

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра информационных и управляющих систем
Направление подготовки / специальность 09.04.04 Программная инженерия
Направленность (профиль) / специализация Управление разработкой
программного обеспечения

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
_____ А.В. Бушманов
« ___ » _____ 2024 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Моделирование прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции

Исполнитель
студент группы 2105-ом

Д.Г. Григорян

(подпись, дата)

Руководитель
доцент, канд. техн. наук

А.В. Бушманов

(подпись, дата)

Руководитель научного
содержания программы
магистратуры
профессор, доктор техн. наук

И.Е. Еремин

(подпись, дата)

Нормоконтроль
доцент, канд. техн. наук

Т.А. Галаган

(подпись, дата)

Рецензент
доцент, канд. техн. наук

Д.В. Фомин

(подпись, дата)

Благовещенск, 2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра информационных и управляющих систем

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой
_____ А.В. Бушманов
« ____ » _____ 2024 г.

ЗАДАНИЕ

К магистерской диссертации студента _____ группы 2105-ом

Григорян Давид Гагикович _____

1. Тема магистерской диссертации: Моделирование прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции

(Утверждено приказом от 06.03.2024 № 632-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта): 10.06.2024

3. Исходные данные к магистерской диссертации: экспериментальные данные изолированной комнаты

4. Содержание магистерской диссертации (перечень подлежащих разработке вопросов): разработка алгоритма, построение компьютерной модели и тестирование полученной модели

5. Перечень материалов приложения (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.): компьютерная акустическая модель помещения

6. Рецензент магистерской диссертации: директор научно-образовательного центра, доцент, кандидат физ.-мат. наук АмГУ, Фомин Дмитрий Владимирович

7. Дата выдачи задания 29.01.2024

Руководитель выпускной квалификационной работы: Бушманов Александр Вениаминович, канд. техн. наук, доцент

(фамилия, имя, отчество, должность, уч.степень, уч.звание)

Заявление принял к исполнению _____

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 75 с., 34 рисунка, 5 таблиц, 27 источников.

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ, ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ, COMSOL MULTIPHISICS, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В работе исследованы фундаментальные принципы распространения звуковых волн, включая их отражение, преломление и поглощение различными материалами. Также исследованы методологии моделирования в COMSOL.

Цель работы – разработка методологии для анализа звукоизоляционных характеристик ограждающих конструкций, а также создание компьютерной модели для моделирования и оценки их акустической эффективности.

Основу методологии исследований составляют теория распространения звуковых волн, концепция акустических характеристик материалов, а также методы численного моделирования.

На основании численного моделирования в COMSOL Multiphysics были синтезированы модели, описывающие прохождение звуковых волн через различные конструкции. Разработанная компьютерная модель осуществляет имитационное моделирование исследуемых конструкций, позволяя анализировать и оптимизировать их звукоизоляционные свойства.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ	8
1.1 Предметная область	8
1.2 Описание характерных особенностей предмета исследования, общепринятой классификации его частей и элементов	9
1.2.1 Источники угроз акустической информации	9
1.2.2 Методы борьбы с несанкционированным доступом	13
1.3 Моделирование звука	16
1.4 Формулировка цели исследования	17
2 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ РАССМАТРИВАЕМОЙ ЗАДАЧИ	18
2.1 Программно-аппаратный комплекс «Шепот»	18
2.2 Программный комплекс ГРОЗА-К	20
2.3 Программное обеспечение «Клерк»	21
3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ВЫБОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	26
3.1 Предполагаемый алгоритм компьютеризованного решения задачи	26
3.1.1 Постановка задачи	26
3.1.2 Алгоритм компьютеризованного решения задачи	26
3.1.3 Звуковая проницаемость конструкций	27
3.1.4 Архитектура и реализация программного обеспечения	32
3.2 Обзор возможностей профильного программного обеспечения	33
3.2.1 Программная реализация	33
3.2.2 Функциональные требования	33

3.2.3 Программные модули системы	33
3.2.4 Взаимодействие модулей ПО	36
3.3 Обоснование выбора программно-технического обеспечения	39
4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ	41
4.1 Основные этапы практической разработки программного продукта	41
4.1.1 Разработка 3D-модели помещения	41
4.1.2 Физические свойства материалов	44
4.1.3 Создание источников звука	47
4.1.4 Математическое и физическое моделирование	48
4.1.5 Визуализация полученных результатов исследования	63
4.1.6 Визуализация уровня звукового давления	63
4.1.7 Визуализация потоков энергии	65
4.2 Сравнение результатов реальных измерений и результатов моделирования	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	71
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	73

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

НММ АРР – нормативно-методические документы по противодействию акустической речевой разведке;

ОЗУ – оперативное записывающее устройство;

ОС – операционная система;

ПО – программное обеспечение;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире ценным ресурсом стала информация. Так как раскрытие определенной информации часто вызывает негативные последствия для ее обладателя, вопрос защиты данных от несанкционированного доступа становится все более актуальным

Поскольку для каждой меры защиты существует способ ее обхода, обеспечение надлежащей безопасности информации требует постоянного совершенствования методов.

Проблема защиты конфиденциальных переговоров решается комплексно, с применением различных мер, включая технические средства. Это происходит следующим образом: первичными носителями речевой информации являются акустические колебания воздуха, создаваемые речевым аппаратом участников переговоров. Впоследствии, естественными или искусственными способами, речевая информация передается через вибрационные, магнитные, электрические и электромагнитные колебания в различных частотных диапазонах, что приводит к утечке конфиденциальной информации из переговорного помещения. Для предотвращения этого производится маскирование таких колебаний аналогичными сигналами в подозрительных или выявленных частотных диапазонах. Постоянно используются различные технические средства для блокирования известных каналов утечки речевой информации, таких как кабельные сети, трубопроводы, ограждающие конструкции зданий, окна и двери, а также побочные электромагнитные излучения.

Целью квалификационной работы является моделирование прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics. В рамках работы предполагается исследование взаимодействия звуковых волн с различными типами строительных материалов и конструкций, анализ их акустических характеристик, а также оценка эффективности звукоизоляции. Основное внимание будет уделено разработке и верификации компьютерной модели, позволяющей

предсказывать распространение звука и его затухание при прохождении через ограждающие конструкции, что может быть применимо для улучшения акустической безопасности в переговорных комнатах и залах заседаний.

1 АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

1.1 Предметная область

Защита речевой информации является ключевой задачей в общем комплексе мер по обеспечению информационной безопасности объекта технической защиты информации. Это обусловлено тем, что в ходе обсуждения рабочих вопросов может разглашаться конфиденциальная информация. Перехват этой информации может происходить непосредственно в момент озвучивания. Объектами технической защиты речевой информации являются государственные структуры, научно-исследовательские учреждения и различные частные компании.

Акустическая информация – это информация, передаваемая с помощью акустических сигналов. Если источником информации является человеческая речь, то она называется речевой информацией.

Акустический сигнал представляет собой возмущения упругой среды, которые проявляются в виде акустических колебаний различной формы и длительности. Акустическими называются механические колебания частиц упругой среды, распространяющиеся от источника колебаний в окружающее пространство в виде волн разной длины.

Звукоизоляция помещений предназначена для локализации источников акустических сигналов внутри них и направлена на предотвращение перехвата акустической (речевой) информации через прямые акустические каналы (щели, окна, двери, технологические проемы, вентиляционные каналы и т.д.) и вибрационные каналы (ограждающие конструкции, трубы водопровода, теплотрассы, газопроводы, канализационные трубы и т.д.).

Основное требование к звукоизоляции заключается в том, чтобы за пределами помещения отношение акустического шума к сигналу не превышало допустимого уровня, что предотвращает выделение речевого сигнала на фоне естественных шумов подслушивающими устройствами. Поэтому к таким помещениям предъявляются специальные требования по звукоизоляции.

Звукоизоляция оценивается по степени ослабления акустического сигнала, проходящего через ограждающие конструкции, воздух и технические структуры.

Ввиду существования большого количества способов несанкционированного получения акустической информации, требуется тщательное изучение каналов утечки и звуковой проводимости различных конструкций.

1.2 Описание характерных особенностей предмета исследования, общепринятой классификации его частей и элементов

1.2.1 Источники угроз акустической информации

Угроза безопасности информации: Совокупность условий и факторов, создающих потенциальную или реально существующую опасность нарушения безопасности информации.

Основные факторы утечки конфиденциальной информации:

- Возможность организации каналов утечки информации;
- Условия, обеспечивающие разведывательный контакт через конкретный канал утечки информации.

Канал утечки конфиденциальной информации — это физический путь от источника коммерческой тайны к злоумышленнику, через который может быть осуществлен несанкционированный доступ к закрытым данным. Для создания такого канала необходимы определенные энергетические, пространственные и временные условия, а также соответствующие технические средства для восприятия и фиксации информации.

Основные угрозы безопасности речевой информации:

- Подслушивание и несанкционированная запись речевых данных при помощи скрытых устройств, систем лазерного прослушивания, стетоскопов и других записывающих устройств, установленных в местах с тонкими стенами или техническими коммуникациями;
- Использование записывающих устройств людьми, присутствующими на совещаниях, с целью личной выгоды или для осуществления конкурентных действий;

- Перехват электромагнитных излучений при работе звукозаписывающих устройств, а также иных электроприборов или средств коммуникации.

Утечка акустической информации может произойти через тонкие и проницаемые конструкции, такие как двери, стены, окна, полы, батареи центрального отопления и т.д.

Источниками опасных сигналов в виде электрических сигналов и радиоволн могут быть усилители звука, звукозаписывающие устройства, охранные системы связи и бытовые приборы, расположенные в зоне передачи конфиденциальной информации.

Не исключается наличие лиц, выполняющих разведывательные операции внутри компании или государственных структур. Злоумышленник может получить информацию путем отправки своего агента или путем подкупа участников совещания.

В акустическом канале звуковая волна может распространяться через различные пути, включая воздушную среду в помещении, несущие стены, перегородки между комнатами, технические коммуникации и окна.

Структурный звук также может передаваться через стены, перегородки между помещениями, двери, оконные рамы, трубопроводы и системы отопления, и т.д.

Угрозу безопасности акустической информации представляет подслушивание как непосредственно человеком, так и с использованием вспомогательных электронных устройств.

Данные средства можно разделить на:

- подслушивание злоумышленником, что включает в себя:
 - запоминание услышанной информации;
 - записывание информации;
- подслушивание с использованием электронных устройств включает в себя:

- перехват электромагнитных сигналов технических устройств в комнате совещаний;
- подслушивание с помощью спрятанных записывающих устройств;
- использование лазерных систем прослушки.

При прямом подслушивании злоумышленник использует слуховую систему для улавливания звуков через акустические каналы, проходящие по помещению, а также через окна, двери, вентиляционные системы. Возможны сценарии подслушивания во время совещания через очень тонкие стены, двери, окна и вентиляцию.

Отдельный случай возникает, когда злоумышленник является участником совещания. В таком случае обнаружение подслушивания становится сложным, особенно если он не использует специализированное оборудование, из-за чего, в последствии, невозможно предъявить доказательства вины данного человека. В связи с этим при составлении списка участников совещания сотрудникам следует внимательно проверять кандидатуру каждого участника, а также его личные качества и намерения, если это возможно.

При прямом подслушивании вне пределов комнаты переговоров, злоумышленник может вести запись прослушки на бумажный носитель, устройства записи и иные виды техники для фиксации информации.

Технические средства прослушки можно разделить следующим образом:

- скрытые микрофоны: Устройства, которые могут быть скрыты в предметах обстановки, таких как мебель, стены, потолки, предметы интерьера и т.д.;
- устройства прослушивания через стены: Специализированные приборы, которые могут улавливать звуковые волны через стены и другие препятствия;
- лазерные прослушивающие устройства используют лазерный луч для прослушивания разговоров, вибрации поверхностей и т.д.;

- сети проводной и беспроводной передачи данных: Злоумышленники могут использовать сети связи для перехвата аудио- и видеосигналов;
- специальные программные и аппаратные средства: включают программное обеспечение и аппаратные устройства, предназначенные для записи и передачи аудиоинформации без разрешения.

Наиболее распространены скрытые записывающие устройства. В состав таких устройств входит:

- микрофон;
- радиопередатчик или цифровой передатчик сигнала;
- источник питания (аккумулятор).

Существуют два типа устройств для прослушивания: акустические, которые обнаруживают звуковые колебания в воздухе, и вибрационные, которые реагируют на колебания, передающиеся через твердые конструкции. Например, такие устройства могут быть закреплены на радиаторе центрального отопления или вентиляционной системе для обнаружения вибраций, создаваемых звуковыми колебаниями.

Установка маленького радиопередатчика может быть произведена в пространство между стенами, розетки, осветительные приборы и т.д.

Подслушивание при помощи лазерных устройств является сравнительно новым методом, предназначенным для съема акустической информации с плоских поверхностей, которые вибрируют под воздействием звуковых волн. Основным объектом для такого метода являются стеклянные поверхности крытых окон.

Система лазерного подслушивания включает в себя лазерный передатчик в инфракрасном диапазоне и оптический приемник. Лазерный луч направляется с помощью оптического прицела на стекло окна в помещении, где происходят интересующие злоумышленника разговоры. Когда лазерный луч отражается от вибрирующей поверхности, происходит его модуляция по частоте, углу и фазе.

Частотная модуляция вызвана эффектом Допплера, возникающим из-за колебательных движений стекла под воздействием акустических сигналов. Однако, из-за сложности измерения изменений частоты, этот вид модуляции не используется для извлечения информации.

Изменение угла отражения лазерного луча, известное как угловая модуляция, происходит в результате деформации поверхности стекла во время его колебаний под воздействием звуковых волн. Когда лазерный луч отражается от вибрирующей поверхности стекла, это вызывает изменения в направлении отраженного луча. Эти изменения в направлении отраженного луча приводят к соответствующим изменениям положения светового пятна на светочувствительном элементе оптического приемника, таком как фотодиод или фототранзистор.

Когда светочувствительный элемент получает измененный световой сигнал, это приводит к изменению освещенности элемента и, в свою очередь, к амплитудной модуляции электрического сигнала на выходе приемника. Полученный сигнал затем усиливается и передается на аудиомэгнитофон для записи. Юстировка положения светочувствительного элемента оптического приемника может осуществляться оператором с целью оптимизации разборчивости записываемой речи.

Таким образом, система лазерного подслушивания использует угловую модуляцию для обнаружения звуковых колебаний, проходящих через стекло, и преобразует их в аудиосигнал для записи и последующего анализа.

1.2.2 Методы борьбы с несанкционированным доступом

Противодействие подслушиванию сосредотачивается в основном на предотвращении утечки информации через различные акустические, гидроакустические и сейсмические каналы. Важно учитывать, что для увеличения дальности подслушивания широко применяются комбинированные устройства, объединяющие в себе акустические, радиоэлектронные и оптические приборы. Поэтому стратегии защиты от подслушивания должны включать

методы блокирования любых возможных каналов утечки акустической информации.

Принципы защиты от подслушивания включают в себя следующие методы:

- информационное сокрытие, предусматривающее:
 - техническое закрытие и шифрование речевой информации в функциональных каналах связи;
 - дезинформирование;
- энергетическое сокрытие путем:
 - изоляции акустического сигнала;
 - поглощения акустической волны;
 - глушения акустических сигналов;
 - зашумления помещения (или среды распространения звуковых волн) другими звуками (шумами, помехами);
- обнаружение и изъятие закладных устройств.

Выявление электронных устройств для подслушивания - сложная задача, которая требует физического и электронного сканирования помещений. Оперативные сотрудники контрразведки должны постоянно направлять свои усилия на обнаружение таких устройств.

Целью контрразведывательной деятельности является:

- поиск и отключение подслушивающей аппаратуры;
- передача ложной информации через подслушивающие устройства;
- сбор доказательств для возбуждения уголовных дел против лиц, осуществляющих разведывательную деятельность в отношении компаний-конкурентов.

Эффективная контрразведка требует не только постоянного внимания к поиску и выявлению подслушивающих устройств, но и разработки стратегий для контроля и минимизации рисков утечки конфиденциальной информации.

