

На правах рукописи



**ДУДЧЕНКО АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ**

**АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ  
СЕСМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ ПРИ УЧЁТЕ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ**

Специальность: 01.02.04 - «механика деформируемого твёрдого тела»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2018

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

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

Официальные оппоненты: **Галыбин Александр Николаевич**  
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, I Отделение: Планетарной геофизики и гео динамики, Лаборатория геомеханики (104), г. Москва,

**Захаров Дмитрий Дмитриевич**,  
кандидат физико-математических наук, доцент, кафедры математического анализа (федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Российский университет транспорта (МИИТ)", г. Москва.

Ведущая организация: АО «НИЦ «Строительство», Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А.Кучеренко,  
г. Москва.

Защита состоится «19» июня 2019 года в 16<sup>30</sup> на заседании Диссертационного совета Д 212.125.05 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете), 125993, Москва, Волоколамское шоссе., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте: [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=102182](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=102182).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Федотенков Григорий Валерьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Проблема защиты зданий и сооружений от вибраций естественной и искусственной природы является важной для современного строительства. В случае источников вибрации искусственной природы, например, надземных и подземных линий железнодорожного транспорта, автомобильных дорог, тяжёлого вибронгруженного оборудования и др. в условиях плотной городской застройки часто бывает невозможно построить новое жилое либо производственное здание на достаточном расстоянии от существующих источников вибрации, обеспечивающим затухание воздействия до требуемого уровня. Это так же справедливо при строительстве новых линий надземного и подземного транспорта, а также строительстве нового производства с динамическим оборудованием в случае наличия вблизи существующих зданий и сооружений. Для естественных источников вибраций, а также искусственных источников, генерирующих вибрации высокой интенсивности (взрывы), важность разработки новых средств и методов защиты связана с необходимостью сохранить несущую способность конструкций зданий и сооружений при данных воздействиях.

Актуальность темы обусловлена несовершенством современных средств и методов защиты против вибрации. Например, при проектировании систем виброизоляции для обеспечения требуемого уровня шума и вибрации в жилых и производственных зданиях, а также изоляции динамического оборудования, основным недостатком будет более высокая итоговая сложность конструкции проектируемого объекта, что приведёт к повышению стоимости проектирования и строительства. Ещё большую сложность представляет монтаж системы виброизоляции в существующие несущие конструкции зданий и сооружений. Системы и методы защиты от высокоамплитудных естественных и искусственных вибраций, должны обеспечивать сохранность самих несущих конструкций при подобном динамическом воздействии. Как показывает практика, они справляются с подобной задачей и обеспечивают требуемый уровень защиты несущих конструкций. Однако, в некоторых случаях они оказываются недостаточно эффективными даже при динамических воздействиях расчётного уровня. В качестве примера стоит привести землетрясение в Порт-о-Пренс (Гаити) в 2010 г., одним из последствий которого было разрушение президентского дворца, который был оборудован современными системами сейсмозащиты.

Общим недостатком описанных выше систем защиты от вибраций является то, что они не защищают от вибраций подземные части конструкций, на которые непосредственно передаётся динамическое воздействие от грунта. При этом, даже правильно выполненный расчёт не гарантирует полную сохранность этих элементов в случае воздействий высокой интенсивности, примером чего является повреждение фундаментной плиты АЭС Фукусима-1, повреждённой в результате землетрясения в Японии в 2011 году.

Таким образом, разработка альтернативных средств и методов защиты от вибраций, позволяющих решать описанные выше проблемы, является важной задачей современного строительства. К таким средствам защиты относятся вертикальные сейсмические барьеры, защищающие территории от поверхностных волн, являющихся одним из основных компонент вибрационного воздействия в случае поверхностных источников вибрации, а также важным компонентом вибрационного воздействия при распространении вибрации от подземных источников, таких как землетрясения или подземные взрывы.

## **Состояние вопроса**

Обзор исследований по методам защиты от вибраций с помощью вертикальных сейсмических барьеров разного типа (неоднородности в грунте, траншеи, экраны и пр.), а также текущая степень разработанности данной проблемы приведены в первой главе настоящей диссертации. Здесь важно отметить, что проведены теоретические и экспериментальные исследования, показывающие возможность использования данного метода для снижения уровня вибрации в защищаемой зоне. Тем не менее, во всех рассмотренных работах не дана комплексная оценка параметров подобных сейсмических барьеров и не предложена методика оптимизации барьера для конкретных инженерно-геологических условий и заданного расчётного вибрационного воздействия. Кроме того, не проведено исследование влияния пластических свойств грунта на снижение вибраций с помощью сейсмических барьеров при разных уровнях сдвиговых деформаций в грунте при распространении вибрационного воздействия. При этом, если при распространении вибрационного воздействия в грунте, деформации сдвига не превышают величины  $10^{-4}$ , то изменением модуля сдвига, а также нелинейным характером деформирования грунта можно пренебречь (рассеяние энергии в среде при распространении волн в этом случае может быть учтено с помощью вязкоупругих моделей сплошной среды). Однако при больших значениях сдвиговых деформаций, соответствующих землетрясениям и взрывам, это недопустимо, так как модуль сдвига может уменьшаться более чем в два раза с увеличением величины сдвиговых деформаций в грунте и характер деформирования грунта будет строго нелинейным.

## **Научная идея**

В настоящей диссертации выдвигается следующая научная гипотеза: сейсмические барьеры могут быть использованы в качестве средства снижения вибрации в защищаемой зоне за счёт рассеяния и отражения энергии поверхностных сейсмических волн при их взаимодействии с барьером, а также образования пластических зон в районе этих барьеров при высоких уровнях остаточных и сдвиговых деформаций.

## **Цель работы**

Цель данной работы - определение оптимальных геометрических параметров барьера и механических параметров его материала, обеспечивающих максимальное снижение вибраций в защищаемой зоне с учётом возможных ограничений на объём материала барьера либо допустимый уровень вибраций в защищаемой зоне, а также определение уровня сдвиговых деформаций в грунте при распространении вибрационного воздействия при котором барьер наиболее эффективен.

## **Задачи работы**

В рамках поставленной цели решены следующие задачи:

- рассмотрены и изучены особенности работы упругих, упругопластических и пластических моделей, применяемых в механике грунтов для описания поведения грунта при статических и динамических воздействиях, на основании чего выбрана наиболее подходящая модель с точки зрения имеющихся экспериментальных данных и требуемой точности описания напряжённо-деформируемого состояния грунта;
- проведено численное моделирование взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальным сейсмическим барьером без учёта нелинейного характера деформирования грунта, на основании которого выявлены факторы, определяющие снижение вибрационной энергии, поступающей в защищаемую зону;

- выбрана и реализована в конечно-разностной форме методика оптимизации вертикального сейсмического барьера, позволяющая определить его оптимальные параметры при возможных ограничениях на объём его материала либо требуемый уровень вибраций в защищаемой зоне при заданных грунтовых условиях и расчётном вибрационном воздействии;
- на основании конфигураций барьера, полученных в результате решения задачи оптимизации, проведено численное моделирование взаимодействия вертикальных сейсмических барьеров с учётом пластических свойств грунта для сыпучих и связных грунтов (глин и песков) при разных уровнях сдвиговых деформаций и выделены наиболее благоприятные условия применения барьеров данного вида.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна проведённых исследований заключается в следующем:

- проведён анализ влияния численных параметров, вводимых в существующие модели упруго пластических сред для обеспечения сходимости процедуры решения, на результаты решения, а также выполнена оценка точности описания диссипации энергии в грунте и деградации модуля сдвига грунта при увеличении сдвиговых деформаций при использовании данных моделей;
- проведено численное моделирование взаимодействия вертикальных сейсмических барьеров с поверхностными сейсмическими волнами с использованием явной разностной схемы интегрирования во временной области и пространственной дискретизацией с помощью метода конечных элементов, на основании которого выявлены и проанализированы основные параметры вертикального сейсмического барьера, определяющие снижение вибраций в защищаемой зоне;
- предложена и реализована в конечно-разностной форме методика оптимизации вертикального сейсмического барьера для практического проектирования для конкретных инженерно-геологических условий и расчётного вибрационного воздействия при заданных ограничениях на объём материала барьера либо допустимый уровень вибраций в защищаемой зоне;
- проведён анализ взаимодействия вертикального сейсмического барьера с поверхностными сейсмическими волнами Рэлея с учётом пластического характера деформирования грунта при разных уровнях сдвиговых деформаций на основании чего определён диапазон его применимости.

