см. на рисунок 4.5.

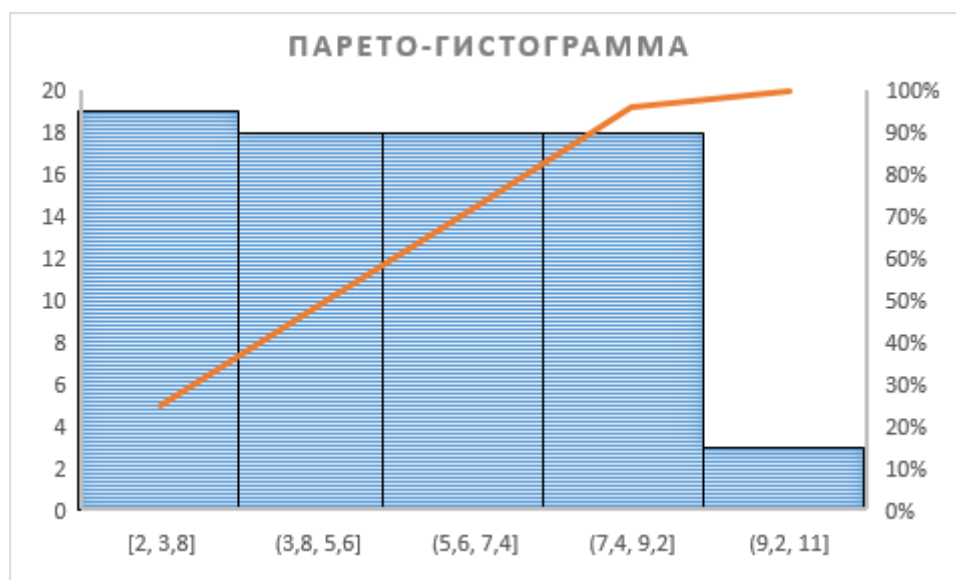


Рисунок 4.5. Парето-гистограмма для задачи оптимизации  $L_{bar}$ .

К области эффективности 80-90% принадлежит диапазон  $7,4 \div 9,2$ , который является парето-оптимальным. Дальнейшее увеличение  $L_{bar}$  от 9,2 м не приводит к высокой эффективности, потому что при одной и той же интенсивности

сейсмической нагрузки его защитные свойства уменьшаются, значит решение будет неоптимальным.

#### **4.3. Выводы по главе 4**

Приведенные в настоящей главе обзоры различных методов оптимизации позволили более подробно описать процесс выбора и нахождения оптимальных значений проектных параметров для наилучшего результата, которые зависят от каждой конкретной задачи.

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.

Для решения задачи оптимизации геометрических параметров свайного барьера предложена методика на парето-принципе для подбора оптимального расстояния между барьерами при возможных ограничениях других геометрических параметров барьеров.

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  $7,4 \div 9,2$  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 свай, 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 [116], [117].

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Wang C., Truesdell C. Introduction to Rational Elasticity / C. Wang, C. Truesdell, Springer Science & Business Media, 1973. – 578 с.
2. Bernard M. La construction du Pont Vasco da Gama // Travaux. – 1998. – N 743. – С. 18-20.
3. Арутюнян Р. В. [и др.]. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» / Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. А. Боровой, Е. П. Велихов, - Москва: Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2018. – 408 с.
4. Бончковский В. Ф. Землетрясение в Ашхабаде // Вестник АН СССР. – 1948. – N (12). – С. 18-19.
5. Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // Успехи физических наук. – 1967. – N 7 (92). – С. 517-526.
6. Домбровский Ю. Хранитель древностей / Ю. Домбровский, М. Советская Россия, 1966. – 256 с.
7. Ершов А. Резонаторы во спасение: как предотвращают землетрясения [Электронный ресурс] // Популярная механика. – Режим доступа: <https://www.techinsider.ru/science/429622-rezonatory-vo-spasenie-kak-predotvrashchayut-zemletryaseniya/>
8. Жавхлан С. Влияние свайных барьеров на рассеяние сейсмических волн Рэлея // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2021. – N 54 (5). – С. 40-44.
9. Казанцев М. М. Как спасти Алматы от разрушительного землетрясения [Электронный ресурс] // Мегополис. – 2011. – N 11. – Режим доступа: <https://чс-ник.kz/about-earthquakes/govoryat-pishut/item/85-kak-spasti-gorod-ot-zemletryaseni-j-prodolzhenie>
10. Кузнецов С. В., Терентьева Е. О. Задача Лэмба: обзор и анализ методов исследования // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2014. – N 1 (10). – С. 78-92.