Основные способы борьбы с несанкционированным доступом к акустической информации:

- проведение переговоров всегда в разных местах;
- создание помещения, защищенного от внешнего съема акустической информации.

Создание помещения, защищенного от внешнего съема акустической информации, представляет собой значительные финансовые и организационные затраты, но это позволяет обеспечить безопасность важных переговоров и конфиденциальных обсуждений.

Инженерная защита подобного помещения играет ключевую роль и включает в себя строгие нормы по звуко- и виброизоляции. Кроме того, важно учитывать следующие моменты: помещение должно быть достаточно просторным, чтобы создать дополнительное пространство на некотором расстоянии от всех внешних стен и пола. Данное пространство предназначено для постройки помещения, которое будет защищено буферной зоной. Дополнительные стены и воздушные пространства позволят обезопасить конфиденциальную информацию. Также желательно, чтобы соседние помещения принадлежали тому же владельцу.

Помимо конструктивных особенностей помещения, для защиты информации необходимо исследовать и технические средства активной защиты. К таким средствам относятся и акустические шумогенераторы, виброгенераторы, генераторы помех в коммуникациях, устройства постановки помех в особо уязвимых местах, а также постановка помех в пространстве между внешним и внутренним помещениями.

Все меры по обеспечению безопасности помещения от несанкционированного доступа останутся бесполезными, если в него могут свободно попадать люди без контроля. Поэтому необходимо строго отслеживать, кто, когда и с какой целью посещает помещение, а также контролировать ключи от него, само помещение и пространство между внешним и внутренним помещениями. Это можно обеспечить с помощью системы контроля доступа и

видеонаблюдения, поддерживая архив достаточной глубины. Такая система не только позволяет ограничивать доступ и наблюдать за ситуацией в реальном времени, но и восстанавливать произошедшие события за определенный период времени при необходимости.

Несмотря на все предпринятые меры по обеспечению безопасности помещения, необходимо регулярно проверять наличие возможных слабых мест или способов обхода защитных мер. Для этого проводится аудит защищенности помещения, который по сути является технической проверкой и "зачисткой" помещения. Однако есть особенность: мониторинг электромагнитной обстановки может осуществляться как непрерывно или с достаточной периодичностью, так и перед проведением важных событий, таких как переговоры, а также во время их проведения.

1.3 Моделирование звука

Физическое моделирование звука представляет собой набор методов, используемых для создания звуков при помощи математических моделей. В этих моделях форма звуковой волны определяется через решение уравнений и алгоритмов, которые имитируют физические процессы, лежащие в основе звукового источника. Такие модели учитывают законы физики, описывающие процессы образования звука, и обычно содержат ряд параметров, отражающих физические свойства материалов и их изменения во времени, а также взаимодействия между ними.

Эти математические модели позволяют симулировать различные аспекты звукового процесса, такие как источники звука, их взаимодействие с окружающей средой, а также эффекты рассеяния и отражения звука от поверхностей. Путем изменения параметров модели можно варьировать характеристики звука, такие как тембр, громкость, частота и прочие. Физическое моделирование звука находит широкое применение в различных областях, таких как разработка акустических инструментов, аудиоинженерия, компьютерная графика, виртуальная реальность, музыкальное и звуковое искусство, а также в научных исследованиях, связанных с акустикой и звуковой технологией.

1.4 Формулировка цели исследования

Целью проводимой квалификационной работы является разработка и исследование физической и математической модели, описывающих прохождение звуковых волн через различные ограждающие конструкции.

Для достижения поставленной цели необходимо исследовать особенности физического распространения акустических волн в воздухе и через различные твердые поверхности. Рассчитывать и исследовать разработанную модель будем с помощью пакета прикладных программ для математических вычислений и компьютерного моделирования, с реализацией программного продукта.

2 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ РАССМАТРИВАЕМОЙ ЗАДАЧИ

2.1 Программно-аппаратный комплекс «Шепот»

Система оценки защищенности выделенных помещений по вибро-акустическому каналу «Шепот» предназначена для проведения специальных акустических и вибрационных измерений в помещениях с целью оценки их защищенности от утечки речевой информации по акустическому и вибрационному каналам.

Система «Шепот» обеспечивает:

- автоматические измерения уровня звукового давления тестового сигнала вблизи и на удалении от его источника в 5-октавных полосах с центральными частотами 250, 500, 1000, 2000 и 4000 Гц;
- автоматические измерения уровня звукового давления тестового сигнала вблизи от его источника и уровня, наведенного им виброускорения в 5-октавных полосах с центральными частотами 250, 500, 1000, 2000 и 4000 Гц;
- возможность перехода на ручное управление аппаратурой системы;
- использование данных измерений по 5-октавным полосам для расчета показателей защищенности и настройки системы защиты выделенных помещений по виброакустическому каналу утечки речевой информации;
- формирование и ведение базы данных о результатах выполненных измерений, включающей информацию о месте проведения измерений (объект, помещение, контрольная точка) и о результатах измерений и расчетов в каждой контрольной точке;
- составление отчета по результатам измерений в форме, отвечающей требованиям НМД АРР;
- автоматический и/или ручной режим ввода данных для расчета показателей защищенности выделенных помещений по виброакустическому каналу;

- установку параметров проведения измерений для каждого измерительного цикла;
- ввод калибровочных значений измерительных микрофонов и акселерометра, их сохранение и корректировку;
- расчет показателей защищенности помещений от утечки информации по акустическому и вибрационному каналам при заданных нормируемых показателях защищенности информации – отношениях «сигнал/шум» («сигнал/(помеха + шум)»);
- автоматические измерения уровня звукового давления тестового сигнала вблизи и на удалении от его источника в 19 третьоктавных полосах с центральными частотами 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300 и 8000 Гц;
- автоматические измерения уровня звукового давления тестового сигнала вблизи от его источника и уровня наведенного им виброускорения в 19 третьоктавных полосах с центральными частотами 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300 и 8000 Гц;
- расчет показателей защищенности выделенных помещений от утечки информации по оптикоэлектронному каналу;
- автоматический и/или ручной режим ввода данных для расчета показателей защищенности выделенных помещений от утечки информации по оптикоэлектронному каналу;
- настройку конфигурации системы применительно к марке используемого в ней измерительного оборудования;
- формирование акустических сигналов различных видов при использовании звуковой карты ПЭВМ в качестве генератора шумового сигнала.

Программа «Шепот-Интерфейс» управляет автоматизированной системой оценки защищенности помещений от утечки информации по виброакустическому каналу «Шепот» и обрабатывает результаты измерений в соответствии с нормативно-методическими документами, учитывая уровни

акустической и вибрационной защиты ограждающих конструкций и инженерных систем помещений.

Алгоритм работы программы «Шепот-Интерфейс» обеспечивает:

- автоматическое управление аппаратурой для измерения уровня звукового давления тестового сигнала вблизи и на удалении от его источника в 5-ти октавных полосах с центральными частотами 250, 500, 1000, 2000 и 4000 Гц;

- автоматическое управление аппаратурой системы для измерения уровня звукового давления тестового сигнала вблизи от его источника и уровня наведенного им виброускорения в 5-ти октавных полосах с центральными частотами 250, 500, 1000, 2000 и 4000 Гц;

- возможность перехода на ручное управление аппаратурой системы;

- использование данных измерений по 5-ти октавным полосам для расчета показателей защищенности выделенных помещений по виброакустическому каналу утечки речевой информации;

- использование данных измерений по 5-ти октавным полосам и результатов их обработки для настройки системы защиты выделенных помещений объекта от утечки речевой информации по виброакустическому каналу.

2.2 Программный комплекс ГРОЗА-К

Программа расчета «Гроза-К» является программным средством контроля эффективности применения средств защиты информации, не содержащей сведения, составляющих государственную тайну.

Программа «Гроза-К» реализует расчет показателей защищенности конфиденциальной информации от утечки по техническим каналам по алгоритмам, приведенным в методиках «Сборника временных методик оценки защищенности конфиденциальной информации от утечки по техническим каналам» (Гостехкомиссия России, 2002):

- временная методика оценки защищенности помещений от утечки речевой конфиденциальной информации по каналам электроакустических преобразований во вспомогательных технических средствах и системах;
- временная методика оценки защищенности основных технических средств и систем, предназначенных для обработки, хранения и (или) передачи по линиям связи конфиденциальной информации;
- временная методика оценки защищенности конфиденциальной информации, обрабатываемой основными техническими средствами и системами, от утечки за счет наводок на вспомогательные технические средства и системы и их коммуникации;
- автоматизированная разработка проекта протокола по результатам инструментально–расчетного определения требуемого радиуса контролируемой зоны R2;
- автоматизированная разработка проекта протокола по результатам инструментально–расчетной оценки защищенности помещений от утечки речевой конфиденциальной информации по электроакустическим каналам октавных отношений «сигнал/шум».

Программа «Гроза-К» обеспечивает ввод и редактирование исходных данных для расчета, их загрузку и сохранение, осуществляет контроль за действиями оператора для предотвращения ввода некорректных исходных данных или некорректного использования расчетной части.

По результатам расчета формируются протоколы. Редактирование протоколов осуществляется с помощью текстовых редакторов, обрабатывающих файлы формата RTF (MS Word, WordPad и др.).

Программа расчета «Гроза-К» функционирует под управлением ОС Microsoft Windows версий 7 / 8 / 8.1 / 10 (32 или 64 бит).

2.3 Программное обеспечение «Клерк»

Программа предназначена для автоматизированного процесса разработки проектов документов по результатам аттестационных испытаний защищаемого помещения.

Основные возможности программы:

- расчет оценки защищенности помещения от утечки речевой конфиденциальной информации по акустическому и виброакустическому каналам;
- расчет оценки эффективности технических мер защиты речевой конфиденциальной информации от утечки по акустическому и вибрационному каналам;
- расчет оценки защищенности помещения от утечки речевой конфиденциальной информации по каналам электроакустических преобразований;
- расчет оценки эффективности технических мер защиты речевой конфиденциальной информации от утечки по каналам электроакустических преобразований;
- автоматизированная разработка проектов следующих документов:
 - технический паспорт защищаемого помещения;
 - программа аттестационных испытаний защищаемого помещения;
 - план контролируемой зоны;
 - заключение по результатам аттестационных испытаний защищаемого помещения; протокол инструментально-расчетной оценки защищенности защищаемого помещения от утечки речевой конфиденциальной информации по акустическому и вибрационному каналам;
 - протокол инструментально-расчетной оценки эффективности технических мер защиты речевой конфиденциальной информации от утечки по акустическому и вибрационному каналам;
 - протокол оценки защищенности защищаемого помещения от утечки речевой конфиденциальной информации по каналам электроакустических преобразований;

- протокол оценки эффективности технических мер защиты речевой конфиденциальной информации от утечки по каналам электроакустических преобразований;
- аттестат соответствия защищаемого помещения;
- инструкция по применению системы виброакустической защиты;
- приказ о вводе в эксплуатацию защищаемого помещения;
- препроводительное письмо.

Требования к аппаратной платформе:

- процессор с частотой 500 МГц и выше;
- ОЗУ - не менее 32 МБ;
- Объем свободного пространства на ЖМД диске не менее 17 Мбайт;
- видеоадаптер - SVGA;
- манипулятор типа "мышь".

Требования к программному обеспечению:

- Microsoft Windows 2000/XP/Vista/7;
- Microsoft Word 2000/XP/2003/2007/2010;
- Microsoft .Net FrameWork 3.5 SP1.

2.4 Сравнение возможностей ПО

В данном разделе рассмотрим плюсы и минусы каждой из программ. Сравнение представленных решений, а также собственного решения, представленного в данной работе представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение программных решений

Характеристика	Программно-аппаратный комплекс «Шепот»	Программный комплекс «ГРОЗА-К»	Программное обеспечение «Клерк»	Авторское решение

Функциональность	Возможность высокоточного измерения, ввиду наличия технических средств	Эффективный контроль защиты информации	Автоматизация документооборота	Только базовый функционал проверки акустической защищенности
Требование навыков специалиста	Да	Да	Умеренные навыки специалиста	Возможно использование рядовым сотрудником
Обучение	Необходимость в обучении персонала	Необходимость в обучении персонала	Необходимость в обучении персонала	Возможно использование без глубокого обучения
Требования к оборудованию	Необходимость в специальном оборудовании	Необходимость в специальном оборудовании	Требует современных серверов и рабочей станции	Не требует специального оборудования, а также высоких системных требований

Интеграция	Возможность интеграции с другими системами без опасности	Возможность интеграции с другими системами без опасности	Легкая интеграция с другими офисными приложениями	Интеграции с другими системами нет
-------------------	--	--	---	------------------------------------

Исходя из таблицы, можно отметить явные плюсы и минусы решения, представленного в данной работе. К плюсам можно отнести отсутствие особых требований к операционной системе и техническим средствам, возможность использования программы без особых специальных навыков, а также возможность использования программы рядовым пользователем компании. К минусам можно отнести наличие лишь базового функционала системы, а также отсутствие интеграции со сторонними системами и программными комплексами.

3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ВЫБОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

3.1 Предполагаемый алгоритм компьютеризованного решения задачи

3.1.1 Постановка задачи

В ходе выполнения работы необходимо разработать физическую и математическую модель прохождения звука через ограждающие поверхности, включающая в себя:

- исследование прохождения звука в реальных условиях. Описание и нахождение формул расчета, снятие показаний для будущего подбора параметров системы;
- определение коэффициентов проницаемости различных конструкций;
- создание модели помещения, в которой будут отражены физические свойства проницаемости конструкций и окружения;
- создание модели нарушителя, осуществляющего внешний несанкционированный доступ к конфиденциальной речевой информации;
- оценка защищенности речевой информации в конкретном помещении и определение оптимальных методов защиты.

За счет использования прикладного программного обеспечения и анализа физических и математических данных звуковой проницаемости, будет построена компьютерная модель помещения. Также будет проведено описание взаимодействия звука с различными материалами и определены основные коэффициенты защищенности речевой информации.

3.1.2 Алгоритм компьютеризованного решения задачи

Алгоритм компьютеризованного решения задачи моделирования прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции может иметь следующие шаги:

- определение геометрии ограждающих конструкций и расположения звуковых источников и приемников внутри и вне конструкций;
- разбиение геометрии на сетку для численного решения уравнения Гельмгольца или волнового уравнения в зависимости от требований задачи и доступных методов решения;
- определение физических параметров среды, включая скорость звука и плотность материала, а также других параметров, которые могут влиять на распространение звука, таких как температура и влажность;
- определение граничных условий для моделируемых поверхностей, таких как коэффициент отражения и пропускания звука, чтобы учесть взаимодействие звука с ограждающими конструкциями;
- расчет распространения звука через ограждающие конструкции, используя выбранное уравнение и метод решения. Результатом является распределение звукового давления или интенсивности звука в пространстве вокруг и внутри конструкций;
- анализ полученных результатов, включая оценку уровня звукового давления и частотных характеристик в различных точках пространства, сравнение с требованиями нормативных документов и идентификацию возможных проблем с утечкой звука или попаданием шума извне в помещения;
- варианты оптимизации звуковой изоляции, такие как изменение геометрии конструкций, выбор различных материалов или изменение параметров граничных условий;
- оценка эффективности предлагаемых решений на основе моделирования и выбор наилучшего варианта.

3.1.3 Звуковая проницаемость конструкций

На данном этапе необходимо вычислить и практически выяснить звуковую проницаемость конструкций из различных материалов. Для этого используется звукоулавливающее устройство, стоящее за исследуемой конструкцией и источник звука, с другой стороны. Когда звуковая волна сталкивается с преградой, которая имеет иное волновое сопротивление, чем среда, в которой

распространяется звук, происходит несколько явлений. Часть энергии звуковой волны отражается от преграды, часть проникает в нее и поглощается, преобразуясь в тепло, а оставшаяся часть продолжает движение, проникая сквозь преграду. Это явление объясняет, как звук взаимодействует с различными поверхностями и материалами в окружающей среде, данная схема взаимодействия представлена на рисунке 1.