### **Достоверность результатов исследования**

Достоверность полученных результатов определяется следующими факторами:

- постановка задачи на основании фундаментальных положений механики сплошной среды и механики грунтов;
- использование верифицированного и апробированного в других задачах механики программного комплекса SIMULIA Abaqus FEA, реализующего МКЭ с явной и неявной разностными схемами интегрирования по времени;

- верификация расчётных моделей на имеющихся экспериментальных данных и зависимостях, полученных в рамках полевых и лабораторных испытаний, а также теоретических результатах, полученных решением сходных задач аналитически либо с помощью других численных подходов.

### **Теоретическая и практическая ценность работы**

В результате данного исследования разработаны рекомендации по проектированию вертикального сейсмического барьера и реализована численная методика оптимизации его параметров для использования в качестве средства защиты от вибраций естественной и искусственной природы. Это позволит разрабатывать более эффективные средства защиты от вибраций низкой интенсивности (автомобильный и железнодорожный транспорт, оборудование и др.) без значительного усложнения проектных решений нового строительства, а также без изменения несущих конструкций в случае существующих строений, таким образом, сокращая экономические и временные затраты.

В случае вибраций высокой интенсивности, использование данного метода позволит защитить несущие конструкции от поверхностных волн, в некоторых случаях несущих основную энергию землетрясения, снижая тем самым экономический ущерб и предотвращая человеческие жертвы.

### **На публичную защиту выносятся:**

1. результаты сравнительного анализа существующих упругопластических моделей и оценка их применимости к задачам о распространении сейсмических волн и их взаимодействии с подземными конструкциями;
2. результаты численного моделирования взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальными барьерами в рамках упругого характера деформирования среды и барьера, а также оценка влияния геометрических параметров барьера и механических параметров его материала на снижение вибрации в защищаемой зоне;
3. методика оптимизации вертикального сейсмического барьера и её конечно разностная реализация для практического применения при заданных инженерно-геологических условиях и расчётном вибрационном воздействии, учитывающая возможные ограничения на допустимый уровень вибрации в защищаемой зоне либо объём материала барьера;
4. результаты численного моделирования взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальными барьерами с учётом пластических свойств грунта при разных уровнях деформации сдвига в грунте при распространении сейсмических волн;
5. рекомендации по применению и проектированию вертикальных сейсмических барьеров в качестве средства защиты от поверхностных сейсмических волн для различных источников вибрации.

### **Апробация результатов исследования**

Основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования докладывались, обсуждались и были опубликованы на следующих научных мероприятиях:

- X международная научно-практическая конференция «Научно-техническое творчество молодежи - путь к обществу, основанному на знаниях», г. Москва, 2013 г.;

- XI международная научно-практическая конференция «Научно-техническое творчество молодежи - путь к обществу, основанному на знаниях», г. Москва, 2014 г.;
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2015», г. Москва, 2015 г.;
- Международная научная конференция «Прочность конструкций, сейсморемонты зданий и сооружений», г. Ташкент, Р-ка Узбекистан, 2016 г.;
- XII Российская Национальная Конференция «Ялта-2017» по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию. », г. Ялта, 2017 г.;
- Международная конференция по архитектуре и геотехнике Технического Комитета 207 ISSMGE «ПОДЗЕМНАЯ УРБАНИСТИКА: АРХИТЕКТУРА И ГЕОТЕХНИКА», г. Санкт-Петербург, 2018 г.

### **Публикации**

Результаты выполненного исследования опубликованы в 10 публикациях, из них 2 статьи [7,9] напечатаны в журналах из перечня ВАК и 1 статья напечатан в журнале, входящем в базу данных Web of Science [5].

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографического списка. Общий объём диссертации составляет 142 страниц, в него входят 74 рисунка и 6 таблиц. Библиографический список состоит из 136 наименований.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы исследования, сформулированы научная гипотеза, объект и предмет исследования, его основная цель и задачи. Также, показаны научная новизна работы, её теоретическая и практическая ценность и недостаточность существующих исследований по данной тематике.

**В первой главе** выполнен обзор теоретических исследований по дифракции и рассеянию энергии объёмных и поверхностных упругих волн на препятствиях и неоднородностях в сплошной среде (в том числе на поверхности полупространства), а также обзор экспериментальных и теоретических исследований по защите от вибраций, переносимых поверхностными волнами, с помощью вертикальных барьеров разного вида.

**В параграфе 1.1** приведены основные типы вибрационного воздействия в соответствии с существующими международными и отечественными нормативными документами:

- а) продолжительные вибрации (длительная продолжительность, иногда достигающая нескольких часов; наличие определённых устойчивых частотных характеристик);
- б) импульсные вибрации (короткая продолжительность, высокая начальная амплитуда воздействия, быстрое затухание);
- с) прерывистая вибрация (дискретные периоды продолжительной вибрации с перерывами между ними; повторяющиеся импульсные колебания).

Для каждого из приведённых выше типов вибрации описаны основные характеристики и методы их оценки, в соответствии с нормативными документами РФ и других стран. Далее рассмотрены наиболее вероятные источники вибраций для зданий и сооружений, а также характеристики вибрационного воздействия, порождаемого этими источниками. К основным рассматриваемым параметрам вибрационного воздействия относятся: характерный диапазон частот, уровень деформаций в грунте при распространении вибраций, а также их основное воздействие на конструкции и людей. В таблице 1 приведены наиболее вероятные источники вибраций, а также характерный диапазон частот и уровень деформаций в грунте при распространении вибрационного воздействия.

Таблица 1 – Основные характеристики вибрационного воздействия от разных источников.

Источник вибраций	Величины сдвиговых деформаций в грунте, м/м	Частоты, Гц
Землетрясение	$10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	$0.1 \div 20^*$
Транспортные средства**	$< 10^{-5}$	$2 \div 125$
Тяжёлое оборудование (промышленные вибрации)	$< 10^{-5}$	$> 10$
Взрывы (в том числе при строительных работах)	$10^{-3} - 10^{-2}$	-
Строительные работы	$< 10^{-5}$	-

\* - приведены частоты наиболее опасные для несущих конструкций и учитываемые при проектировании;

\*\* - приведены данные для поездов метрополитена в соответствии с СП 23-105-2004 «Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена».



В *параграфе 1.2* рассмотрены основные типы волн, генерируемые рассмотренными источниками вибраций. Проведено разделение источников на внешние и внутренние и показаны типы волн, несущие основную энергию источников колебаний.

В случае источников вибрации, располагающихся на поверхности, либо в приповерхностной зоне (тяжёлое оборудование, железнодорожный и автомобильный транспорт, надземные строительные работы и др.), поверхностные волны Рэлея будут переносить основную часть энергии источника. При этом, для внутренних источников вибрации (линии метро глубокого заложения, землетрясения и пр.) данный вопрос остаётся открытым по причине недостаточной исследованности. Однако существуют теоретические работы, указывающие, что поверхностные волны могут переносить значительную часть энергии таких источников.

В *параграфе 1.3* рассмотрены основные принципы, обуславливающие возможность использования сейсмических барьеров в качестве методов защиты от вибраций, переносимых поверхностными волнами. Так же, выполнен обзор теоретических и экспериментальных исследований по отражению и рассеянию волновой энергии на неоднородностях в сплошной среде и на поверхности полупространства, в том числе:

- рассеяние энергии объёмных волн на сферических препятствиях конечной и бесконечной жёсткости и массы для объёмных волн;
- отражение и рассеяние поверхностных волн в угловых зонах;
- отражение и рассеяние поверхностных волн в зонах поверхностных трещин.

Полученные авторами работ результаты дают теоретическое обоснование возможности использования вертикальных сейсмических барьеров в качестве средства защиты от вибраций, переносимых поверхностными волнами.

В *параграфе 1.4* выполнен обзор теоретических и экспериментальных исследований по взаимодействию поверхностных волн с сейсмическими барьерами такими как траншеи, экраны, стены в грунте и др. Так же, продемонстрирован успешный опыт применения данного метода, в частности, для защиты высокоточного оборудования и уменьшения вибраций, вызванных движением железнодорожного транспорта.

Распространение поверхностных и объёмных сейсмических волн в сплошных средах исследовалось такими отечественными учеными как Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. и др. Распространение волн от взрывов изучалось так же в работах Садовского М.А. Кроме этого, необходимо отметить вклад таких ученых как Огурцов К. Н., Петрашень Г. Н. Никифоровский В.С., Шемякин Е.И., в работах которых, в том числе, рассмотрены вопросы разрушения тел при динамических воздействиях.

Идея волновых барьеров в первоначальной форме, по-видимому, принадлежала Баркану Д.Д. и в дальнейшем рассматривалась в работах Тарлаковского Д.В. Однако данная тема главным образом исследовалась зарубежными учеными, например Yang I.B. и др.