11. Миньков Л. Л., Шрагер Э. Р. Основные подходы к численному решению одномерных уравнений газовой динамики – Томск: СТУ, 2016. – С. 31-33.
12. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин, Наука. Главная редакция физико-механической литературы, 1982. – 256 с.
13. Рустанович Д. Н. Сейсмичность территории Туркменской ССР и Ашхабадское землетрясение / Д. Н. Рустанович, Москва: Наука, 1967. – 95 с.
14. Achenbach J. D. Wave Propagation in Elastic Solids / J. D. Achenbach, North-Holland Publishing, 1973. – 425 с.
15. Ahmad S., Al-Hussaini T. M. Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-Filled Trenches // Journal of Geotechnical Engineering. – 1991. N 1 (117). – С. 67-88.
16. Alzawi A., El Naggar M. Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (GeoFoam) wave barriers // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2011. – N (31). – С. 306-317.
17. Andersen L., Nielsen S. R. K. Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2005. – N 7 (25). – С. 701-716.
18. Atkinson G. Erratum to “The high-frequency shape of the source spectrum for earthquakes in Eastern and Western Canada” // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1996. N 1A (86). – С. 106-112.
19. Barkan D. D. Dynamics of Bases and Foundations / D. D. Barkan, New York: McGraw-Hill Book Co., 1962. – 434 с.
20. Bessa M. [и др.]. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, Second Edition. Solution Manual / M. Bessa, K. I. Elkhodary, W. K. Liu, T. Belytschko, B. Moran, John Wiley & Sons, 2014. – 804 с.
21. Bo Q., Ali L., Irini D.-M. Numerical study of wave barrier and its optimization design // Finite Elements in Analysis and Design. – 2014. – N (84). – С. 1-13.

22. Bornitz G. Über die Ausbreitung der von Großkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe / G. Bornitz, 1931<sup>st</sup> edition-е изд., Berlin: Springer, 1931. – 48 с.
23. Boyd S. Vandenberghe L. Convex Optimization / S. Boyd, L. Vandenberghe, 1-е изд., Cambridge University Press, 2004. – 716 с.
24. Buonsanti M. [ и др.]. Mitigation of Railway Traffic Induced Vibrations: The Influence of Barriers in Elastic Half-Space // Advances in Acoustics and Vibration. – 2009. – 7 с.
25. Chadwick P., Smith G. Foundations of the Theory of Surface Waves in Anisotropic Elastic Materials // Advances in Applied Mechanics. – 1977. – N (17). – С. 303-376.
26. Chapman C. H. Fundamentals of Seismic Wave Propagation / C. H. Chapman, Cambridge University Press, 2004. – 608 с.
27. Coffin D., Smith R. E. Linkage Learning in Estimation of Distribution Algorithms Studies in Computational Intelligence / под ред. Y. Chen, M.-H. Lim, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. – С. 141-156.
28. Djeran-Maigre I., Kuznetsov S. Solitary SH Waves in two-layered traction-free plates // Comptes Rendus Mécanique. – 2008. – N 1-2 (336). – С. 102-107.
29. El Naggar M. H., G C. Vibration barriers for shock-producing equipment // Canadian Geotechnical Journal. – 2005. – N (42). – С. 297-306.
30. Emad K., Manolis G. D. Shallow Trenches and Propagation of Surface Waves // Journal of Engineering Mechanics. – 1985. N 2 (111). – С. 279-282.
31. Gerges F., Zouein G., Azar D. Genetic Algorithms with Local Optima Handling to Solve Sudoku Puzzles Chengdu, China: ACM Press, 2018. – С. 19-22.
32. Gibbings J. C. Dimensional Analysis / J. C. Gibbings, London: Springer London, 2011. – 297 с.
33. Harik G. R., Lobo F. G., Sastry K. Linkage Learning via Probabilistic Modeling in the Extended Compact Genetic Algorithm (ECGA) Studies in Computational Intelligence / под ред. M. Pelikan, K. Sastry, E. CantúPaz, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. – С. 39-61.