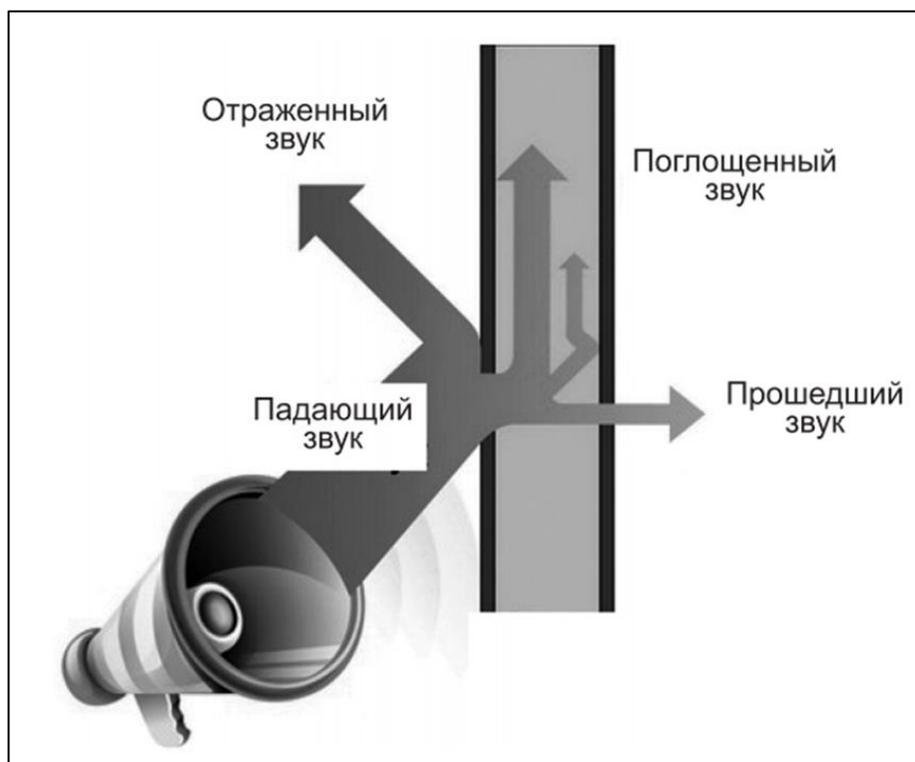


Рисунок 1 – Схема прохождения звуковых волн через ограждающую конструкцию

Для определения эффективности звукоизоляции необходимо оценить следующие критерии:

Коэффициент звукопоглощения:

$$\alpha = \frac{I_{\text{погл}}}{I_{\text{пад}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{погл}}$ – поглощенная материалом или преградой интенсивность звука, $I_{\text{пад}}$ – падающая на преграду интенсивность звука.

Коэффициент отражения:

$$\beta = \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{отр}}$ – отраженная от преграды интенсивность звука,

$I_{\text{пад}}$ – падающая на преграду интенсивность звука.

Коэффициент звукоизоляции – обратная величина по отношению к коэффициенту отражения:

$$\gamma = \frac{I_{\text{пад}}}{I_{\text{отр}}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{пад}}$ – падающая на преграду интенсивность звука,

$I_{\text{отр}}$ – отраженная от преграды интенсивность звука.

Коэффициент прохождения:

$$\tau = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{пад}}}, \quad (4)$$

где $I_{\text{пр}}$ – прошедшая сквозь преграду интенсивность звука,

$I_{\text{пад}}$ – падающая на преграду интенсивность звука.

Коэффициент рассеяния от поверхности преграды:

$$\delta = \frac{I_{\text{пад}} - I_{\text{погл}} - I_{\text{пр}}}{I_{\text{пад}}}, \quad (5)$$

где $I_{\text{пр}}$ – прошедшая сквозь преграду интенсивность звука,

$I_{\text{погл}}$ – поглощенная материалом или преградой интенсивность звука,

$I_{\text{пад}}$ – падающая на преграду интенсивность звука.

Основная цель звукопоглощения состоит в том, чтобы предотвратить отражение звука от поверхности стены. Материал, используемый для звукопоглощения, поглощает звук, не отражая его обратно. Эффективность звукопоглощения измеряется коэффициентом звукопоглощения, который может колебаться от 0 до 1.0. Когда коэффициент звукопоглощения равен нулю, происходит полное отражение звука от поверхности. При полном поглощении звука коэффициент равен единице. В таблице 2 представлены некоторые коэффициенты звукопоглощения различных материалов в частотном диапазоне от 128 до 4096 Герц.

Таблица 2 – Коэффициенты звукопоглощения различных материалов в диапазоне частот.

	Частота, Гц.					
	128	256	512	1024	2048	4096
Кирпичная стена, некрашеная	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05
Пол бетонный	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Пол деревянный	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Пол, покрытый линолеумом	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Стекло в рамах	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
Мрамор или плитка	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
Деревянные панели	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06
Вентиляционная решетка	0.50	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25
Ковер	0.09	-	0.30	-	0.37	-

Звукоотражение проявляется в способности материала отражать звуковые волны. Обычно гладкие поверхности обладают выраженным звукоотражающим эффектом. Примерами материалов с хорошими звукоотражающими свойствами являются металлические листы, стекло, текстолит, керамические

плитки, пластиковые поверхности и другие гладкие поверхности. Эти поверхности отражают звук, не позволяя ему проникнуть внутрь материала. Такие конструкции часто называют мраморными акустическими зеркалами. Информация о коэффициентах звукоизоляции различных материалов в децибелах, представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты звукоизоляции различных материалов

Материал	Коэффициент звукоизоляции R, дБ
Кирпичная стена 50 мм	35
Кирпичная стена 100 мм	42
Кирпичная стена 230 мм	48
Кирпичная стена 100 мм со слоем штукатурки 12 мм	45
Кирпичная стена 230 мм со слоем штукатурки 12 мм	49
Кирпичная стена 450 мм со слоем штукатурки 12 мм	55
Двойная кирпичная стена с воздушной прослойкой 50 мм	65
Цемент 100 мм	45
Цемент 150 мм	47
Цемент 200 мм	50
Перегородка из 2-х листов ГКЛ по 12 мм с заполнением стекловатой 50 мм	36
Перегородка из 2-х листов ГКЛ по 24 мм с заполнением стекловатой 75 мм	45
Дверь одинарная	15
Дверь с уплотнителями	20
Монолитная дверь толщиной 6 мм и воздушным зазором 12 мм	30
Стекло 4 мм	23
Стекло 6 мм	27
Два стекла толщиной 6 мм и воздушным зазором 12 мм	28
Стекло 10 мм, воздушный зазор 150 мм, стекло 8 мм	44
Стекло 10 мм, воздушный зазор 200 мм, стекло 8 мм	52

3.1.4 Архитектура и реализация программного обеспечения

Реализация ПО для моделирования прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции может состоять из нескольких компонентов:

- графический интерфейс пользователя для задания геометрии конструкций, расположения звуковых источников и приемников, выбора материалов и других параметров;
- алгоритмы численного решения уравнения Гельмгольца или волнового уравнения для расчета прохождения звука через ограждающие конструкции;
- модули для определения физических параметров среды и граничных условий, а также для анализа результатов моделирования;
- модули для оптимизации звуковой изоляции, включая генерацию альтернативных конструкций и материалов, анализ и сравнение результатов моделирования, а также выбор наилучшего варианта;
- модули для визуализации результатов моделирования, включая графики, диаграммы и трехмерные модели.

Для реализации такого ПО должен быть использован язык программирования, подходящий для численных расчетов. Также можно использовать специализированные библиотеки, которые предоставляют готовые реализации алгоритмов численного решения уравнений для моделирования прохождения звука через ограждающие конструкции.

Для обеспечения быстродействия и оптимизации производительности ПО, может быть использованы параллельные вычисления, графический процессор или другие средства аппаратного ускорения. Кроме того, для удобства пользователей может быть предоставлен доступ к онлайн-сервисам, позволяющим загружать геометрию конструкций и получать результаты моделирования в облаке.

3.2 Обзор возможностей профильного программного обеспечения

3.2.1 Программная реализация

После построения математических и физических моделей прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции, следует этап компьютерного моделирования. Здесь учитываются свойства конструкций, физика звуковых волн, планировка помещения и т.д.

3.2.2 Функциональные требования

Система должна предоставлять возможность пользователю создавать модель помещения. Возможность добавления конструкций, состоящих из определенных материалов, например, размещение стены из кирпича, металлической двери и т.д. Программное обеспечение должно давать возможность размещения источника звука внутри помещения.

Программное обеспечение должно выдавать отчет о звукопроницаемости помещения, слабых звукоизолированных точек в конструкциях. Возможность анализа коэффициента звукоизоляции различных материалов.

3.2.3 Программные модули системы

Программа будет включать в себя следующие модули:

Модуль 1. Создание схемы помещения.

Данный модуль включает в себя редактор с возможностью конфигурирования помещения: выбора размера, материала стен, конфигурации окон и дверей, расстановка мебели. Последующее сохранение карты помещения на носителе информации. Пример схемы помещения представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Пример схемы помещения

Модуль 2. Анализ звукоизоляции помещения.

Данный модуль подразумевает анализ звукоизоляции помещения на основе построенной модели помещения. Данный модуль, учитывая положение источника звука внутри помещения и информацию о звукоизоляции материалов из базы данных, высчитывает коэффициент прошедшего и поглощенного звука в помещении.

Модуль 3. Ввод данных о звукоизоляции различных материалов.

Данный модуль подразумевает добавление информации о коэффициентах звукопроницаемости, звукопоглощения, и звукоотражения для различных конструкций. Данная информация добавляется в базу данных.

Модуль 4. Формирование отчета о звукоизолированности помещения.

В данном модуле на основе анализа звукоизоляции помещения, формируется отчет о безопасности звуковой информации, содержащий информацию об общем коэффициенте звукоизоляции помещения, о возможных точках утечки информации. Отчет призван дать пользователю представление о итогах

работы программы и структурировать полученные данные для удобного анализа.

Модуль 5. Моделирование источника звука.

Этот модуль позволяет моделировать воздействие различных источников звука на звукоизоляцию помещения. Пользователи могут вводить данные о частоте, интенсивности и продолжительности источников звука, таких как динамики или человеческий голос. Программное обеспечение использует эту информацию для имитации прохождения звуковых волн через помещение и определения влияния каждого источника звука на общую звукоизоляцию помещения.

Модуль 6. База данных материалов.

Этот модуль содержит базу данных акустических материалов, которые можно использовать при создании модели помещения. Пользователи могут просматривать базу данных, чтобы найти материалы, которые необходимы для построения модели реальной комнаты. База данных может быть обновлена новыми материалами и их соответствующими акустическими свойствами.

Модуль 7. Рекомендации по акустической безопасности.

Этот модуль предоставляет пользователям рекомендации по оптимизации звукоизоляции помещения на основе проведенного системой анализа. Программное обеспечение может предложить изменения в планировке помещения, используемых строительных материалах и других элементах интерьера для улучшения звукоизоляции.

Модуль 8. Тестирование виртуального звука.

Этот модуль позволяет пользователям виртуально протестировать звукоизоляцию помещения, используя различные виртуальные источники звука. Пользователи могут вводить данные о частоте, интенсивности и продолжительности источника звука, а программное обеспечение будет моделировать прохождение звуковых волн через помещение для определения звукоизоляционных свойств помещения.

3.2.4 Взаимодействие модулей ПО

Для определения уровня звукоизоляции помещения необходимо сначала создать модель (схему) проверяемого помещения. Затем следует провести анализ звукоизоляции и определить ключевые характеристики акустической безопасности. Нужно рассчитать основные коэффициенты для каждого объекта, которые могут быть изготовлены из различных материалов. К таким коэффициентам относятся: коэффициенты звукоотражения, звукопоглощения, звукоизоляции, прохождения и рассеивания звука.

Входными данными для создания модели помещения являются: размеры помещения, расположение объектов (стен, предметов интерьера, дверей, пола, потолка и т.д.) и материалы, из которых эти объекты изготовлены.

Выходными данными будет визуализация утечек акустической информации в помещении. Диаграмма взаимодействия модуля построения модели помещения представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Диаграмма взаимодействия модуля построения модели

Также может потребоваться обновление базы данных, которая содержит информацию о материалах объектов и их параметры. Здесь специалист по информационной безопасности может добавить или обновить информацию по необходимым материалам.

Модуль анализа получает на вход параметры помещения и параметры помещения (акустические коэффициенты для каждого материала).

Выходными данными модуля является результат анализа. Он включает в себя моделирование звуковых волн и их взаимодействие с материалами (какая часть звуковых волн была пройдена сквозь преграду, а какая была рассеяна). Диаграмма взаимодействия данного модуля представлена на рисунке 4.

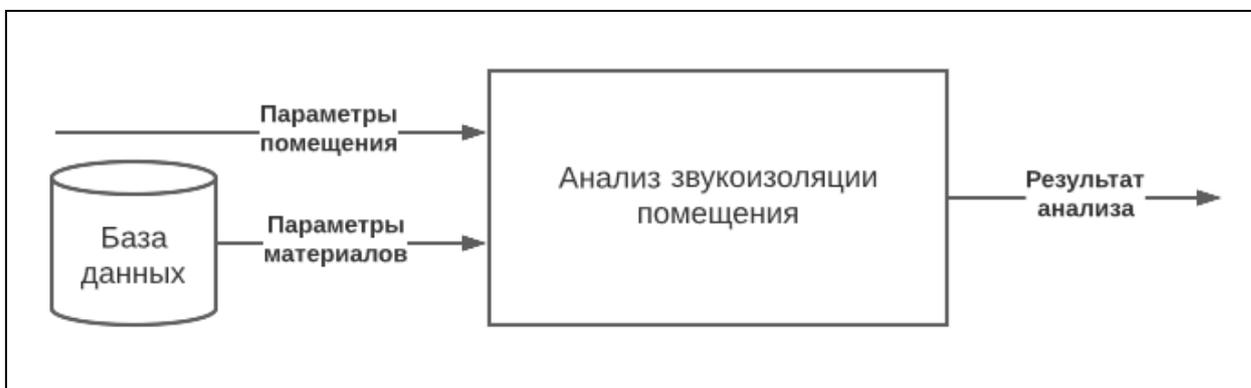


Рисунок 4 – Диаграмма взаимодействия модуля анализа

Для визуализации работы ПО, следует осуществить декомпозицию контекстной диаграммы. Определить внутренние структурные элементы, а также входные и выходные данные. Декомпозиция ПО представлена на рисунке 5.