**Во второй главе** рассмотрены основные методы и модели механики гранулированных сред, применяемые для решения статических и динамических задач. Рассмотрены определяющие соотношения для гиперупругих, а также упругопластических сред (модели на основе подходов Мора-Кулона, Друкера-Прагера и Кэм-Клей). Проведён их сравнительный анализ и оценка влияния численных параметров, используемых для обеспечения сходимости процедуры решения. Рассматривается возможность аппроксимации реального поведения грунта с помощью этих моделей и их сравнение с наиболее точными современными подходами на основании моделей гипопластичности.

В *параграфе 2.1* вводится основной формализм для обозначения тензоров напряжений и деформаций, а также их инвариантов и других связанных величин, в дальнейшем используемых в тексте диссертации.

В *параграфе 2.2* формулируются начальные и граничные условия, используемые для численного моделирования взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальными сейсмическими барьерами.

В качестве начальных условий приняты однородные условия следующего вида:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)|_{t=0} = 0, \quad \partial_t \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)|_{t=0} = 0, \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  - перемещения точек в рассматриваемой области,  $\mathbf{x}$  - вектор координат точек области и  $t$  - время. При этом, важно заметить, что для линейно-упругого расчёта начальные напряжения в полупространстве (полуплоскости) принимаются равными 0. Это связано, прежде всего, с тем, что начальное распределение напряжений не оказывает влияние на кинетическую энергию в защищаемой зоне.

Для моделирования взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальными барьерами с учётом нелинейного характера деформирования грунта, на полупространство накладываются начальные условия для напряжений и ускорений:

$$\sigma(\mathbf{x}, t)|_{t=0} = \sigma_0(\mathbf{x}), \quad \partial_t \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)|_{t=0} = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma_0(\mathbf{x})$  - начальные напряжения от собственного веса грунта, определяемые из решения статической задачи.

На свободной поверхности  $\Pi_V$  задаётся условие отсутствия напряжений:

$$\mathbf{t}_\xi \equiv \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\xi} = 0, \quad \mathbf{x}' \in \Pi_\xi, \quad (3)$$

где  $\boldsymbol{\xi}$  - нормаль к свободной поверхности  $\Pi_\xi$ ,  $\boldsymbol{\sigma}$  - тензор напряжений. В случае малых деформаций и линейно упругой изотропной среды уравнение (3) принимает вид:

$$\mathbf{t}_\xi \equiv (\lambda \operatorname{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}) \cdot \boldsymbol{\xi} = 0, \quad \mathbf{x}' \in \Pi_\xi, \quad (4)$$

где  $\mathbf{I}$  - единичная матрица,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  - тензор малых деформаций,  $\boldsymbol{\xi}$  - вектор единичной нормали к свободной поверхности.

При наличии в среде волнового барьера (рисунок 1) на контактной поверхности между барьером и грунтом,  $\Pi_\eta$  задаются следующие граничные условия для напряжений

$\mathbf{t}$  и перемещений  $\mathbf{u}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_{bar}|_{\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\eta} \in \Pi_\eta} &= \mathbf{t}_{soil}|_{\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\eta} \in \Pi_\eta}, \\ \mathbf{u}_{bar}|_{\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\eta} \in \Pi_\eta} &= \mathbf{u}_{soil}|_{\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\eta} \in \Pi_\eta}, \end{aligned} \quad (5)$$

где индексы *bar* и *soil* соответствуют материалу барьера и грунта соответственно.

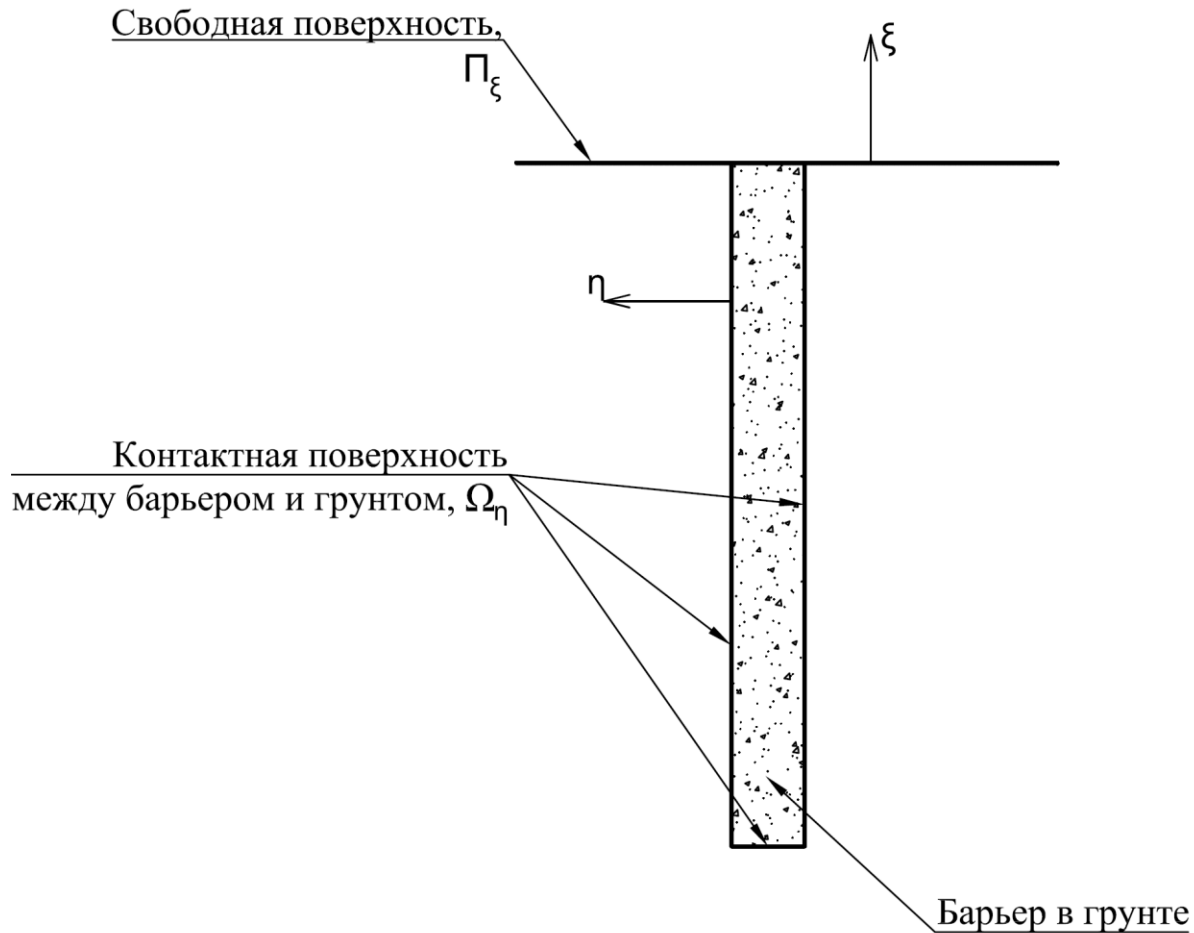


Рисунок 1. – Схема для определения контактных условий между барьером и грунтом.

Для оценки эффективности вертикального барьера вводится величина, называемая коэффициентом редукции для кинетической энергии в защищаемой зоне за барьером:

$$k_{red,E} = \frac{K_{bar}}{K_{hom}}, \quad (6)$$

где  $K_{hom}$  и  $K_{bar}$  кинетическая энергия приповерхностного участка защищаемой территории до установки барьера и после. Аналогичная величина вводится для перемещений:

$$k_{red,u} = \frac{u_{kin}^{bar}}{u_{kin}^{hom}}, \quad (7)$$

где  $u_{kin}^{hom}$  и  $u_{kin}^{bar}$  перемещения в точках на поверхности участка защищаемой территории до установки барьера и после. Величины (6) и (7) взаимосвязаны, поэтому достаточен анализ одной из них.

В параграфе 2.3 рассмотрены определяющие соотношения и уравнения теории волн для гиперупругих сред. В частности, рассматриваются уравнения распространения для объёмной волны с плоским фронтом, объёмной волны со сферическим фронтом, поверхностных волн и волны Рэлея.

В параграфе 2.4 рассматриваются определяющие соотношения для моделей упруго-пластических сред, основанных на подходах Мора-Кулона и Друкера-Прагера, а также модифицированная модель Кэм-Клей (выбор данных моделей обусловлен их частым использованием в механике гранулированных сред для описания напряжённо-деформируемого состояния грунтовых массивов и имеющегося большого количества экспериментальных данных по определению параметров этих моделей). Рассматривается диапазон их применимости и возможность аппроксимации экспериментальной кривой зависимости модуля сдвига грунта от сдвиговых деформаций в нём при разных значениях давления и индекса пластичности грунта (для песков значение индекса пластичности равно 0), рисунки 2 и 3.