34. Itoh K. Physical Modelling of Wave Propagation from Ground Vibration and Vibration Countermeasures, 2003.
35. Itoh K. [и др.]. Centrifuge Simulation of Wave Propagation due to Vertical Vibration on Shallow Foundations and Vibration Attenuation Countermeasures // Journal of Vibration and Control. – 2005. N 6 (11). – С. 781-800.
36. Kim S.-H., Das M. P. Artificial seismic shadow zone by acoustic metamaterials // Modern Physics Letters B. – 2013. N 20 (27). – С. 135-140.
37. Kukudzhanov V. N. Numerical Continuum Mechanics: / V. N. Kukudzhanov, Berlin: DE GRUYTER, 2012. – 425 с.
38. Kuznetsov S. V. “Forbidden” planes for Rayleigh waves // Quarterly of Applied Mathematics. – 2002. – N 1 (60). – С. 87-97.
39. Kuznetsov S. V. A new principle for protection from seismic waves // in Proceedings of the International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Japan: 2009. – С. 463-468.
40. Kuznetsov S. V. Seismic waves and seismic barriers // Acoustical Physics. – 2011. – N 3 (57). – С. 420-426.
41. Kuznetsov S. V. Seismic waves and seismic barriers // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2012. – N 1 (8). – С. 87-95.
42. Kuznetsov S. V., Nafasov A. E. Horizontal Acoustic Barriers for Protection from Seismic Waves // Advances in Acoustics and Vibration. – 2011. – С. 1-8.
43. LeVeque R. J. Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems 2002. – С. 64-86.
44. Maradudin A. A., Mills D. L. Attenuation of Rayleigh surface waves by surface roughness // Applied Physics Letters. – 1976. N 10 (28). – С. 573-575.
45. Marler R. T., Arora J. S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2004. – N 6 (26). – С. 369-395.
46. May T. W. The effectiveness of trenches and scarps reducing seismic energy 1980.
47. May T. W., Bolt B. A. The effectiveness of trenches in reducing seismic motion // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 1982. – N 2 (10). – С. 195-210.

48. Miettinen K., Ruiz F., Wierzbicki A. P. Introduction to Multiobjective Optimization: Interactive Approaches Lecture Notes in Computer Science / под ред. J. Branke [и др.], Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. – С. 27-57.
49. Motamed R. [и др.]. Evaluation of Wave Barriers on Ground Vibration Reduction through Numerical Modeling in Abaqus, // 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering , 2009. – С. 402-441.
50. Newmark N. M., Rosenblueth E., Pao Y.-H. Fundamentals of Earthquake Engineering // Journal of Applied Mechanics. – 1972. – N 2 (39). – С. 366-366.
51. Norris A. N., Johnson D. L. Nonlinear Elasticity of Granular Media // Journal of Applied Mechanics. – 1997. N 1 (64). – С. 39-49.
52. Papageorgiou A. S., Aki K. A. Specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Part I. Description of the model // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1983. N 3 (73). – С. 693-722.
53. Papageorgiou A. S., Aki K. A. Specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Part II. Applications of the model // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1983. – N 4 (73). – С. 953-978.
54. Patrascu M., Stancu A. F., Pop F. HELGA: a heterogeneous encoding lifelike genetic algorithm for population evolution modeling and simulation // Soft Computing. – 2014. – N 12 (18). – С. 2565-2576.
55. Pecker A. Aseismic foundation design process lessons learned from two major projects : The Vasco Da Gama and the Rion-Antirion Bridges // Proc. Fifth ACI International Conference on Seismic Bridge Design and Retrofit for Earthquake Resistance, La Jolla, California:, 2003.
56. Qiu B. Numerical study on vibration isolation by wave barrier and protection of existing tunnel under explosions: дис. ... д-ра филос. наук: NNT: 2014ISAL0011 / Bo Qiu. - INSA de Lyon, 2014. – 192 с.