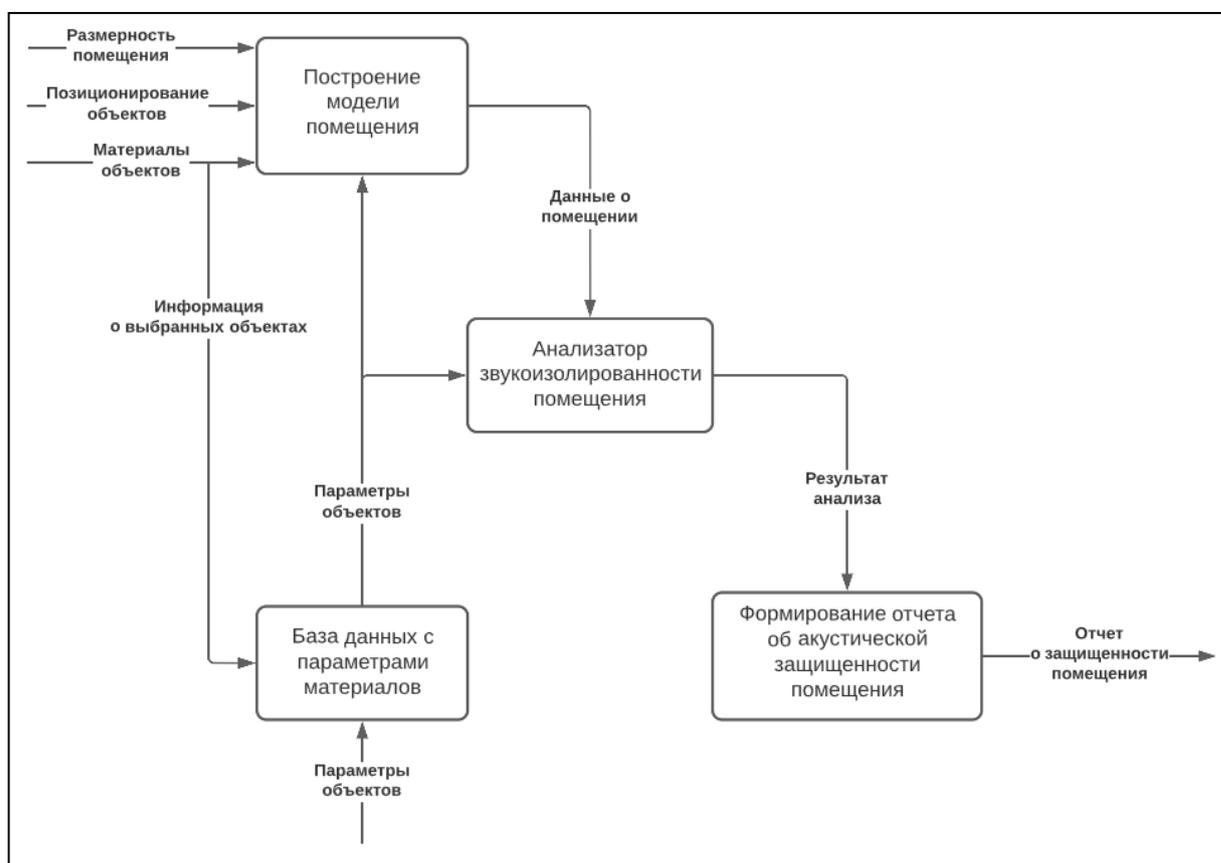


Рисунок 5 – Декомпозиция работы ПО

При использовании данного программного обеспечения пользователь получает возможность создавать модель помещения с учетом его размеров и материалов перекрытий. Это позволяет более точно прогнозировать акустические характеристики помещения и определять его уровень звукоизоляции.

Одним из важных элементов моделирования помещения является расстановка мебели и других объектов интерьера. Это позволяет учесть их влияние на акустику помещения и оптимизировать расположение для достижения максимальной звукоизоляции.

Пользователь также может добавить источники звука в модель, включая разговаривающих людей, работающие компьютеры и системы кондиционирования. Это помогает учесть шумовую обстановку и определить уровень шума, который может проникать в помещение извне.

После создания модели помещения, ей присваиваются физические параметры, и модель передается на анализатор, который моделирует энергию звука источников. Анализатор высчитывает акустические коэффициенты, которые позволяют оценить характеристики звукоизоляции помещения.

Следующим шагом формируется отчет об акустической защищенности помещения. Отчет содержит показатели защищенности каждой конструкции, а также защищенность помещения в целом. Также пользователю будет представлена визуализация точек утечки акустической информации.

В модуль моделирования источника звука пользователь вводит данные о частоте, интенсивности и продолжительности источников звука, таких как динамики или голос человека. Далее программное обеспечение моделирует влияние каждого источника звука на общую звукоизоляцию помещения.

В базе данных материалов программное обеспечение сохраняет данные акустических материалов вместе с их соответствующими звукоизоляционными свойствами. Пользователи могут просматривать содержимое базы данных, чтобы найти материалы, отвечающие конкретным требованиям к звукоизоляции. Также пользователи с уровнем доступа администратора, могут добавлять, изменять и удалять данные.

Модуль рекомендаций по акустической безопасности анализирует звукоизоляционные свойства помещения. Далее программа формирует рекомендации по улучшению звукоизоляции помещения на основе проведенного анализа.

В модуле тестирования виртуального звука, пользователь может выяснить качество звукоизоляции на основе построенной модели помещения и данных о звукоизоляции материалов. В данном модуле можно наглядно протестировать прохождение звуковых волн через ограждающие конструкции, за счет расположения источников звука в конструкторе помещения.

3.3 Обоснование выбора программно-технического обеспечения

Обоснование выбора программного обеспечения COMSOL для моделирования прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции в дипломной работе основывается на ряде ключевых факторов:

- мощные инструменты для моделирования: COMSOL предлагает обширный набор инструментов для численного моделирования различных физических процессов, включая акустические явления. Благодаря многопроцессорным вычислениям, COMSOL позволяет эффективно моделировать сложные системы, что особенно важно при проведении акустических расчетов через конструкции;
- мультифизический подход: Программное обеспечение COMSOL позволяет интегрировать различные физические процессы в единую модель, что особенно полезно при моделировании звукопоглощающих и звукорассеивающих материалов, которые могут быть частью ограждающих конструкций;
- гибкость и настраиваемость: COMSOL предоставляет возможность настройки моделей в соответствии с конкретными требованиями исследования. Это позволяет учесть различные параметры материалов и геометрии конструкций для более точных и реалистичных результатов;
- обширные возможности визуализации: Пакет визуализации COMSOL позволяет представлять результаты моделирования в удобном и наглядном формате. Это особенно важно для анализа прохождения звуковых

волн через ограждающие конструкции и оценки эффективности различных акустических материалов;

- поддержка: COMSOL обладает развитым сообществом пользователей и обширными ресурсами поддержки, включая документацию, форумы и обучающие материалы. Это значительно упрощает процесс обучения и решения возникающих вопросов;

- проверенная точность и валидация: COMSOL известен своей высокой точностью моделирования, что подтверждается многочисленными научными исследованиями и публикациями. Это особенно важно при проведении акустических расчетов, где малейшие неточности могут существенно повлиять на результаты. Возможность верификации и валидации моделей с помощью экспериментальных данных повышает доверие к результатам, полученным с использованием COMSOL;

- многообразие модулей и дополнений: В COMSOL доступно множество специализированных модулей, которые могут быть полезны для акустического моделирования, таких как модуль для акустики, модуль для структурной механики, модуль для термических расчетов и другие. Это позволяет создавать комплексные модели, учитывающие различные аспекты взаимодействия звуковых волн с материалами и конструкциями.

Все эти факторы делают COMSOL подходящим выбором для моделирования прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции и обеспечивают достоверные и практически значимые результаты исследования.

4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ

4.1 Основные этапы практической разработки программного продукта

Разработка компьютерной модели велась с помощью программного пакета Comsol Multiphysics. Процесс разработки можно разделить на следующие этапы:

- построение 3D-модели исследуемого помещения;
- присвоение физических свойств материалам, из которых состоят стены, мебель и другие элементы конструкции;
- размещение источников и приемников звука, а также задание их физических характеристик;
- математическое и физическое моделирование звука и его взаимодействия с ограждающими конструкциями;
- визуализация и анализ полученных результатов исследования.

4.1.1 Разработка 3D-модели помещения

Для облегчения работы над моделью помещения необходимо сначала создать его чертеж. Это позволит иметь точную визуализацию, на которую можно будет опираться при построении модели.

Конфигурация исследуемого помещения, следующая: комната переговоров с двумя источниками звука (человеческими голосами), дверью и одним окном с тройным стеклопакетом. В комнате также находится мебель, которая будет учитываться в расчетах. Смежная комната, в которую ведет дверь, является приемной. Также, с другой стороны, есть, еще одна комната, отделенная от переговорной, стеной, в слой кирпичной кладки и штукатурки. Окно выходит на улицу. Противоположная от окна стена, в исследовании не задействована, так как является несущей и утечки информации при обычном разговоре не произойдет. Таким образом точками потенциального подслушивания будут являться две смежные комнаты и пространство перед окном с уличной стороны. Схематичный чертеж представлен на рисунке 6. На рисунке можно

увидеть комнаты, мебель, говорящих людей и основные конструкции. Под цифрой 1, 2 – обозначены воздушные пространства двух смежных комнат, цифра 3 означает воздушное пространство за окном, т.е. на улице.

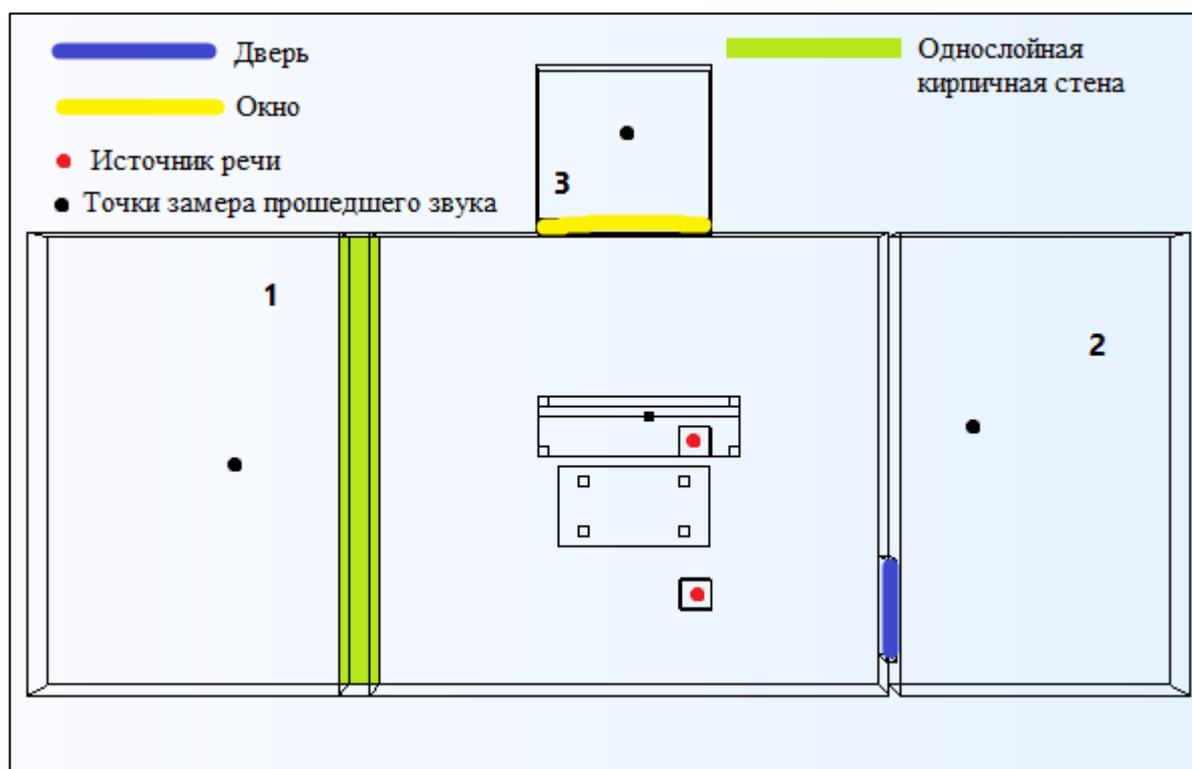


Рисунок 6 – Схема исследуемого помещения

Далее подробнее рассмотрим размерность помещения. В основной комнате глухая стена и стена с окном в длину 5 метров. Смежные стены, соединяющие соседние помещения имеют длину в 4,5 метра. Высота от пола до потолка как основного помещения, так и смежных равняется 2,5 метра. Размерность двери составляет 2 метра в высоту и 1 метр в ширину. Параметры окна следующие, ширина 1,7 метра, а высота 1 метр, толщина стеклопакета составляет 14 сантиметров. От пола окно находится на возвышении 1 метра.

Смежное помещение за дверью имеет следующие параметры 2,8 метра на 4,5 метра. Помещение за глухой кирпичной стеной имеет параметры: 3 метра на 4,5 метра. В данных помещениях проработаны только стены смежные с основной комнатой переговоров. Остальными стенами можно пренебречь

ввиду того, что в расчётах их наличие или отсутствие никак не повлияет на результат.

Модель помещения была построена в редакторе программного пакета Comsol. Построение модели началось с создания кубических тел, которые обозначают воздушное пространство помещений с необходимыми для каждого помещения границами. Далее необходимо добавить материал воздух, в среде Comsol уже есть соответствующие данные и параметры передачи звука в воздушной среде. Поэтому стоит лишь добавить материал и указать ранее созданные области. Данные области показаны на рисунке 7.

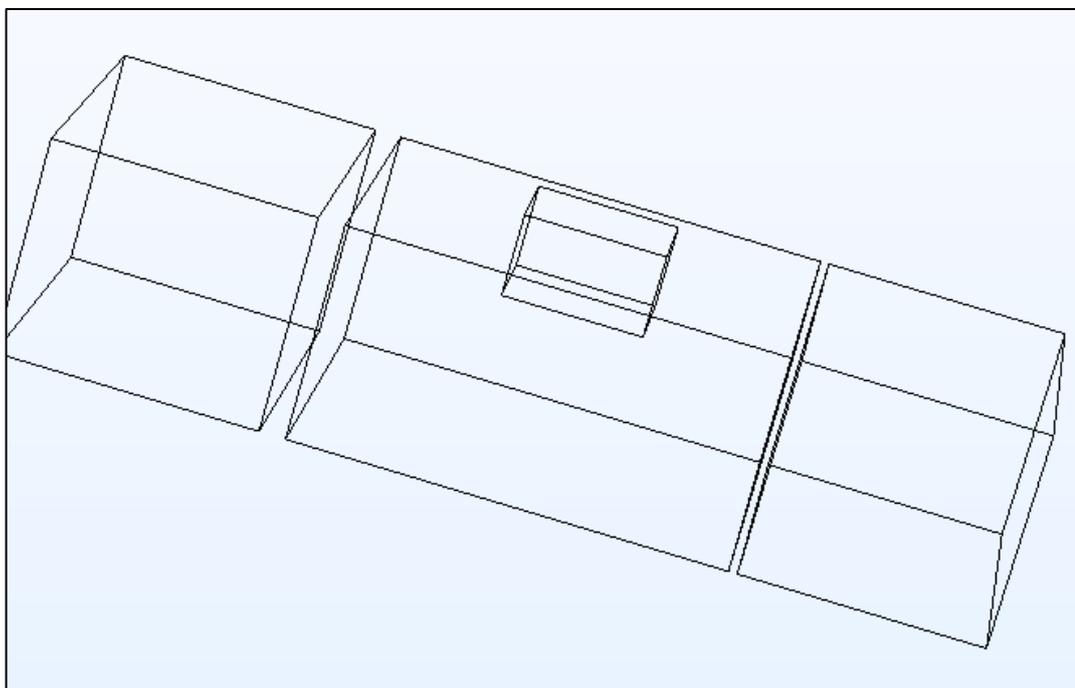


Рисунок 7 – Воздушное пространство исследуемого помещения

Далее добавляем стену, дверь и окно, которые необходимо проверить на звуковую проницаемость. Также добавляем источники звука и мебель. Пока это просто геометрические объекты. Свойства этим объектам будем присваивать в следующем пункте. Данные объекты представлены на рисунке 8.