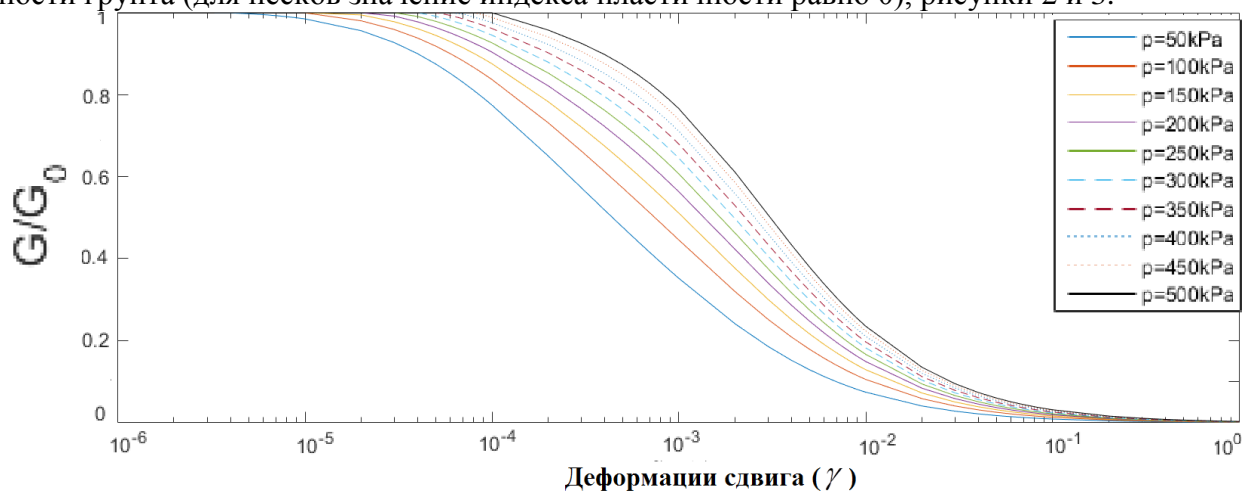


Рисунок 2. –Зависимость модуля сдвига от деформаций для песков.

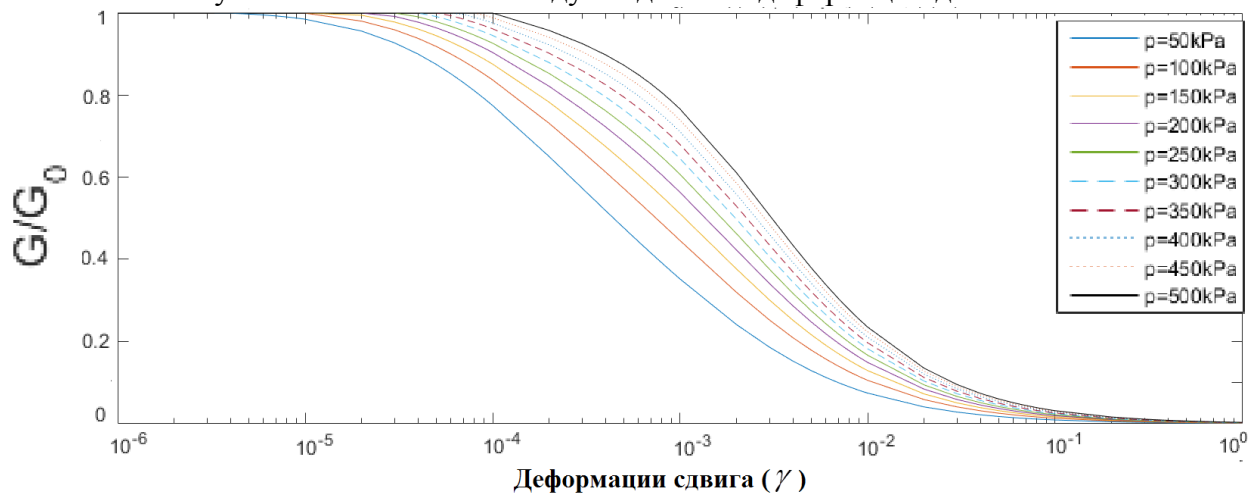


Рисунок 3. –Зависимость модуля сдвига от деформаций для глин с индексом пластичности PI=10.

На рисунках 2 и 3  $G_0$  - начальный модуль сдвига при сдвиговых деформациях в грунте  $\gamma \leq 10^{-5}$ . Как правило он определяется на основании геофизических исследований.

В третьей главе рассматриваются результаты численного моделирования взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальным сейсмическим барьером с использование плоских и пространственных моделей при упругом характере деформирования материала грунта и барьера. Проведён анализ влияния геометрических параметров барьера и механических характеристик его материала на снижение вибраций в защищаемой зоне.

В *параграфе 3.1* описана методика численного моделирования, даётся описание используемых плоских и пространственных конечно-элементных моделей барьера, изображённых на рисунках 4 и 5. Так же сформулирован основной комплекс безразмерных величин, определяющих кинетическую энергию и перемещения точек в защищаемой зоне за барьером.

Анализ взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальным сейсмическим барьером осуществлялся в плоской (плоское деформированное состояние) и пространственной постановках в программном комплексе Abaqus с пространственной дискретизацией с помощью метода конечных элементов и явной разностной схемой интегрирования во временной области. Верификация расчётных моделей, а также анализ влияния численной схемы на результаты расчёта проведены в пункте 3.1.2. Основным недостатком численной процедуры, которого не удалось избежать это появление высокочастотных шумов в области больших времён, являющихся неотъемлемым атрибутом явных разностных схем второго и более высокого порядка точности (по временной переменной) и, в частности, схем Лакса - Вендроффа, реализованных в программном комплексе Simulia Abaqus FEA. Здесь надо отметить, что схемы первого порядка точности не дают осцилляций за фронтом волны, но зато размывают передний фронт. Для уменьшения влияния этого эффекта использовалась фильтрация сигнала, которая для позволяет снизить данное «паразитное» воздействие при рассмотрении исходного гармонического воздействия известной частоты.

Плоская модель представляет собой пластину, в которой смоделировано плоское деформированное состояние. Геометрические размеры пластины выбраны из условия невозвращения волн, отражённых от границ модели в наблюдаемую зону за барьером. На левой грани пластины задавались граничные условия симметрии относительно этой оси - (3), рисунок 4; на верхней грани приложена точечная гармоническая нагрузка с круговой частотой  $\omega$  - (1), рисунок 4; на двух других границах заданы неотражающие условия на продольные волны - (4), рисунок 4; на некотором расстоянии от оси симметрии смоделирован вертикальный барьер высотой  $h$  и шириной  $d$  (2), рисунок 4 за которым расположена защищаемая зона размером  $h \div 1.5h$ . Расстояние между барьером и осью симметрии выбиралось из условия, что взаимодействие барьера и волн будет проходить в установившейся зоне колебаний, а также невозвращения в зону наблюдения волн, отражённых от «симметричного» барьера.

Основным недостатком плоской модели является практически полное отсутствие зоны тени за барьером, то есть при удалении от барьера амплитуда перемещений не восстанавливается. При этом данный эффект наблюдает в пространственной модели. На основании этого, размер зоны наблюдения и выбор точек для выдачи перемещения производился на основании предварительных расчётов с использованием пространственных моделей.

Пространственная модель, показанная на рисунке 5, с круговой защищаемой зоной внутри кольцевого барьера построена аналогично плоской модели. При этом, для уменьшения размерности задачи рассмотрена только половина участка с дополнительным условием симметрии (5), рисунок 5. Также, на данном рисунке показана нагрузка, генерирующая поверхностные волны с плоским фронтом.

В соответствии с  $\pi$  теоремой кинетическая энергия приповерхностного участка в зоне за барьером, а также перемещения точек в зоне наблюдения определяются следующим набором безразмерных величин:

$$K_{bar} = f \left( \frac{E_{bar}}{E_{soil}}; \frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}}; \frac{d \times h}{l^2}; \frac{d}{h}; v_{bar}; v_{soil} \right), \quad (8)$$

$$u_{bar} = g \left( \frac{E_{bar}}{E_{soil}}; \frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}}; \frac{d \times h}{l^2}; \frac{d}{h}; \nu_{bar}; \nu_{soil} \right), \quad (9)$$

где индекс *soil* обозначает соответствующие параметры материала полупространства, а индекс *bar* - соответствующие параметры материала барьера;  $l$  - длина волны Рэлея в полупространстве,  $E_{bar}, E_{soil}$ ; - соответствующие модули упругости;  $\nu_{bar}, \nu_{soil}$  - коэффициенты Пуассона;  $\rho_{bar}, \rho_{soil}$  - плотности;  $d$  и  $h$  - ширина и высота барьера соответственно.

Взаимодействие поверхностных волн с сейсмическим барьером из железобетона показано на рисунке 5 (барьер выделен чёрным). Из данного рисунка видно, что в зоне за барьером амплитуды перемещений снижаются.