57. Richart F. E., Hall J. R., Woods R. D. *Vibrations of soils and foundations* / F. E. Richart, J. R. Hall, R. D. Woods, Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1970. – 414 c.
58. Sato T., Murono Y., Nishimura A. Phase Spectrum Modeling to Simulate Design Earthquake Motion // *Journal of Natural Disaster Science*. – 2002. – N 2 (23). – C. 91-100.
59. Segol G., Lee P., Abel J. F. Amplitude reduction of surface waves by trenches // *J. Eng. Mech. Div., ASCE*. – 1978. – N (104). – C. 621-641.
60. Shen J., Maradudin A. A. Multiple scattering of waves from random rough surfaces // *Physical Review B*. – 1980. – N 9 (22). – C. 4234-4240.
61. Shrivastava R. K., Kameswara Rao N. S. V. Response of soil media due to impulse loads and isolation using trenches // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2002. – N 8 (22). – C. 695-702.
62. Sobczyk K. Scattering of Rayleigh waves at a random boundary of an elastic body // *Proc. Vibr. Problems*. – 1966. N 4 (7). – C. 363-374.
63. The Lord Rayleigh ADDRESS by THE RIGHT HON. LORD RAYLEIGH, M.A., D.C.L, F.R.A.S., Proffesor of Experimental Physics in the University of Cambridge, PRESIDENT London: John Murray, Albemarle Street, 1884. – C. 3-23.
64. Truesdell C. Hypo-elasticity // *Journal of Rational Mechanics and Analysis on JSTOR*. – 1955. – N (4). – C. 83-133, 1019-1020.
65. Truesdell C., Toupin R. The Classical Field Theories *Encyclopedia of Physics / Handbuch der Physik / под ред. S. Flügge*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1960. – C. 226-858.
66. Weerheijm J., Vegt I. Fracture mechanics of concrete and concrete structures. Review of test methods and data comparison // *Proceedings of FraMCoS-7*, Jeju, Korea, : 2010.
67. Woods R. D. Screening of Surface Waves in Soils // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*. – 1968. N (94). – C. 951-979.

68. Yang Y. B., Hung H. H., Chang D. W. Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2003. – N 4 (23). – С. 263-278.
69. Zabolotskaya E. A. [и др.]. Green's functions for a volume source in an elastic half-space // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2012. – N 3 (131). – С. 1831-1842.
70. Zervoudakis K., Tsafarakis S. A mayfly optimization algorithm // *Computers & Industrial Engineering*. – 2020. – N (145). – С. 106-559.
71. Zhang J., Chung H. S.-H., Lo W.-L. Clustering-Based Adaptive Crossover and Mutation Probabilities for Genetic Algorithms // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. – 2007. – N 3 (11). – С. 326-335.
72. Time Haiti: tragedy and hope под ред. В. Clinton, R. Stengel, Time Inc. Home Entertainment, New York: Time Books, Time Inc, 2010. – 80 с.
73. АЭС Мааншан — Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/АЭС\\_Мааншан](https://ru.wikipedia.org/wiki/АЭС_Мааншан)
74. The MW 7.0 Haiti Earthquake of January 12, 2010: USGS/EERI Advance Reconnaissance Team Report [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pubs.usgs.gov/of/2010/1048/>
75. Kuznetsov S., Malgre H. Granular metamaterials for seismic protection. Hyperelastic and hypoelastic models // *J. Phys.: Conf. Ser.* 1425 012184.
76. Ewing W. M. et al. Elastic waves in layered media // *Physics Today*. – 1957. – N 10. – С. 27.
77. Kramer S. L. Geotechnical earthquake engineering. In prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics // Prentice-Hall, New Jersey. – 1996.
78. Пузырев Н. Н., Оболенцева И. Р. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. – 1997.
79. Massarsch K. R. Vibration isolation using gas-filled cushions // *Soil dynamics symposium in honor of professor Richard D. Woods*. – 2005. – С. 1-20.



80. Love A. E. Some Problems of Geodynamics: Being an Essay to which the Adams Prize in the University of Cambridge was Adjudged in 1911. – CUP Archive, 1911. – 212 c.
81. Sobczyk K. Scattering of Rayleigh waves at a random boundary of an elastic body // Proceedings of Vibration Problems. - 1966. – N 7 (4). – C. 363-374.
82. Maradudin A. A., Mills D. L. The attenuation of Rayleigh surface waves by surface roughness // Annals of Physics. – 1976. – N 100 (1-2). – C. 262-309.
83. Shen J., Maradudin A. A. Multiple scattering of waves from random rough surfaces // Physical Review B. – 1980. N 22 (9). – C. 4234.
84. Goldstein R. V., Lewandowski J. Surface roughness induced attenuation and changes in the propagation velocity of long Rayleigh-type waves // Acta mechanica. – 1992. – N 91 (3-4). – C. 235- 243.
85. Ostoja-Starzewski M. Propagation of Rayleigh, Scholte and Stoneley waves along random boundaries // Probabilistic engineering mechanics. 1987. – N 2 (2). – C. 64-73.
86. Knopoff L. Scattering of compression waves by spherical obstacles // Geophysics. – 1959. - N 24 (2). – C. 30-39.
87. Knopoff L. Scattering of shear waves by spherical obstacles // Geophysics. – 1959. – N 24 (2). – C. 209-219.
88. Pao Y. H., Mow C. C. Scattering of plane compressional waves by a spherical obstacle // Journal of Applied Physics. – 1963. – N 34 (3). – C. 493-499.
89. Hudson J. A., Knopoff L. Transmission and reflection of surface waves at corner: 2. Rayleigh waves (theoretical) // Journal of Geophysical Research. – 1964. – N 69 (2). – C. 281-289.
90. Pilant W. L., Knopoff L., Schwab F. Transmission and reflection of surface waves at a corner: 3. Rayleigh waves (experimental) // Journal of Geophysical Research. - 1964. – N 69 (2). – C. 291-297.
91. Trifunac M. D. Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. – 1972. – N. 1 (3). – C. 261-281.