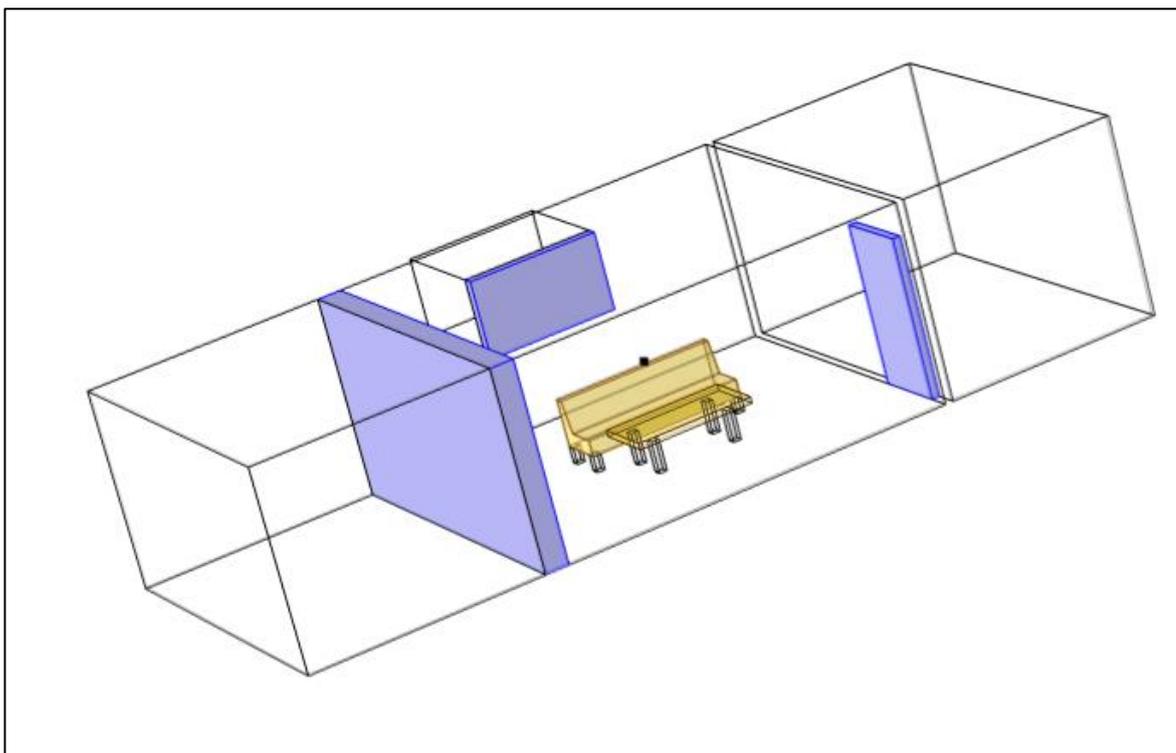


Рисунок 8 – Добавление объектов измерения

4.1.2 Физические свойства материалов

После построения 3D-модели следует присвоить физические свойства материалам. Для расчета звукоизолированности помещения необходимо придать нужные свойства каждому материалу через которые замеряется проницаемость звука. Также следует отметить непроницаемые стены и стены, которые не используются в расчетах. Таким образом получено замкнутое помещение, в котором можно будет провести исследование.

Для начала присвоим соответствующие физические свойства для кирпичной стены, окна и двери. В этих материалах для расчета звуковой проницаемости необходимо указать такие параметры как: скорость звука в материале (м/с), плотность материала (кг/м^3), а также коэффициент поглощения звука материалом (дБ).

Параметры для кирпичной стены, следующие:

Плотность – 574 кг/м^3 , скорость звука – 2200 м/с , коэффициент поглощения звука – 47 дБ . Исходя из этих параметров добавляем материал

«Кирпичная стена» в соответствующий раздел окружения Comsol. Также поступаем с другими материалами. Кирпичная стена отображена на рисунке 9.

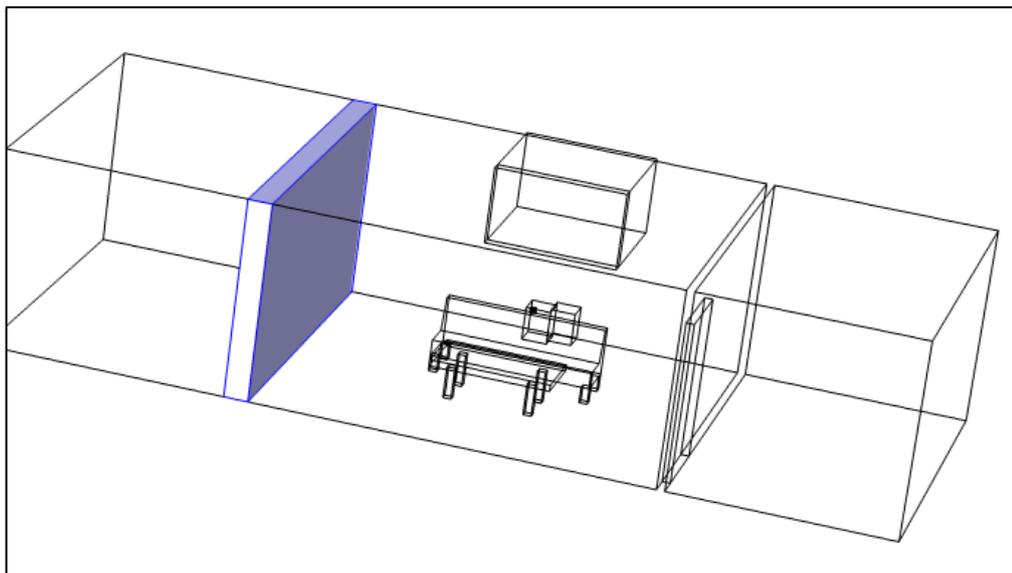


Рисунок 9 – Объект кирпичная стена

Параметры стеклопакета в оконной раме, следующие:

Плотность – 2500 кг/м^3 , скорость звука – 5200 м/с , коэффициент поглощения звука – 35 дБ . Здесь также добавляется материал и указывается соответствующий ему геометрический объект. Объект стеклопакет представлен на рисунке 10.

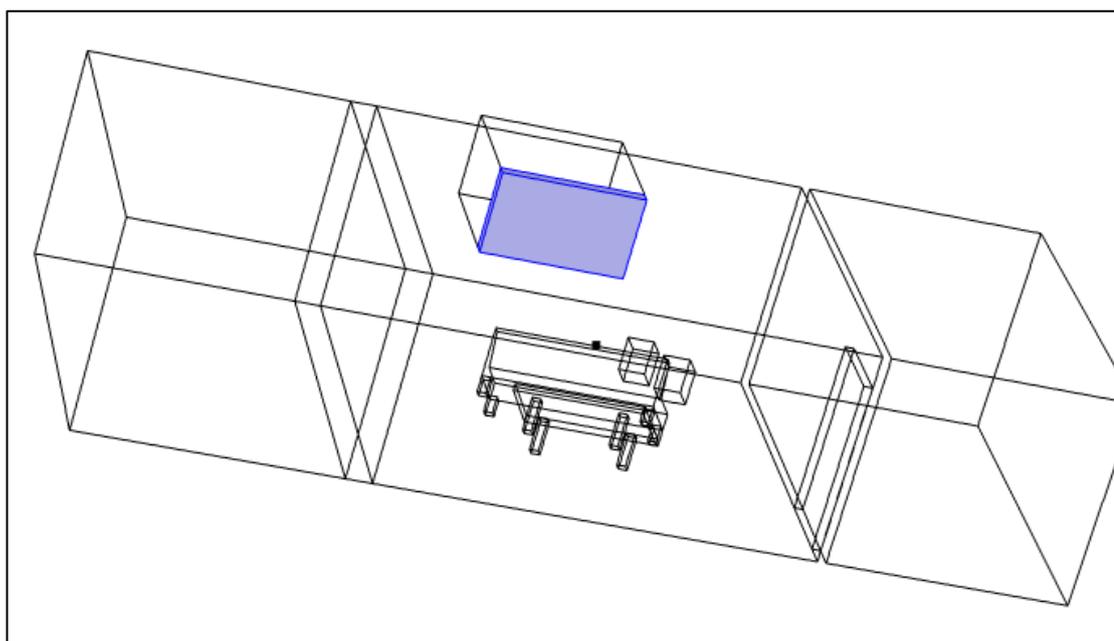


Рисунок 10 – Объект стеклопакет

Параметры для сосновой двери, следующие:

Плотность – 532 кг/м^3 , скорость звука – 850 м/с , коэффициент поглощения звука – 12 дБ. Объект сосновая дверь представлен на рисунке 11.

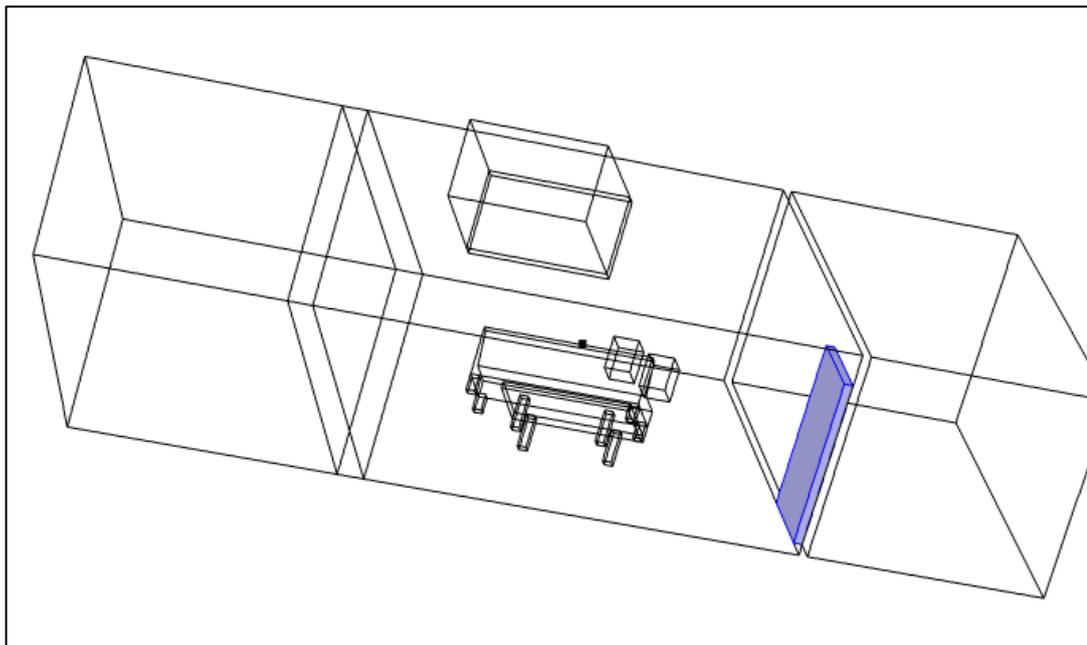


Рисунок 11 – Объект сосновая дверь

Также в модуле акустики указываются стены каждой комнаты, которые не будут исследоваться на прохождение звуковых волн. Такие стены являются несущими или внешними, поэтому данные стены не учитываются в расчётах прохождения звуковых волн. Этот подход позволяет сосредоточиться на исследовании акустических свойств внутренних перегородок и звукопоглощающих материалов, что является основным предметом исследования.

На данном этапе следует создать отдельный модуль для каждой комнаты, в котором будут отмечены все стены. В этих модулях расчёты проводятся для твердых тел, что позволяет учитывать влияние материала стен на распространение звуковых волн. Использование такого подхода обеспечивает более точное моделирование акустической среды в каждой комнате, учитывая характеристики и свойства материалов, из которых построены стены. На рисунке 12 приведен пример одной из таких комнат.

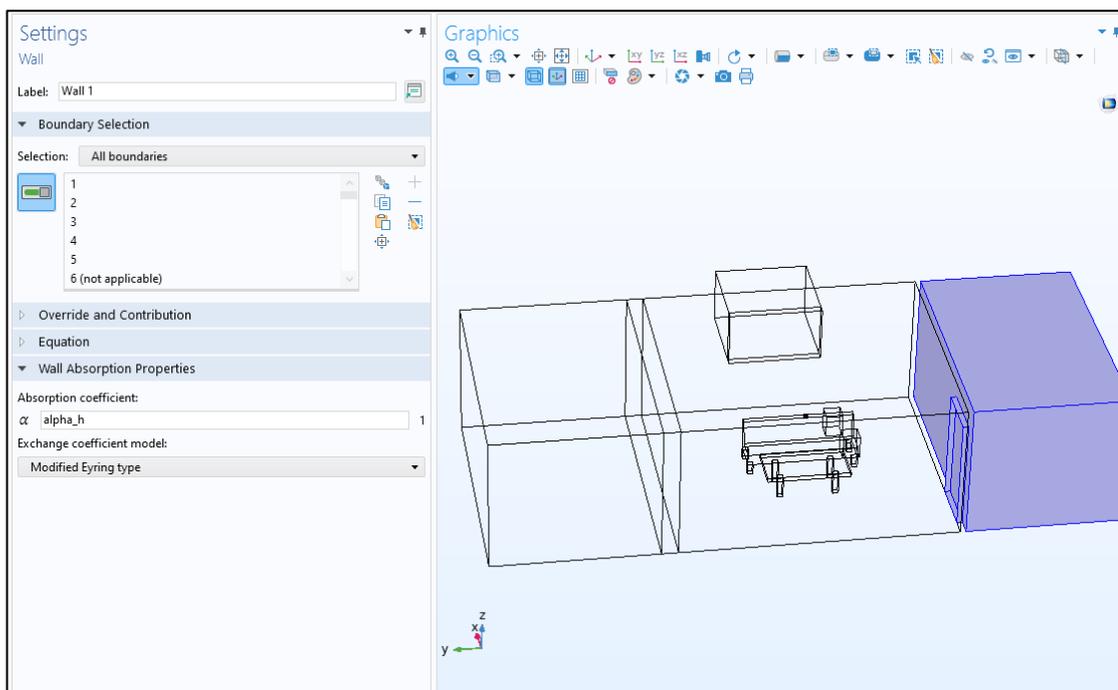


Рисунок 12 – Модуль комнаты приемной

4.1.3 Создание источников звука

На данном этапе необходимо создать источники голосов для моделирования звуковой среды в комнате. Для этого сначала создадим геометрические объекты, к которым будет привязан звук (голос). В качестве геометрических объектов выберем параллелепипеды, что соответствует форме акустических колонок. Это упрощение не повлияет на результаты исследования, так как форма источника звука в данном случае не имеет решающего значения для моделирования распространения звуковых волн.

Таким образом, два разговаривающих человека будут представлены в виде абстрактных громкоговорителей. В данной работе уровень громкости речи будет равен 50-60 дБ, что соответствует спокойному разговору человека. Эти геометрические объекты позволят нам моделировать акустические свойства и взаимодействие звуковых волн, исходящих от двух отдельных источников. Созданные объекты представлены на рисунке 13.

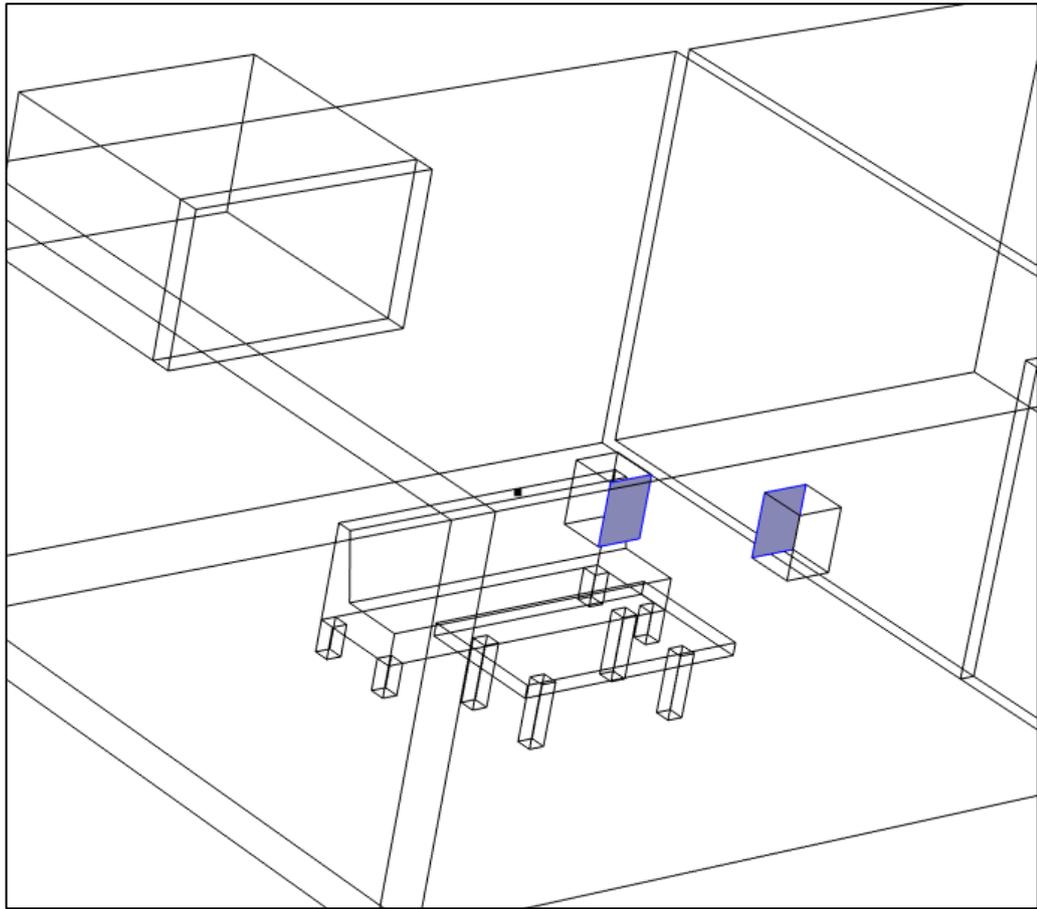


Рисунок 13 – Источники звука

Далее следует выбрать граничные условия, исходные области формирования звука. Также следует указать физические параметры для говорящих. Подробнее физические и математические модели будут разобраны далее. На данный момент 3D-модель помещения готова и с ней уже можно полноценно работать.