В **параграфе 3.2** проведён анализ влияния механических характеристик материала барьера на снижение кинетической энергии в защищаемой зоне. На рисунке 6 показаны изополя зависимости коэффициента редукиции кинетической энергии в приповерхностной зоне за барьером от безразмерной плотности и модуля упругости барьера при следующих безразмерных значениях геометрических параметров -  $\tilde{r} = \frac{h}{d} = 6.4$  и  $\tilde{A} = \frac{d \times h}{l^2} = 0.1$ . На основании

полученных результатов можно сделать вывод о том, что наиболее эффективен барьер из неплотного мягкого материала соответствующего, например, экстрадированному пенополистеролу. Эффективность тяжёлого и жёсткого барьера ниже, однако даже он обеспечивает величину коэффициента редукиции кинетической энергии равную  $k_{red,E} = 0.25$ . Далее рас-

смотрены 2 типа материалов жёсткий -  $\frac{E_{bar}}{E_{soil}} = 100.0$  и  $\frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}} = 3.0$ , соответствующий железобетону и лёгкий -  $\frac{E_{bar}}{E_{soil}} = 0.1$  и  $\frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}} = 0.1$  соответствующий экстрадированному пенополи-

стеролу. При небольших длинах волн и низких амплитудах вибрации, также возможно использование пустых траншей. Однако в этом случае необходимо проводить проверку устойчивости их откосов.

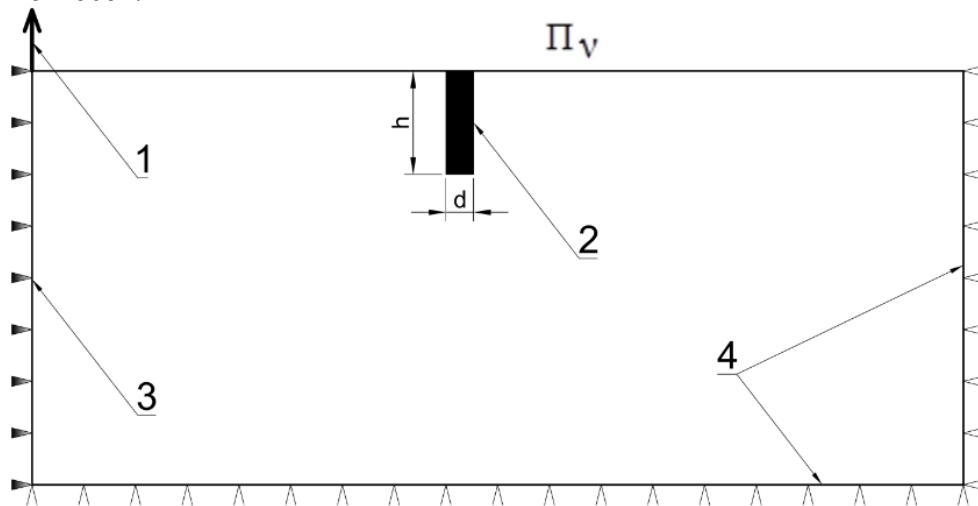


Рисунок 4. –Схема плоской модели для анализа взаимодействия вертикального сейсмического барьера с поверхностными волнами (1-гармоническая нагрузка, 2-вертикальный сейсмический барьер, 3- условие симметрии, 4 – неотражающие границы,  $\Pi_v$  - свободная поверхность).

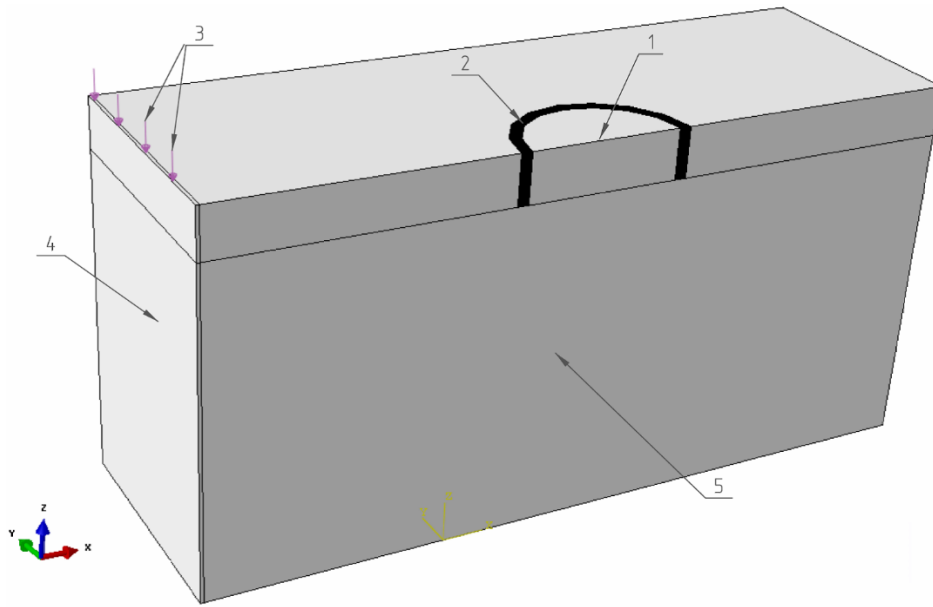


Рисунок 5. –Схема пространственной модели для анализа взаимодействия вертикального сейсмического барьера с поверхностными волнами (1-защищаемая зона, 2-вертикальный сейсмический барьер, 3- гармоническая нагрузка, 4,5 – условия симметрии).

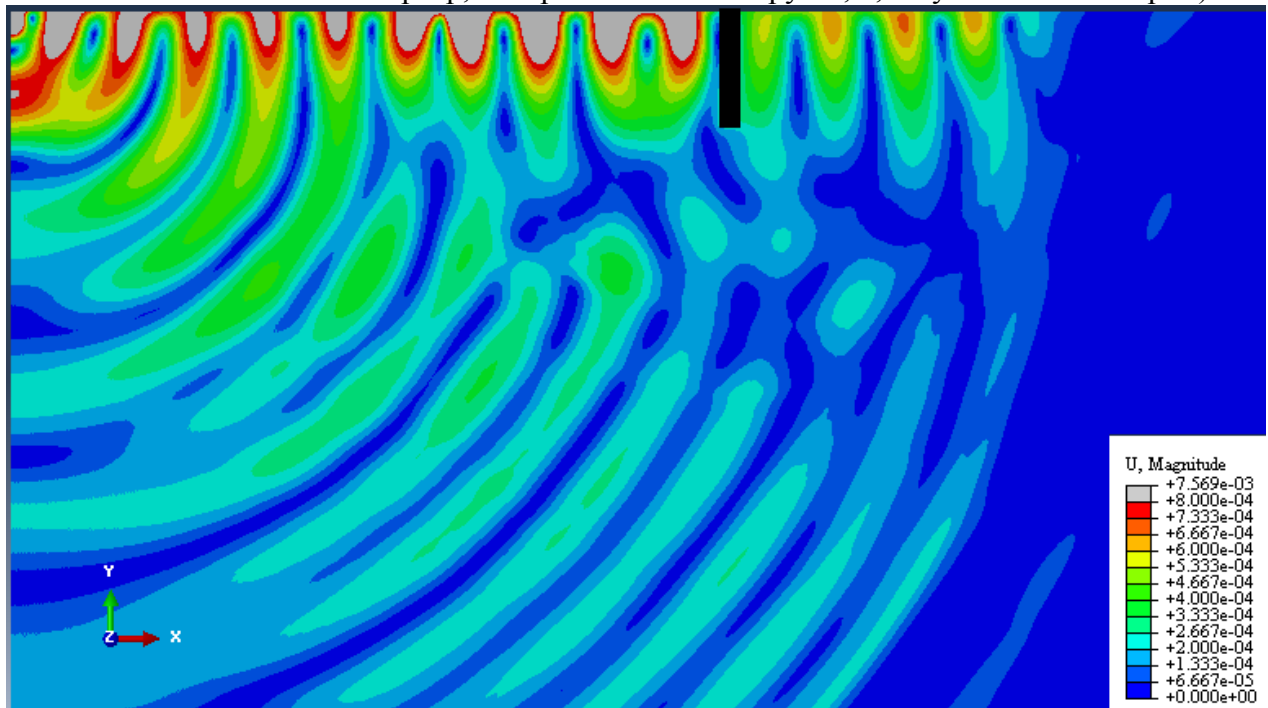


Рисунок 6. –Взаимодействие сейсмического барьера с поверхностными волнами. Изополя амплитуды перемещений (м).