92. Wong H. L., Trifunac M. D. Scattering of plane SH waves by a semi-elliptical canyon // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. – 1974. – N 3 (2). C. 157-169.
93. Lee V. W. A note on the scattering of elastic plane waves by a hemispherical canyon // *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 1982. – N 1 (3). – C. 122-129.
94. Angel Y. C., Achenbach J. D. Reflection and transmission of obliquely incident Rayleigh waves by a surface-breaking crack // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 1984. – N 75 (2). – C. 313-319.
95. Mendelsohn D. A., Achenbach J. D., Keer L. M. Scattering of elastic waves by a surface-breaking crack // *Wave motion*. – 1980. – N 2 (3). – C. 277-292.
96. Karlström A., Boström A. Efficiency of trenches along railways for trains moving at sub-or supersonic speeds // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2007. – N 27 (7). – C. 625-641.
97. Avilés J., Sánchez-Sesma F. J. Piles as barriers for elastic waves // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1983. – N 109 (9). – C. 1133-1146.
98. Avilés J., Sánchez-Sesma F. J. Foundation isolation from vibrations using piles as barriers // *Journal of Engineering Mechanics*. – 1988. – N 114 (11). – C. 1854-1870.
99. Coulier P. et al. Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a stiff wave barrier in the soil // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – N 77. – C. 238-253.
100. Aboudi J. The motion excited by an impulsive source in an elastic half-space with a surface obstacle // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1971. – N 61 (3). – C. 747-763.
101. Aboudi J. Elastic waves in half-space with thin barrier // *Journal of the Engineering Mechanics Division*. – 1973. – N 99 (1). – C. 69-83.
102. Fuyuki M., Matsumoto Y. Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1980. – N 70 (6). – C. 2051-2069.

103. Banarjee P. K., Ahmad S., Chen K. Advanced application of bem to wave barriers in multi-layered three-dimensional soil media // Earthquake engineering and Structural dynamics. -1988. – N 16 (7). – C. 1041-1060.
104. Ekanayake S. D., Liyanapathirana D. S., Leo C. J. Attenuation of ground vibrations using in-filled wave barriers // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2014. – N 67. – C. 290-300.
105. Jesmani M., Fallahi A. M., Kashani H. F. Effects of geometrical properties of rectangular trenches intended for passive isolation in sandy soils // Earth Science Research. – 2012. – N 1 (2). –C. 137.
106. Wang J. G., Sun W., Anand S. Numerical investigation on active isolation of ground shock by soft porous layers // Journal of sound and vibration. – 2009. – N 321 (3-5). – C. 492-509.
107. Krieg R. D. A simple constitutive description for cellular concrete. – Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1972.
108. Connolly D., Giannopoulos A., Forde M. C. Numerical modelling of ground borne vibrations from high speed rail lines on embankments // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2013. – N 46. – C. 13-19.
109. Roy R. K. A primer on the Taguchi method // Society of Manufacturing Engineers, 2010.
110. Kuznetsov S. V. Subsonic Lamb waves in anisotropic plates // Quart. Appl. Math. – 2002. – N 60. – C. 577-587.
111. . Kuznetsov S. V. Surface waves of non-Rayleigh type // Quart. Appl. Math. – 2003. – N 61 (3). – C. 575-582.
112. Barnett D. M., Lothe J. Consideration of the existence of surface wave (Rayleigh wave) solutions in anisotropic bicrystals // Journal of physics F: metal physics. – 1974. – N 4 (5). – C. 671.
113. Barnett D. M., Lothe J. An image force theorem for dislocations in anisotropic bicrystals // Journal of Physics F: metal physics. – 1974. – N 4 (10). – C. 1618.