4.1.4 Математическое и физическое моделирование

На данном этапе происходит непосредственно настройка математической и физической моделей, а также отладка модуля акустических вычислений.

Акустические вычисления являются непосредственно основным инструментом в данном исследовании, ведь именно в нем решаются основные задачи. Здесь осуществляются вычисления коэффициентов акустической диффузии для каждой среды (мягкой и твердой), а также происходит само визуальное

моделирование энергии звука от источников. Коэффициент акустической диффузии был вычислен на основе скорости распространения и степени поглощения звука в помещении по формуле:

$$D = \frac{4cV}{3S}, \quad (6)$$

где D – коэффициент диффузии,

c – скорость звука,

V – объем помещения,

S – площадь стен, пола и потолка.

Физическое моделирование:

- дверь в помещение выступает как элемент соединения с прилежащими помещениями и областями, поглощает 12 дБ. Также связующими являются окно и кирпичная стена, которые поглощают соответственно 35 дБ и 47 дБ;

- в данном исследовании моделирование решается для «плоской полосы», имеется ввиду, что коэффициенты поглощения считаются независимыми от константы (частоты);

- применяются следующие коэффициенты поглощения: для мягких поверхностей – 0,7, а для твердых – 0,25.

Ввиду получения наиболее реалистичных результатов изменены надстройки модуля акустики в помещении, а именно включены различные коэффициенты для материалов и в разных частотных диапазонах.

Предположив, что звук в пространстве изотропный, прогнозируется, что большая часть исследуемого помещения будет испытывать прямую зависимость звука от каждого источника, аппроксимированного формулой:

$$I_n = \frac{P_n}{2\pi r_n^2}, \quad (7)$$

где I_n – распределение интенсивности некоторого акустического поля;

P_n – мощность от источника n ;

r_n – расстояние до центра источника n .

Это соответствует квадратичной амплитуде давления, отраженной в формуле:

$$|p_n|^2 = 2Z_0 I_n, \quad (8)$$

где p_n – амплитуда давления звуковой волны;

Z_0 – характерное комплексное акустическое сопротивление среды;

I_n – распределение интенсивности некоторого акустического поля.

По итогу, общий уровень звукового давления будет выглядеть:

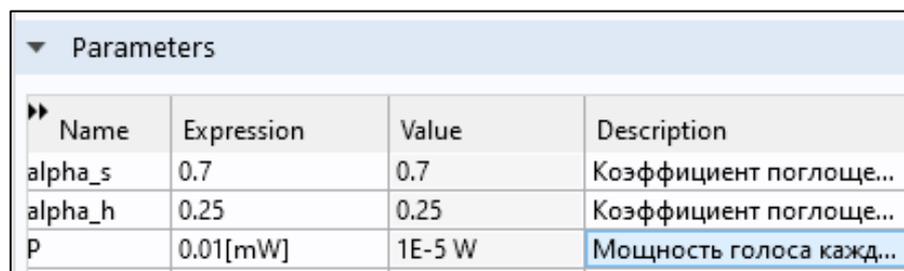
$$10 \log_{10} \left(\frac{|p_d|^2 + |p_1|^2 + |p_2|^2}{|p_{ref}|^2} \right), \quad (9)$$

где p_d – диффузное давление,

p_n – амплитуда давления звуковой волны,

$p_{ref} = 20 \times 10^{-6}$ Pa.

Далее укажем глобальные параметры в программном пакете «Comsol», показаны на рисунке 14. Здесь α_s – коэффициент поглощения для мягких поверхностей, α_h – коэффициент поглощения для твердых поверхностей и P – мощность голоса каждого из источников звука.



Parameters			
Name	Expression	Value	Description
alpha_s	0.7	0.7	Коэффициент поглоще...
alpha_h	0.25	0.25	Коэффициент поглоще...
P	0.01[mW]	1E-5 W	Мощность голоса кажд...

Рисунок 14 – Глобальные параметры

Давайте определим основные переменные, которые будут использоваться в последующих вычислениях. Здесь также представим не только сами переменные, но и основные формулы для них. Данные представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Набор переменных

Название	Значение	Единица измерения	Описание
A	$\text{intop1}(1)$	m^2	Общая площадь поверхности источника звука
J	$2 \cdot P/A$	W/m^2	Внутренний поток энергии
x1	$\text{sp1}(x)$	m	Центральная точка первого источника звука x
y1	$\text{sp1}(y)$	m	Центральная точка первого источника звука y
z1	$\text{sp1}(z)$	m	Центральная точка первого источника звука z
x2	$\text{sp2}(x)$	m	Центральная точка второго источника звука x
y2	$\text{sp2}(y)$	m	Центральная точка второго источника звука y
z2	$\text{sp2}(z)$	m	Центральная точка второго источника звука z
r1	$\sqrt{(x-x1)^2+(y-y1)^2+(z-z1)^2}$	m	Расстояние от первого источника звука
r2	$\sqrt{(x-x2)^2+(y-y2)^2+(z-z2)^2}$	m	Расстояние от второго источника звука

l1	$P/(2*\pi*r1^2)$	W/m ²	Интенсивность прямого звука от первого источника
l2	$P/(2*\pi*r2^2)$	W/m ²	Интенсивность прямого звука от второго источника
z0	sp1(ade.c*ade.rho)	kg/(m ² ·s)	Характеристическое акустическое сопротивление
psq1	2*I1*z0	kg/(m ² ·s ⁴)	Квадрат давления от первого источника звука
psq2	2*I2*z0	kg/(m ² ·s ⁴)	Квадрат давления от второго источника звука

Далее обозначим распространение звука в исследуемом помещении. Укажем логарифмическую формулу для представления звука в дБ. Распространение звука и логарифмическая формула представлены на рисунке 15.

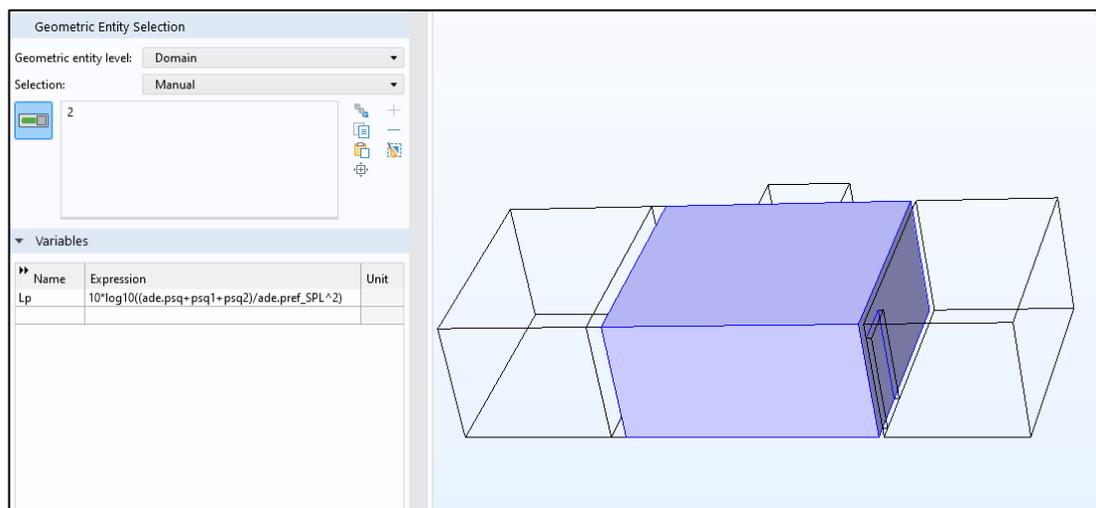


Рисунок 15 – Распространение звука в помещении и логарифмическая формула

Далее необходимо обозначить распространение звука в остальных помещениях, а также в пространстве перед окном. Распространение звука представлено на рисунке 16.

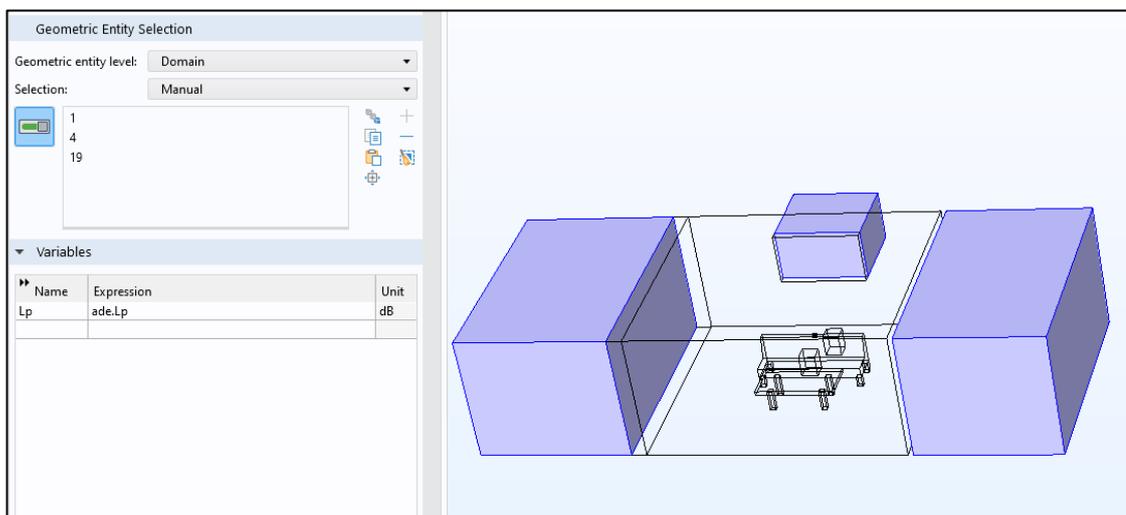


Рисунок 16 – Распространение звука в прилегающих помещениях

Здесь также воспользуемся инструментом, который позволит перевести наши данные в децибелы. Это необходимо для автоматизированного анализа в акустическом модуле программного пакета «Comsol».

На следующем этапе определим точки, выходы, грани, поверхности, зоны воздействия акустических возмущений и граничные условия.

Для каждого источника звука необходимо определить усредненный интегральный показатель громкости. Это позволит количественно оценить мощность звука, излучаемого каждым источником, и его влияние на акустическую среду комнаты. Усредненный интегральный показатель громкости определяется путем интегрирования звукового давления по поверхности источника звука.

Далее разберем первый источник звука и в данном случае это поверхность параллелепипеда, обращенная к глухой стене. В данном случае порядок интегрирования выбран четвертый. Показатели первого источника звука представлены на рисунке 17.

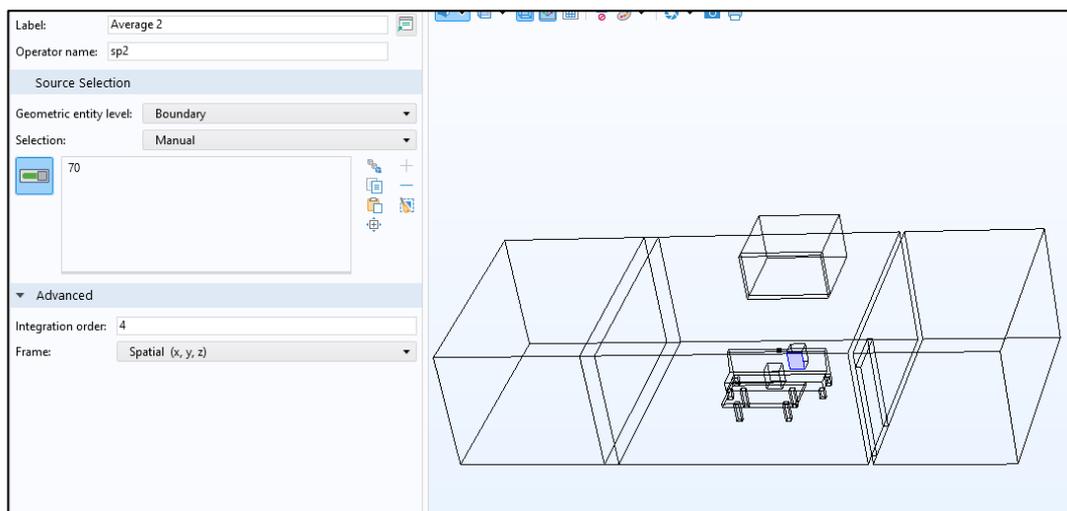


Рисунок 17 – Показатели первого источника

Второй источник звука, также является поверхностью параллелепипеда, обращенного в сторону окна. Здесь также порядок интегрирования выбран четвертый. Показатели второго источника звука представлены на рисунке 18.

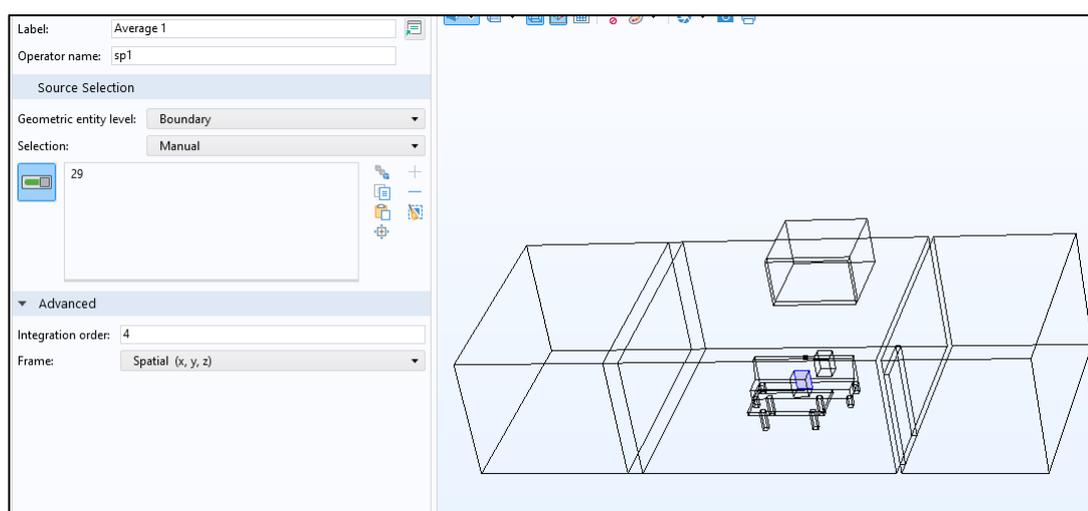


Рисунок 18 – Показатели второго источника

Далее показана интеграция обоих источников звука, т.е. если бы они вели диалог. Интеграция голосов представлена на рисунке 19.