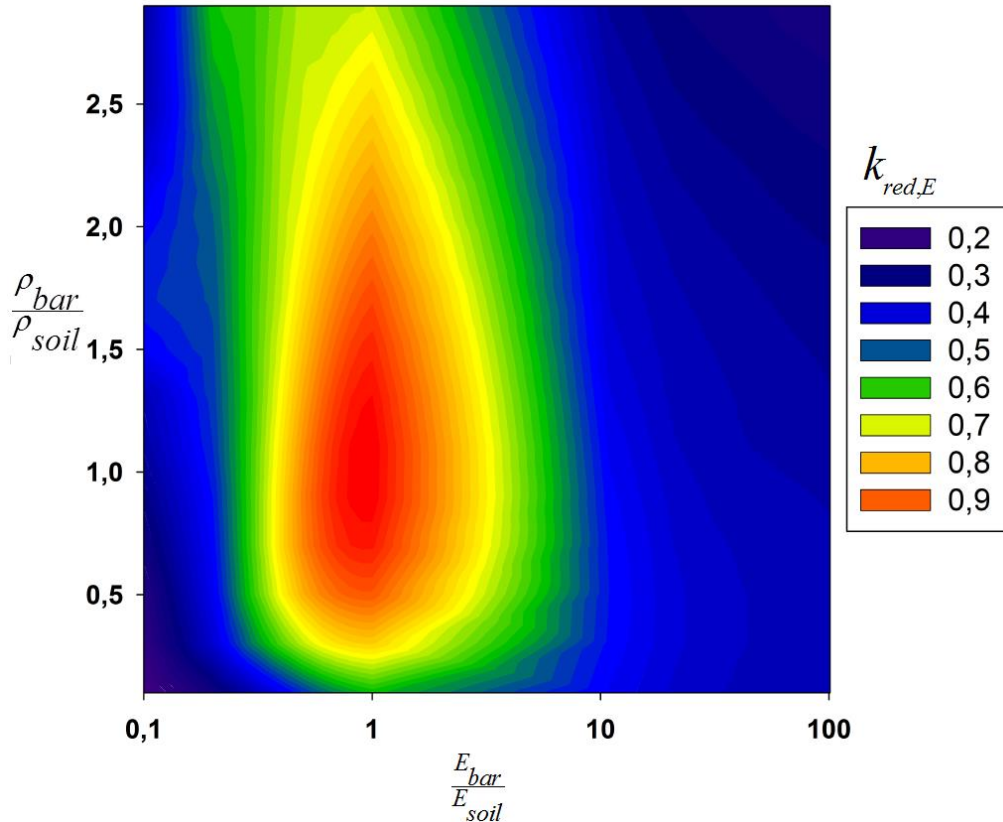


Рисунок 7. –Изополя зависимости коэффициента редукции барьера  $k_{red,E}$  от относительного модуля упругости  $\frac{E_{bar}}{E_{soil}}$  и относительной плотности  $\frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}}$  барьера.

В **параграфе 3.3** проведён анализ влияния геометрических параметров барьера на снижение кинетической энергии в защищаемой зоне. Полученные результаты свидетельствуют о том, что коэффициент редукции барьера зависит нелинейно от его объёма и отношения высоты барьера к его ширине.

Для лёгкого материала увеличение площади поперечного сечения приводит к уменьшению коэффициента редукции, что означает повышение эффективности барьера с точки зрения снижения вибраций в защищаемой зоне. При этом, при увеличении площади поперечного сечения барьера выше  $\tilde{A} = \frac{d \times h}{l^2} = 1.7$ , коэффициент редукции меняется незначительно. В отличие от лёгкого материала коэффициент редукции барьера из жёсткого материала снижается при увеличении безразмерной площади поперечного сечения практически сохраняя скорость снижения с увеличением площади начиная от  $\tilde{A} = \frac{d \times h}{l^2} = 0.75$ . Таким образом, объём барьера при использовании тяжёлого и жёсткого материала должен определяться исходя из допустимой стоимости и требуемого уровня снижения вибраций в защищаемой зоне (*Замечание:* это справедливо и для барьера из лёгкого и нежёсткого материала, но в этом случае увеличение безразмерной площади выше  $\tilde{A} = \frac{d \times h}{l^2} = 1.7$  не увеличивает его защитные свойства).



Оптимальное соотношение между высотой и шириной поперечного сечения лёгкого и нежесткого барьера находится в диапазоне  $\tilde{r} = \frac{h}{d} \in [3.0, 4.0]$ , тогда как для барьера из тяжёлого и жесткого материала наблюдаются два минимума – один при  $\tilde{r} = \frac{h}{d} \approx 0.25$  соответствующий горизонтальному барьеру и  $\tilde{r} = \frac{h}{d} \approx 6.35$  соответствующий вертикальному.

В четвёртой главе вводится методика оптимизации вертикального сейсмического барьера для практического проектирования при заданных инженерно-геологических условиях и расчётном вибрационном воздействии, позволяющая учесть возможные ограничения на объём материала барьера либо уровень вибраций в защищаемой зоне. Также, проведён анализ влияния пластических свойств грунта при разных уровнях сдвиговых деформаций.

В параграфе 4.1 рассмотрена методика оптимизации вертикального сейсмического барьера для заданных грунтовых условий, расчётной частоте волн Рэлея и размерах защищаемой зоны. Рассматриваются две целевые функции:

$$V_{bar}(\tilde{x}), \quad k_{red}(\tilde{x}), \quad (10)$$

где  $V_{bar}(\tilde{x})$  - объём барьера,  $k_{red}(\tilde{x})$  - коэффициент редукиции (возможно рассмотрение как коэффициента редукиции по перемещениям, так и кинетической энергии) и  $\tilde{x}$  - переменные определяющие эти функции. Как правило, при практическом проектировании, на эти величины накладываются ограничения, связанные с допустимой ценой проектируемого объекта и уровнем вибраций.

На основании результатов, полученных в настоящем исследовании, минимальное значение коэффициента редукиции при постоянных геометрических параметрах барьера обеспечивается при максимальном различии в механических характеристиках материала барьера и грунта. Таким образом, задача оптимизации вертикального сейсмического барьера может быть решена в два шага: (1) выбор материала, обеспечивающего максимальное отличие плотности и модуля упругости материала барьера от плотности и модуля упругости грунта и (2) оптимизация геометрии барьера. Если не рассматривать экзотические варианты материала барьера, такие как материалы с высокой плотностью и малой жесткостью, высокой жесткостью и малой плотностью, различные виды мета материалов и др., а также дорогие материалы, такие как сталь, свинец и пр., то выбор таких конструктивных материалов ограничен. Наиболее вероятными вариантами материала в данном случае будут экстрадированный пенополистерол и бетон. С учётом этого, задача оптимизации вертикального сейсмического барьера сводится к оптимизации его геометрических параметров (2) и при заданном радиусе защищаемой территории (в случае линейного барьера его длине) целевые функции принимают вид:

$$V_{bar}(\tilde{A}, \tilde{h}), \quad k_{red}(\tilde{A}, \tilde{h}), \quad (11)$$

где  $\tilde{A} = \frac{d^* h}{l^2}$ ,  $\tilde{r} = \frac{d}{h}$  - безразмерные площадь поперечного сечения и высота барьера. Данная задача является задачей многокритериальной оптимизации, которые как правило не имеют единого глобального решения и рассматриваются в рамках различных критериев оптимальности, одним из которых является критерий оптимальности по Парето, рассмотренный в данной работе. В качестве метода решения задачи выбран переход к оптимизации с ограничениями в виде неравенств, являющихся естественными следствиями накладываемы на проектируемых барьер ограничений по стоимости и требуемому снижению вибрации. Таким

образом, исходная задача разбивается на две подзадачи: (1) нахождение минимального значения коэффициента редукции при ограничении на объём барьера:

$$\min_{\tilde{E}, \tilde{\rho}, \tilde{A}, \tilde{h}} (k_{red}(\tilde{A}, \tilde{r})) \quad @ \quad V_{bar}(\tilde{A}, \tilde{r}) \leq V_0 \quad (12)$$

и нахождение минимального объёма барьера при ограничении на коэффициент редукции барьера:

$$\min_{\tilde{A}, \tilde{h}} (V_{bar}(\tilde{A}, \tilde{r})) \quad @ \quad k_{red}(\tilde{A}, \tilde{r}) \leq k_0, \quad (13)$$