114. Barnett D. M. Synthesis of the sextic and integral formalism for dislocations, Greens function and surface waves in anisotropic elastic solids // *Physica norvegica*. – 1973. - N 7. – С. 13-19.
115. Lothe J., Barnett D. M. On the existence of surface-wave solutions for anisotropic elastic half-spaces with free surface // *Journal of Applied Physics*. – 1976. – N 47 (2). – С. 428-433.
116. Жавхлан С. Сейсмические барьеры: Современное состояние и перспективы развития // *Архитектура и строительство России*. - 2019. – N 2 (230). – С. 118-120.
117. Гольдштейн Р. В., Кузнецов С. В. Континуальные модели в динамике гранулированных сред. Обзор // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2015. – N 8 (1). – С. 35-59.
118. Жавхлан С. Обзор территориальных методов сейсмической защиты // сб. трудов международной молодежной научной конференции «XLV Гагаринские чтения», секции «Механика и моделирование материалов и технологий». Москва: ИПМех РАН. – 2019. – С. 78-80.
119. Жавхлан С. Свайные барьеры от поверхностных сейсмических волн // материалы II всероссийской научно-практической конференции «Технологическое предпринимательство, коммерциализация результатов интеллектуальной деятельности и трансфер технологий». Пермь: ПНИПУ. – 2021. – С. 109-115.
120. 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.
121. Кравцов А. В., Кузнецов С. В., Секерж-Зенькович С. Я. Конечноэлементные модели в задаче Лэмба // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. – 2011. – N (6). – С. 166-175.
122. Zhang J., Andrus R. D., Juang C. H. Normalized shear modulus and material damping ratio relationships // *Journal of Geoenvironmental Engineering*. – 2005. – N 131 (4). – С. 453-464.

123. Пуценко К. Н., Никишина О. В. Сравнительный обзор методов строительства в сейсмоопасных районах // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2013. – N 2 (5). – С. 100-107.
124. Моделирование в электроэнергетике – Оптимизационные задачи. Общие сведения [Электронный ресурс] // Simulation in Energy Systems. – 2016-2022. - Режим доступа: <http://simenergy.ru/mathematical-analysis/equations/optimization-methods>
125. Асламова В. С., Васильев И. В., Засухина О. А. Оптимизация технологических процессов. Часть 1. / Учебное пособие. – Ангарск: АГТА, 2005. – 104 с.
126. Heinz Muehlenbein 6. Genetic Algorithms / под ред. Emile Aarts, Jan Karel Lenstra, - США: Princeto University Press, 2018. – С. 137-173.
127. Bramer M. Principles of Data Mining / M. Bramer. – London: Springer-Verlag London Limited, 2007. – 342 с.
128. Барсегян А. А., Куприянов М. С. и др. Технологии анализа данных. / Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP. Изд.: БХВ-Петербург, 2007. – 384 с.
129. Пересторонина Н. О. Новый метод многокритериальной оптимизации, основанный на локальной геометрии множества Парето: ВКР на степень магистра, Московский физико-технический институт. – Москва, 2013. – 33с.
130. Сапарлиев Х. М. Уравнения движения и волновые поля / Х. М. Сапарлиев // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований, 2016. – N22. – С. 111-132.
131. Сапарлиев Х. М. Основные типы сейсмических волн / Х. М. Сапарлиев, Н. Нургельдыев // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований, 2015. – N18. – С. 17-26.
132. Викулин А. В. Введение в физику Земли / Учебное пособие для геофизических специальностей вузов. Петропавловск – Камчатский: КГПУ, 2004. – 409 с.

133. Nakano H. Some problems concerning the propagations of the disturbances in  
nd on semi-infinite elastic solid // Geophysical Magazine. – 1930. - N (2). – С.  
189-348.
134. Алешкевич В. А., Деденко Л. Г. и Караев В. А. Курс общей физики.  
Механика / под ред. В. А. Алешкевича. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. - 472 с.
135. Кузнецов С. В. и Терентьева Е. О. Волновые поля и области  
доминирования для внутренней задачи Лэмба // Известия Российской  
академии наук. Механика твердого тела. – 2015. – N 5. – С. 33-47.
136. Захаров В. С., Смирнов В. Б. Физика Земли. М.: ИНФРА-М, 2016. – 328  
с.