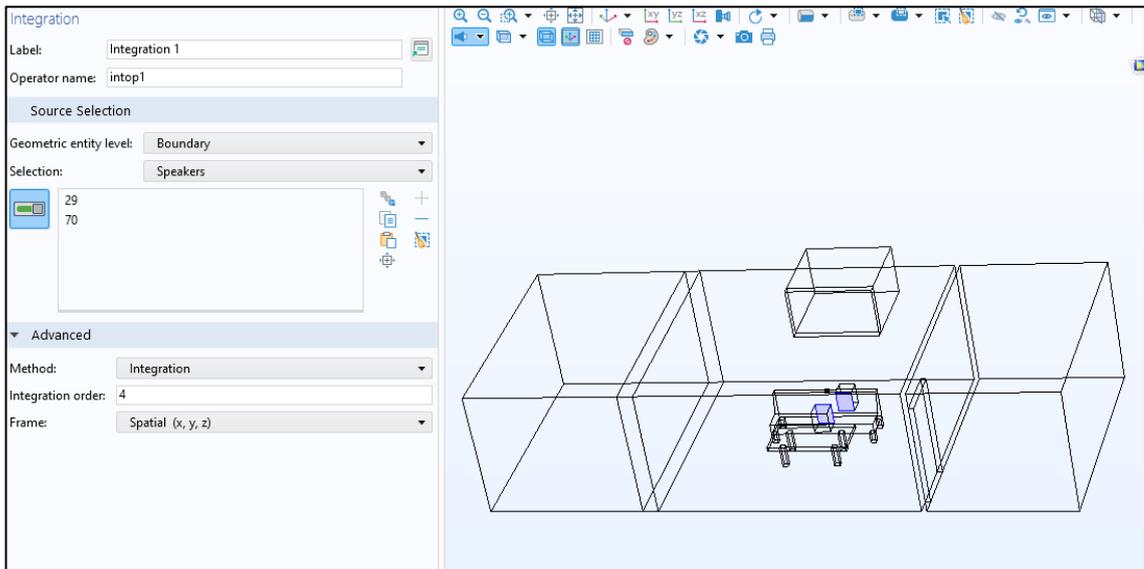


Рисунок 19 – Интеграция двух источников звука

Форма уравнения будет определена в процессе вычислений на различных этапах. В данной работе число этапов вычислений составляет один, поэтому можно сразу приступить к описанию основного уравнения. Кроме того, в разделе настроек уровня звукового давления указывается начальное (опорное) давление звука для воздуха, равное $p_{ref,SPL} = 20\mu Pa$. Уравнение акустической диффузии, а также начальное давление представлены на рисунке 20.

Далее рассмотрим уравнение акустической диффузии подробнее:

$$\nabla \cdot (-D_t \nabla \omega) + c m_a \omega = q, \quad (10)$$

где ω – акустическое давление или энергия звука,

D_t – коэффициент акустической диффузии,

$c m_a$ – коэффициенты, связанные с поглощением или усилением звука,

q – внешний источник звука.

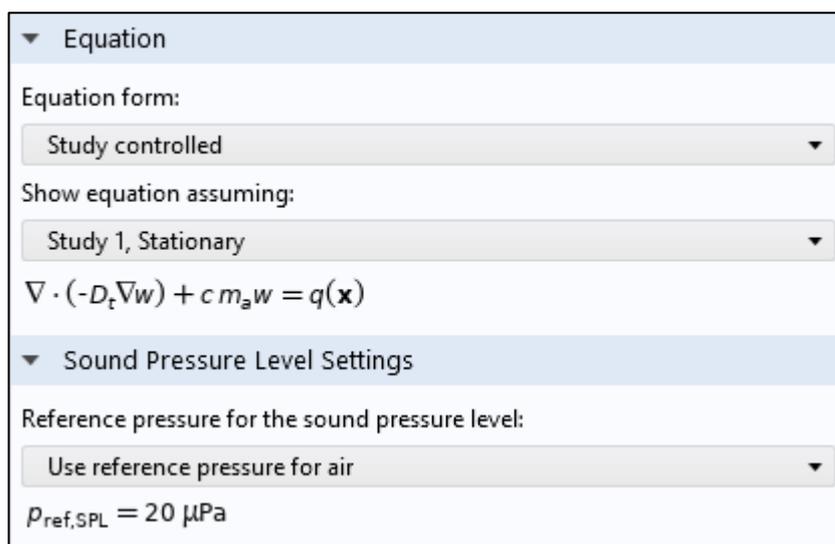


Рисунок 20 – Основное уравнение и начальное давление звука для воздуха

Дополнительно в разделе настроек был выбран тип входного сигнала диапазона, который определен как плоский (непрерывный). Данный тип предпочтительней использовать для жилых и офисных помещений. Данная настройка представлена на рисунке 21.

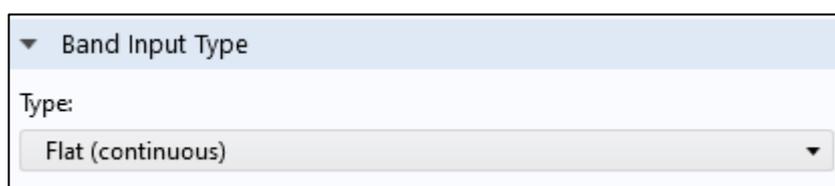


Рисунок 21 – Тип входного сигнала диапазона

На этом этапе также устанавливается квадратичная дискретизация, а основной зависимой переменной является плотность звуковой энергии. Эти настройки отображены на рисунке 22.



Рисунок 22 – Дискретизация и плотность звуковой энергии

Переходим к настройке параметров модели акустической диффузии. Основное уравнение модели остается практически неизменным, однако требуется добавить следующие входные параметры: температуру, абсолютное давление и эталонную температуру деформации. Данные параметры представлены на рисунке 23.

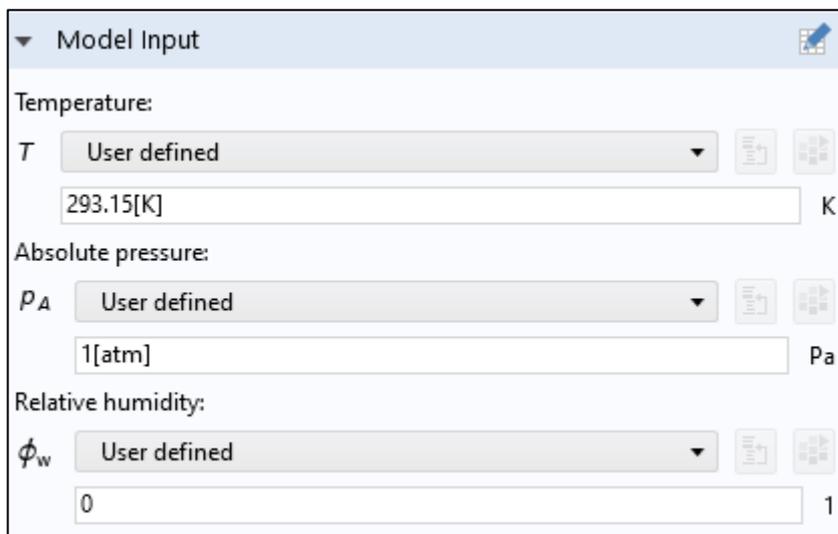


Рисунок 23 – Параметры модели акустической диффузии

Также стоит отметить, что в модели акустической диффузии есть возможность задать характеристики материала, однако в нашем случае характеристики материала были заданы ранее. Так что здесь данные будут взяты для отдельного материала.

Переходим к основным формулам расчета для исследуемых помещений. Несмотря на то, что отдельные комнаты представлены как отдельные объекты, формулы одинаковы для каждой области внутри помещения. Это сделано для того, чтобы можно было вносить изменения в содержание комнат без влияния на данные других помещений.

Далее подробнее рассмотрим основные формулы расчета. Формула для коэффициента диффузии D :

$$D_t = D = \frac{\lambda c}{3}, \quad (11)$$

где D – коэффициент акустической диффузии,
 λ – средняя длина свободного пробега частиц,
 c – средняя скорость частиц.

Коэффициент диффузии D описывает, насколько эффективно вещество или энергия распространяется в среде. Он выражается через среднюю длину свободного пробега частиц λ и среднюю скорость частиц c . Данная формула 11 используется для моделирования диффузионных процессов.

Средняя длина свободного пробега λ , представлена в формуле:

$$\lambda = \frac{4V}{S}, \quad (12)$$

где λ – средняя длина свободного пробега,
 V – объем области,
 S – площадь поверхности границы области.

Средняя длина свободного пробега λ определяется как среднее расстояние, которое частица проходит между столкновениями. В данном контексте это расстояние зависит от объема V и площади поверхности S , формулы расчета которых будут рассмотрены далее. Формула 12 предполагает, что средняя длина свободного пробега пропорциональна объему и обратно пропорциональна площади поверхности.

Площадь поверхности S и объем области V :

$$S = \int_{\Omega} 1 dA, \quad (13)$$

где S – площадь поверхности,
 dA – элемент площади на поверхности.

Формула 13 просто говорит о том, что площадь S равна интегралу по элементам площади dA . Это стандартное определение площади поверхности, которое используется в интегральном исчислении.

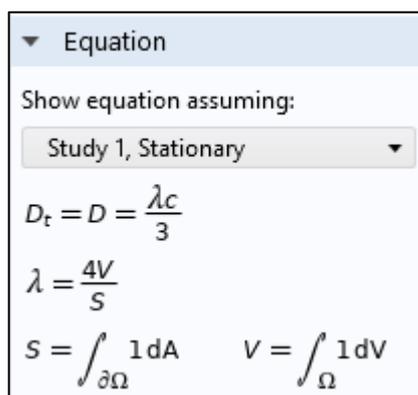
$$V = \int_{\partial\Omega} 1dV, \quad (14)$$

где V – объем области,

dV – элемент объема.

Формула 14 аналогично предыдущей говорит о том, что объем V равен интегралу по элементам объема dV . Это стандартное определение объема, используемое в интегральном исчислении.

Эти взаимосвязанные формулы 11, 12, 13, 14 позволяют вычислять и понимать процессы диффузии и распространение энергии в различных средах. Представление этих формул в программном пакете COMSOL представлено на рисунке 24.



Equation

Show equation assuming:
Study 1, Stationary

$$D_t = D = \frac{\lambda c}{3}$$

$$\lambda = \frac{4V}{S}$$

$$S = \int_{\partial\Omega} 1 dA \quad V = \int_{\Omega} 1 dV$$

Рисунок 24 – Основные формулы расчета

В основном исследуемом помещении, а также в смежных выбраны стены, которым присвоен коэффициент поглощения твердых материалов. Формулы для расчета звука, а также обозначенные «твердые» поверхности представлены на рисунке 25.

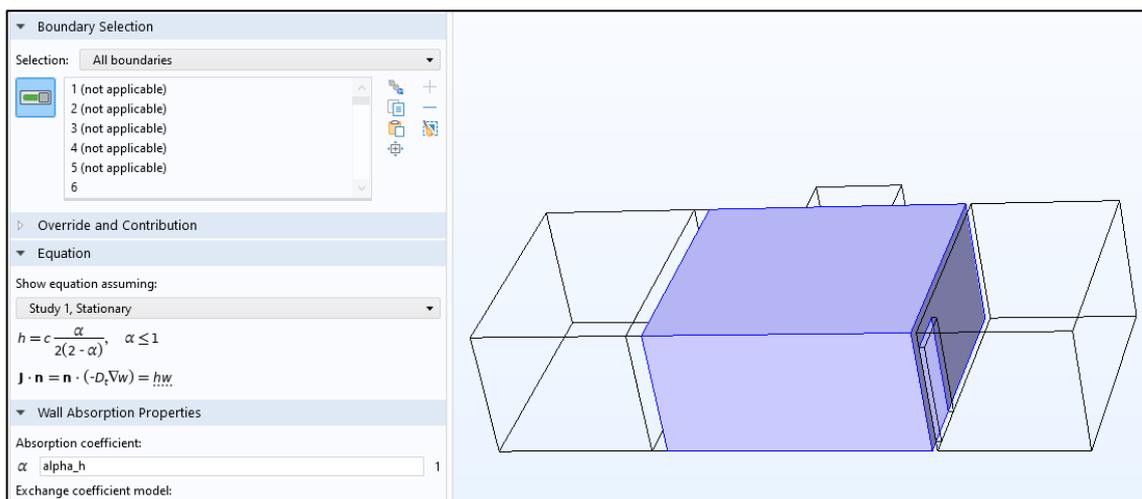


Рисунок 25 – Формулы расчета и обозначение «твердых» поверхностей

Далее рассмотрим эти формулы подробнее. Формула для коэффициента h , представленная формулой:

$$h = c \frac{\alpha}{2(2-\alpha)}, \alpha \leq 1, \quad (15)$$

где h – некоторый коэффициент, зависящий от α ,

c – средняя скорость частиц,

α – безразмерный параметр, удовлетворяющий условию $\alpha \leq 1$.

Формула 15 выражает коэффициент h через среднюю скорость частиц c и параметр α . Параметр α характеризует физическое явление поглощения. Условие $\alpha \leq 1$ ограничивает область применения формулы.

Формула для плотности потока J и нормали n , представленная формулой:

$$J \cdot n = n \cdot (-D_t \nabla w) = hw, \quad (16)$$

где J – вектор плотности потока,

n – единичный вектор нормали к поверхности,

D_t – коэффициент диффузии,

w – скалярное поле, в данном случае акустическая энергия,

h – коэффициент, определенный в формуле, рассмотренной выше.

Формула 16 описывает баланс на границе области в диффузионных процессах. Далее рассмотрим её подробнее:

- вектор плотности потока $J = -D_t \nabla w$ показывает, как интенсивно переменная w диффундирует через среду. Он направлен в сторону уменьшения w и зависит от градиента ∇w и коэффициента диффузии D_t ;

- проекция плотности потока на нормаль $J \cdot n$. Эта часть выражает поток через поверхность, нормаль к которой задана вектором n . Она показывает, насколько интенсивно w переносится через границу области;

- баланс на границе $J \cdot n = hw$. В этом уравнении правая часть hw может интерпретироваться как величина, пропорциональная значению w на границе. Коэффициент h определяет пропорциональность и зависит от параметра α и средней скорости частиц c . Это уравнение описывает граничные условия, где поток пропорционален значению переменной на границе.

Эти формулы 15, 16 вместе являются частью модели, описывающей диффузионные процессы и их граничные условия в различных средах, в данном случае в твердых телах.

Для мебели в этом помещении присвоен коэффициент для «мягких» поверхностей. Формулы расчета остаются такими же, как и рассмотренные выше. Обозначенные «мягкие» поверхности представлены на рисунке 26.

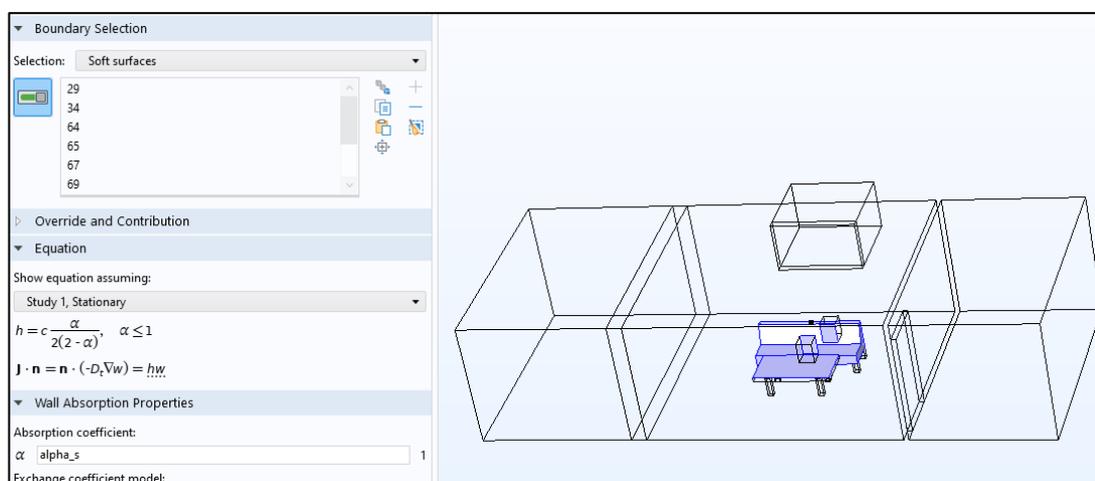


Рисунок 26 – Обозначенные «мягкие» поверхности

Следует отметить формулу для расчета звуковой проницаемости ограждающих конструкций, которые выступают препятствиями между исследуемой и смежными комнатами. Также в данных объектах указывается коэффициент поглощения. Формула и пример коэффициента для кирпичной стены представлены на рисунке 27.