где  $V_0$  - максимально допустимый объём барьера, а  $k_0$  - максимально допустимое значение коэффициента редукции барьера. Решение данной задачи осуществимо с помощью метода множителей Лагранжа или его обобщения с в виде условий Кунна-Таккера. Вводя положительные множители Лагранжа  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  для первой и второй задач оптимизации (12) и (13) соответственно, получим необходимые условия экстремума:

$$\nabla (k_{red}(\tilde{A}, \tilde{r}) + \alpha_1 V_{bar}(\tilde{A}, \tilde{r})) = 0 \quad (14)$$

$$\alpha_1 (V_{bar}(\tilde{A}, \tilde{r}) - V_0) = 0, \quad \alpha_1 \geq 0,$$

$$\nabla (V_{bar}(\tilde{A}, \tilde{r}) + \alpha_2 k_{red}(\tilde{A}, \tilde{r})) = 0 \quad (15)$$

$$\alpha_2 (k_{red}(\tilde{A}, \tilde{r}) - k_0) = 0, \quad \alpha_2 \geq 0.$$

С достаточным условием минимума в виде положительной определённости квадратичной формы:

$$\forall \mathbf{x} \in X, \mathbf{x} \neq 0 \quad \mathbf{x} H \mathbf{x}' > 0, \quad (16)$$

где  $\mathbf{x}$  - вектор аргументов функции  $L_1 = V_{bar}(\tilde{A}, \tilde{r}) + \alpha_2 k_{red}(\tilde{A}, \tilde{r})$  для (12) и  $L_2 = k_{red}(\tilde{A}, \tilde{r}) + \alpha_1 V_{bar}(\tilde{A}, \tilde{r})$  для (13),  $X$  - область допустимых значений аргументов  $L_1$  и  $L_2$  и  $H = \nabla_x \nabla_x L_{1,2}(\tilde{A}, \tilde{r})$ . Запись уравнений (14) - (16) в разностной форме и их программная реализация позволяет получить оптимальное решения для задачи оптимизации вертикального сейсмического барьера.

*Замечание:* здесь необходимо отметить, что данный метод поиска оптимальных параметров выбран на основании малой размерности пространства параметров (2), в случае большего числа параметров необходимо использование стохастических методов оптимизации.

В **параграфе 4.2** рассматриваются результаты математического моделирования взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальными сейсмическими барьерами с учётом нелинейного характера деформирования грунта при разных значениях сдвиговых деформаций:  $\gamma = 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$ . Расчёт проводился на конечно-элементных моделях, показанных на рисунках 4 и 5 в несколько этапов:

1. Расчёт начального распределения напряжений в грунте;
2. Расчёт напряжений в грунте после установки барьера;
3. Расчёт амплитуды перемещений в защищаемой зоне до и после установки барьера.

При численном моделировании распространения поверхностных волн Рэлея для получения перемещений до установки барьера расчёт по второму пункту не производится. Для учёта пластических деформаций использована модель на основании подхода Мора-Кулона.

На рисунках 8 и 9 показаны амплитуды перемещений в точке на расстоянии  $\frac{l}{2}$  от барьера при разных значениях сдвиговых деформаций для несвязного грунта с характеристиками, приведёнными в таблице 2. Можно заметить, что во втором случае эффективность барьера падает из-за образования пластических зон в грунте. Аналогичные результаты получены для связных грунтов. Таким образом, при некотором значении сдвиговых деформаций, зависящих от типа грунта (связный или сыпучий), а также его пластических свойств (угол внутреннего трения и сцепление) эффективность барьера падает. Эту критическую величину деформации можно увеличить за счёт изменения глубины барьера, однако в таком случае его стоимость может оказаться слишком высокой. При этом, при малых сдвиговых деформациях отличия результатов расчёта в упругой и упруго пластических постановках незначительны.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики рассматриваемых грунтов.

Грунт	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , МПа	$\nu$	$c$ , кПа	$\varphi$ , м	$\psi$
Песчаный	1750.00	24.00	0.32	1.00	30.00	0.00

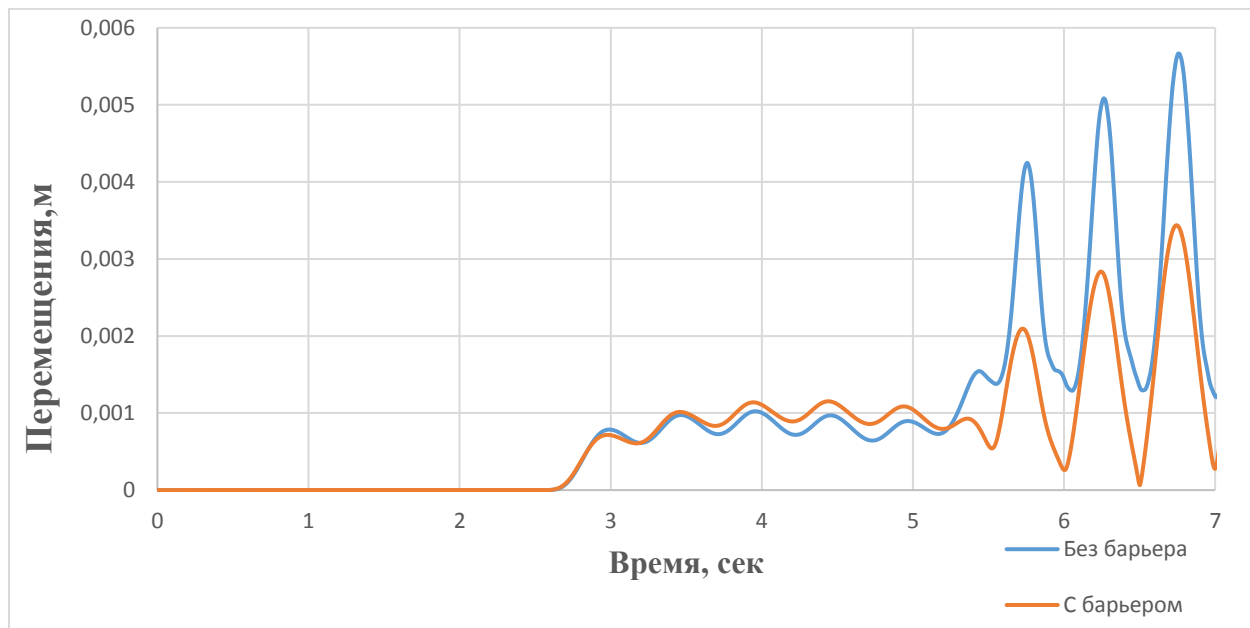


Рисунок 8. – Амплитуда перемещений точки на расстоянии  $\frac{l}{2}$  от барьера без барьера и после его установки ( $\frac{h}{l} = 2.0, \frac{d}{l} = 0.09, \omega = 12.56 \text{ рад} / \text{с}, \gamma = 5 * 10^{-4}$ ).

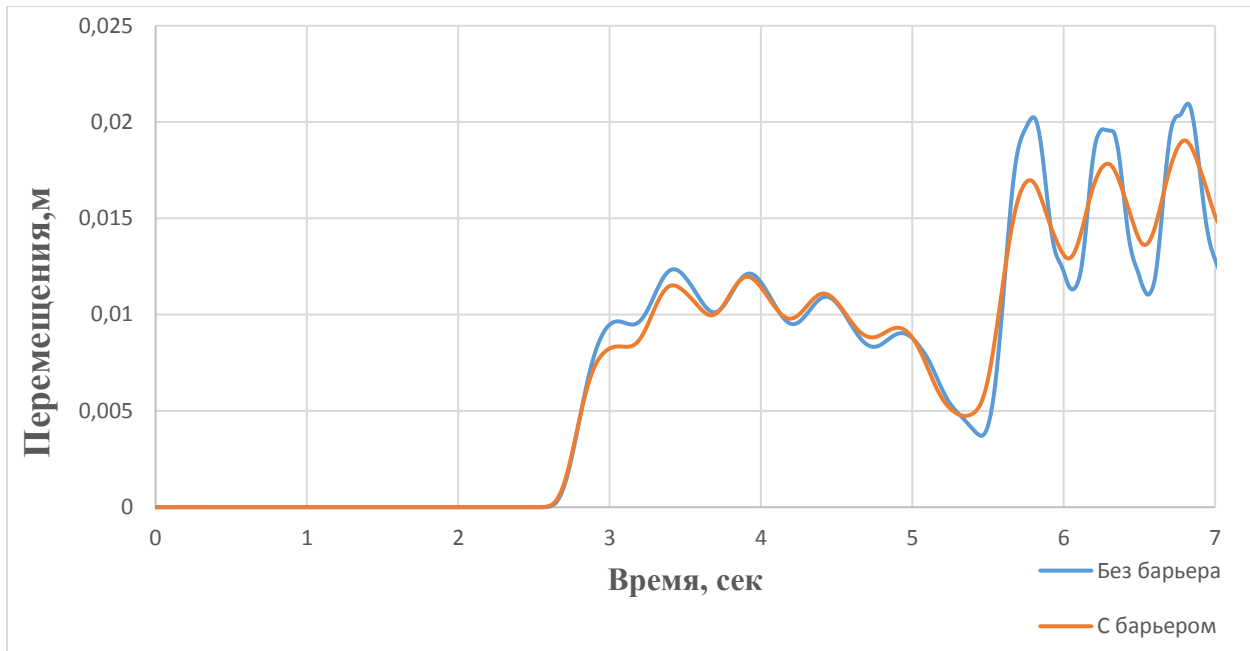


Рисунок 9. – Амплитуда перемещений точки на расстоянии  $\frac{l}{2}$  от барьера без барьера и после его установки ( $\frac{h}{l} = 2.0, \frac{d}{l} = 0.09, \omega = 12.56 \text{ рад} / \text{с}, \gamma = 10^{-3}$ ).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании проведённого диссертационного исследования и полученных в ходе него результатов можно сделать следующие выводы:

1. Модель Мора-Кулона без упрочнения является оптимальной для моделирования взаимодействия вертикальных сейсмических барьеров с поверхностными волнами Рэлея, так как она позволяет моделировать гистерезисное поведение грунта и имеет большое количество экспериментальных данных по входным параметрам для разных типов грунтов.

2. Выделен основной безразмерный комплекс, определяющий все основные параметры задачи при упругом деформировании среды и барьера. К этим параметрам относятся механические характеристики материала барьера, такие как плотность и модуль упругости, а также его геометрические параметры, такие как площадь поперечного сечения и отношение его глубины к ширине.

3. Показана возможность использования двух типов барьеров: (1) пустая или заполненная более лёгким и менее жёстким чем грунт материалом (экстрадированный пенополистерол) траншея и (2) твёрдый и жёсткий барьер (стена в грунте, выполненная из железобетона). Важно отметить, что 1 тип барьера более эффективен при одинаковых размерах поперечного сечения и радиуса защищаемой территории. При этом, максимальное снижение вибраций в защищаемой зоне может быть достигнуто путём использования пустой траншеи, однако её использование ограничено конструктивными и прочностными требованиями (для больших длин волн при требуемой глубине траншеи не будет обеспечена устойчивость её стенок; так же при высокой интенсивности динамического воздействия возможно «схлопывание» стенок траншеи).

4. Для барьера из материала с малой плотностью и модулем упругости соотношение между его высотой и толщиной, при котором коэффициент редукции принимает наименьшее значение -  $\frac{h}{d} \approx 3.5$ ; оптимальное значение площади поперечного

сечения, после которого коэффициент редукции практически не изменяется -  $\frac{h*d}{l^2} \approx 1.7$ .

Для тяжёлого и жёсткого барьера оптимальное соотношение между его высотой и толщиной -  $\frac{h}{d} \approx 6.35$ , тогда как площадь поперечного сечения должна определяться исходя из требуемого уровня вибраций и допустимого объёма материала, так как коэффициент редукции продолжает снижаться с увеличением площади сечения даже при больших значениях безразмерной площади  $\frac{h*d}{l^2} \geq 1.7$ .

5. Максимальное снижение вибраций в защищаемой зоне обеспечивается при максимальном отличии модуля упругости и плотности материала сейсмического барьера от соответствующих характеристик грунта. При этом, при постоянных геометрических

параметрах барьера функция  $k_{red}$  монотонно уменьшается при увеличении  $\frac{E_{bar}}{E_{soil}}$  и  $\frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}}$  в

диапазонах:  $\frac{E_{bar}}{E_{soil}} \in [1, 1000]$  и  $\frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}} \in [1, 3]$  и монотонно увеличивается при увеличении  $\frac{E_{bar}}{E_{soil}}$  и

$\frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}}$  в диапазонах:  $\frac{E_{bar}}{E_{soil}} \in [0.01, 1]$  и  $\frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}} \in [0.01, 1.0]$ . Фактически эта величина достигает минимума на границах рассматриваемого диапазона -  $\frac{E_{bar}}{E_{soil}} \in [0.01, 100]$  и  $\frac{\rho_{bar}}{\rho_{soil}} \in [0.01, 3.0]$ .

При этом, рассмотренные экстремальные случаи в виде пустой траншеи и жёстко защемлённого барьера показывают, что при расширении рассматриваемого диапазона,  $k_{red}$  достигает минимума на его границах. Таким образом, задача оптимизация барьера при практическом проектировании может быть разделена на две подзадачи: (1) выбор материала, обеспечивающего максимальное отличие его механических характеристик от механических характеристик грунта и (2) оптимизация геометрии барьера.

6. Предложен алгоритм многокритериальной оптимизации вертикального сейсмического барьера. В качестве целевых функций рассмотрены объём барьера и его коэффициент редукции. В качестве критерия оптимальности выбран критерий оптимальности по Парето, а в качестве метода решения выбран переход к оптимизации с ограничениями в виде неравенств, на основании чего рассмотрены две подзадачи: (1) нахождение минимума коэффициента редукции при ограничении на объём барьера и (2) нахождение минимального объёма барьера при ограничении на коэффициент редукции. Для обеих задач был построен алгоритм решения с использованием условия Каруша-Кунна-Таккера, который был записан в разностной форме для обеих задач и приведён пример решения с его использованием. При этом, необходимо отметить, что рассмотренные в алгоритме ограничения, являются накладываемыми требованиями по допустимому объёму барьера либо уровню вибраций на защищаемом объекте.

7. Рассмотренный метод оптимизации является эффективным для данной задачи, поскольку при небольшой размерности пространства параметров (двумерное) позволяет получить достоверное решения в виде условного минимума для гладких целевых функций, удовлетворяющее критерию Парето оптимальности, а также необходимому и достаточному условиям минимума. Кроме того, он позволяет учесть порядок важности целевых функций для конкретной рассматриваемой задачи.

8. Проведено математическое моделирование взаимодействия вертикального сейсмического барьера с поверхностными волнами Рэлея с учётом нелинейного характера деформирования грунта с использованием модели на основе подхода Мора-Кулона при разных значениях угла внутреннего трения и сцепления для связных и несвязных грунтов. Показано, что образование пластических зон при определённых значениях сдвиговых деформаций, определяющихся пластическими свойствами грунта и его типом, защитные свойства сейсмических барьеров ухудшаются. При этом, диапазон сдвиговых деформаций при котором барьер остаётся эффективен может быть увеличен за счёт увеличения глубины барьера.

9. Результаты взаимодействия поверхностных волн Рэлея с вертикальными сейсмическими барьерами с учётом пластических свойств грунта также показывают, что результаты упругого расчёта (Глава 3 настоящей диссертации), а также методика оптимизации барьера (Глава 4, параграф 1 настоящей диссертации) допустимо использовать при величине сдвиговых деформаций в грунте, не превышающих  $10^{-4}$ . При больших значениях деформации сдвига в грунте при распространении воздействия необходимо делать проверочные расчёта с использованием упругопластических моделей. В результате этих расчётов итоговая конфигурация барьера может быть скорректирована.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. Дудченко А. В., Кузнецов С. В. Исследования эффективности применения вертикальных сейсмических барьеров// Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2014». – 2014.
2. Дудченко А. В., Кузнецов С. В. Вертикальные сейсмические барьеры //Международная молодёжная научная конференция «XL Гагаринские чтения». Научные труды в 9 томах – 2014. –том 5, с. 178-180.
3. Дудченко А. В., Кузнецов С. В. Исследование существующих моделей пластических сред //Международная молодёжная научная конференция «XLI Гагаринские чтения». – 2015. – С. 31-32.
4. Дудченко А. В., Кузнецов С. В. Исследования континуальных моделей материалов, применяемых в механике сплошных сред // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2016». – 2016.
5. Goldstein R. V., Dudchenko A. V., Kuznetsov S. V. The modified Cam-Clay (MCC) model: cyclic kinematic deviatoric loading //Archive of Applied Mechanics. – 2016. – Т. 86. – №. 12. – С. 2021-2031.
6. Дудченко А. В., Кузнецов С. В. Сейсмические барьеры и свайные поля для защиты зданий и сооружений от вибраций искусственной и естественной природы // Международная научная конференция «Прочность конструкций, сейсродинамика зданий и сооружений». – 2016.
7. Dudchenko A. V., Kuznetsov S. V. The modified mohr–coulomb and drucker–prager models. influence of eccentricity on hysteresis loop and energy loss //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Т. 13. – №. 2. – С. 35-44.
8. Дудченко А. В. Анализ взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальными барьерами и свайными полями // XII Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием). – 2016. – С. 66-67.
9. Дудченко А.В. Анализ взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальными барьерами и свайными полями // Сейсмостойкое строительство и безопасность сооружений. – 2017.– №. 5. – С. 47-51.

10. Дудченко А. В., Кузнецов С. В. Взаимодействие поверхностных сейсмических волн с сейсмическими барьерами и свайными полями с учетом пластических свойств грунта// Международная конференция по архитектуре и геотехнике TC207 ISSMGE «Подземная урбанистика: архитектура и геотехника» – 2018.