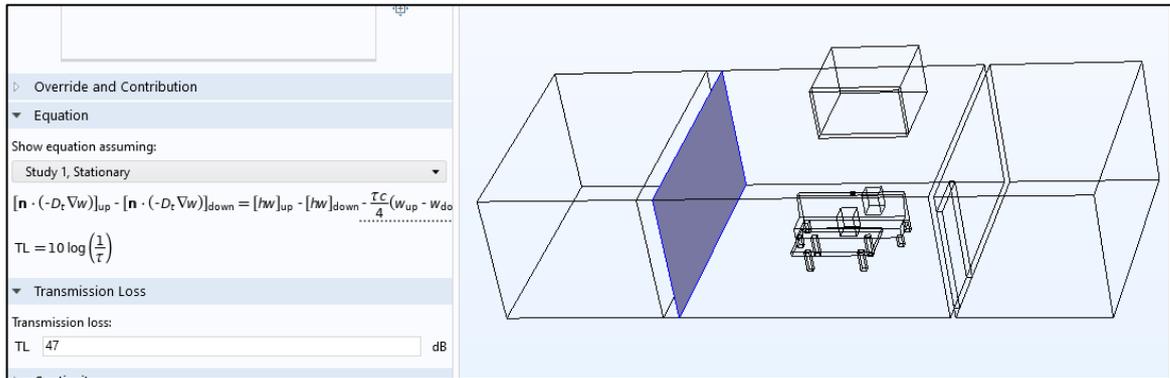


Рисунок 27 – Формула расчета звуковой проницаемости

Далее рассмотрим уравнение, которое представляет собой выражение баланса потока на границе двух сред или поверхностей: $[n \cdot (-D_t \nabla w)]_{up} - [n \cdot (-D_t \nabla w)]_{down} = [hw]_{up} - [hw]_{down} - \frac{\tau c}{4} (w_{up} - w_{down})$. Далее рассмотрим его по частям. Индексы "up" (верхняя) и "down" (нижняя), обозначают значения соответствующих величин с одной и другой стороны границы. Разберем основные части уравнения:

- разность потоков $[n \cdot (-D_t \nabla w)]_{up} - [n \cdot (-D_t \nabla w)]_{down}$. Эта часть уравнения выражает разность потоков через границу между верхней и нижней областями;

- граничные условия $[hw]_{up} - [hw]_{down}$. Здесь h – коэффициент, который уже был определен ранее в работе, в формуле 10. Этот термин учитывает эффект граничных условий на значение переменной w на границе между областями;

- дискретизация и затухание $-\frac{\tau c}{4} (w_{up} - w_{down})$. Этот член описывает дополнительное затухание или дискретизацию, τ – коэффициент, связанный с потерями, и c – средняя скорость частиц.

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right), \quad (17)$$

где TL – коэффициент передачи потерь звука,
 τ – коэффициент передачи звука, что обозначает долю звуковой энергии, которая проходит через материал или конструкцию.

Формула 17 показывает потери на передачу в децибелах (дБ) и описывает, насколько эффективно конструкция уменьшает прохождение звука через неё, что удобно для измерения и сравнения, так как человеческое восприятие звука и других сигналов также логарифмическое.

Уравнение баланса потока на границе двух сред и формула 17 используются для описания диффузионных процессов и передачи волн через границы между двумя различными областями. Они включают в себя эффекты диффузии, граничных условий и дискретизации.

Здесь рассмотрены основные структуры и параметры, которые необходимы для решения основного уравнения акустической диффузии.

4.1.5 Визуализация полученных результатов исследования

На данном этапе визуализируются уровень звукового давления и потоки энергии. Для этого все параметры, модели и формулы преобразуются в набор данных, которые будут анализироваться решателями программного пакета «Comsol». Для этого необходимо произвести выборку необходимых данных.

4.1.6 Визуализация уровня звукового давления

Рассмотрим выборку данных, которая потребуется для визуализации уровня звукового давления. Для этого, сначала потребуется выборка «глухих» стен и объектов, которые не участвуют в расчете при прохождении звуковых волн через них. Выборка этих данных представлена на рисунке 28.

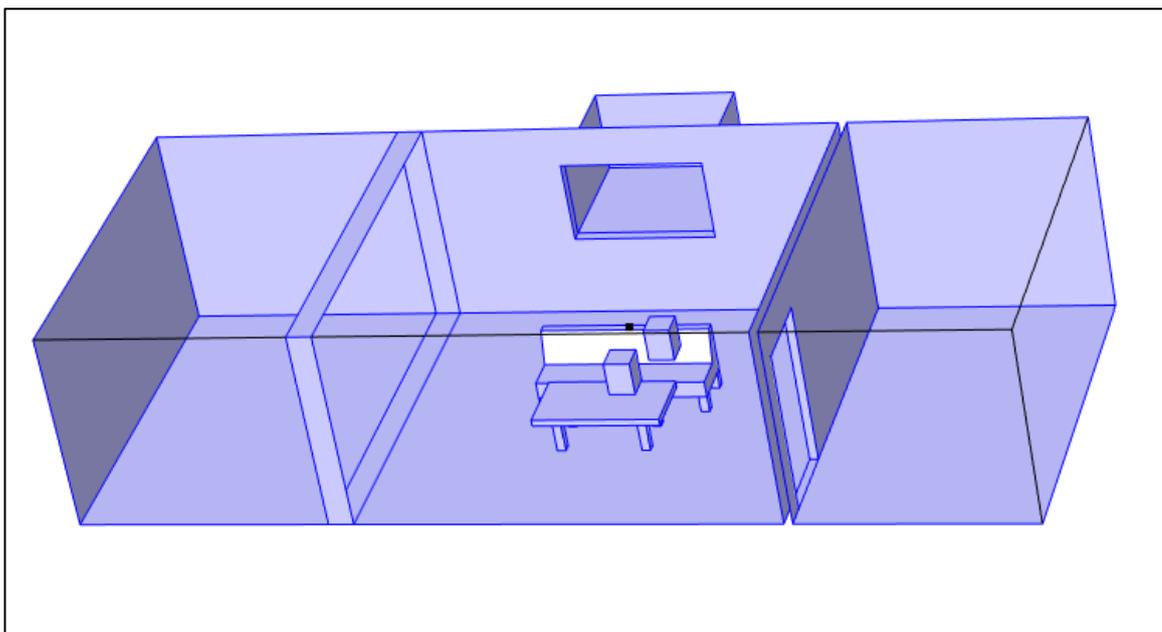


Рисунок 28 – Выборка «глухих» стен

Далее необходимо провести выборку проницаемых стен, тут подразумевается выбор стен, которые непосредственно присутствуют при расчете прохождения звуковых волн через них. Стены, попавшие в данную выборку представлены на рисунке 29.

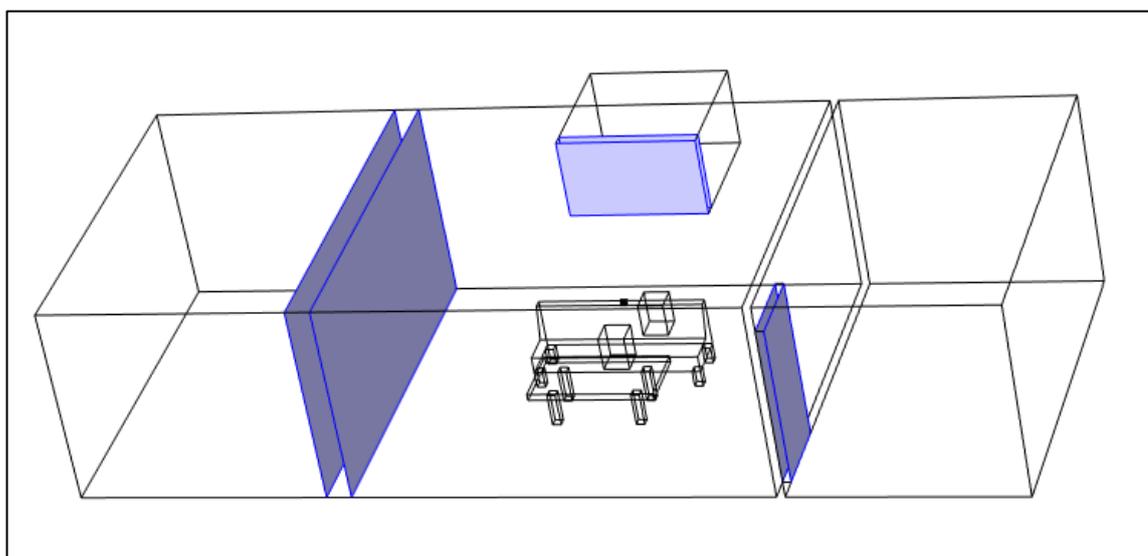


Рисунок 29 – Выборка проницаемых стен

Результат расчета уровня звукового давления и его визуализация представлены на рисунке 30. Как можно видеть на данном рисунке, исходя из обозначения по шкале дБ, наиболее уязвимое к утечке акустической информации

место – это приемная. Уровень дБ в данной комнате близок к 60 (именно такой порог считается минимальным при котором человеческая речь различима), что означает, что через дверь возможно подслушать разговор. Такой результат получен ввиду слабой звукоизоляции сосновой двери. В сравнении со звукоизоляцией стеклопакета и кирпичной стены.

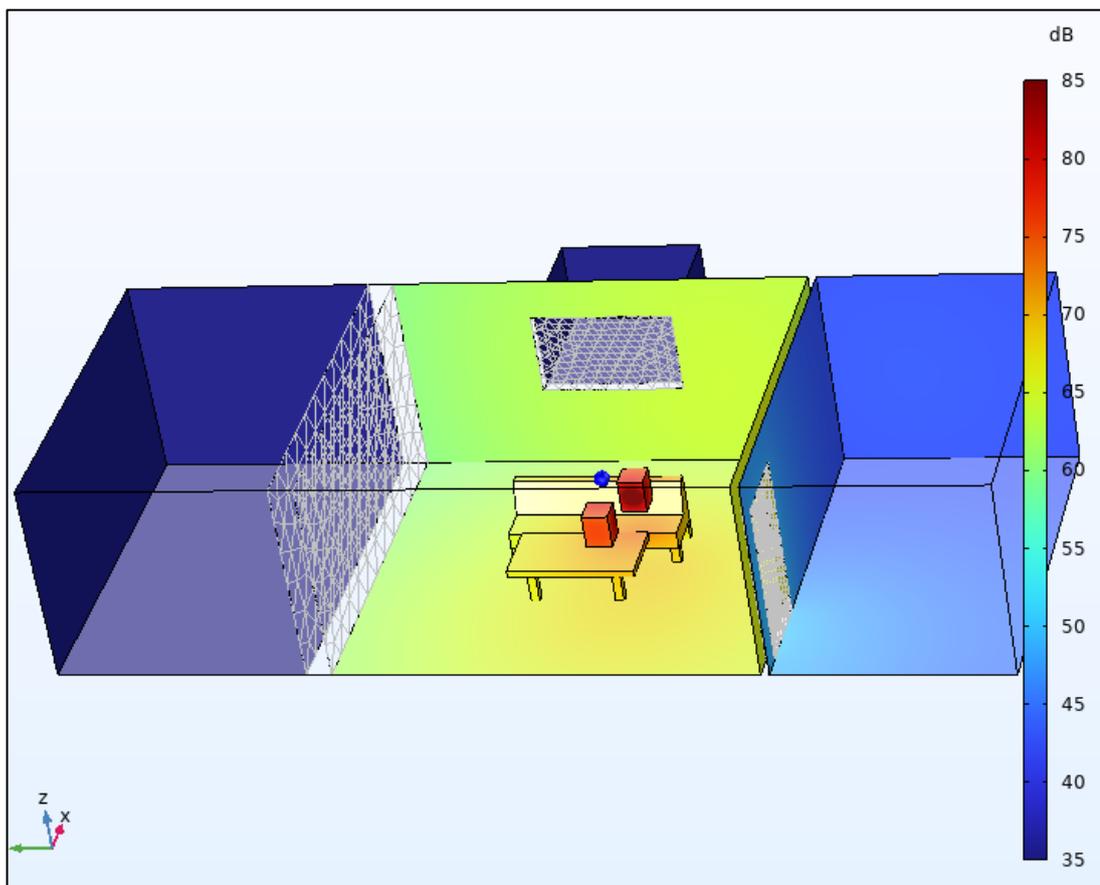


Рисунок 30 – Визуализация уровня звукового давления

4.1.7 Визуализация потоков энергии

Рассмотрим выборку данных, которая потребуется для визуализации потоков энергии. Для этого, сначала потребуется выборка «глухих» стен и объектов, которые не участвуют в расчете при прохождении звуковых волн через них. Выборка этих данных представлена в предыдущем пункте на рисунке 28.

Далее необходимо провести выборку проницаемых поверхностей. Это поверхности, с которыми будет взаимодействовать поток энергии. В отличие от предыдущего решения, здесь не нужно выбирать объекты взаимодействия, а только поверхности этих объектов, которые находятся внутри основного

исследуемого помещения. Выборка этих поверхностей представлена на рисунке 31.

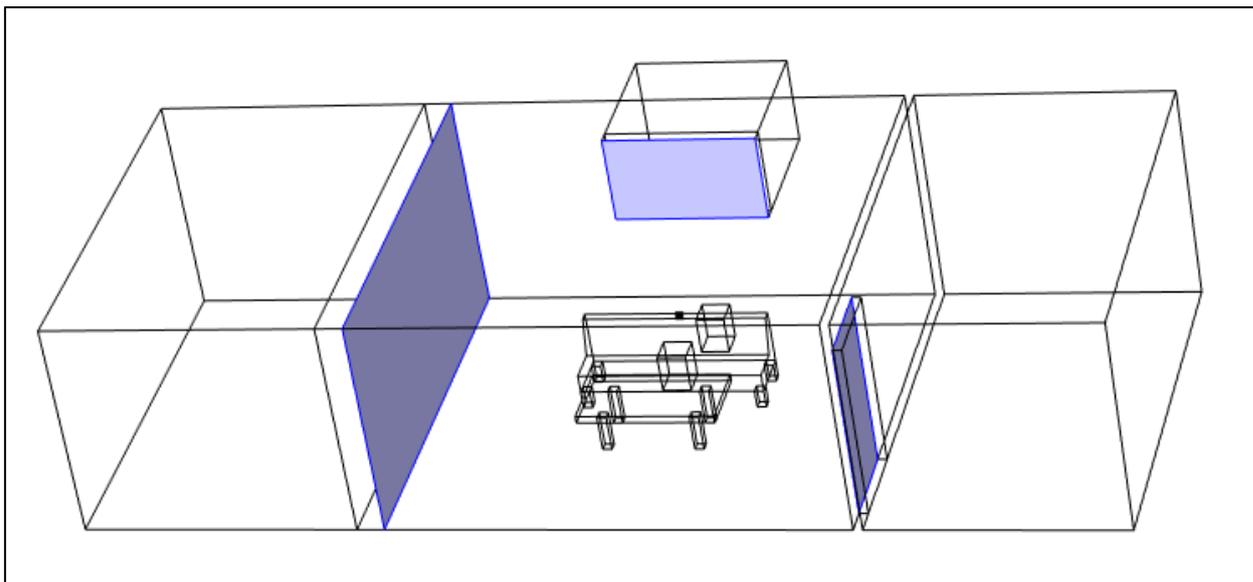


Рисунок 31 – Выборка поверхностей взаимодействия с потоком энергии

Следующим этапом будет выборка поверхностей распространения потока энергии. Здесь выбирается поверхность источника звука, от которого и будут строиться потоки энергии. Данная выборка представлена на рисунке 32.

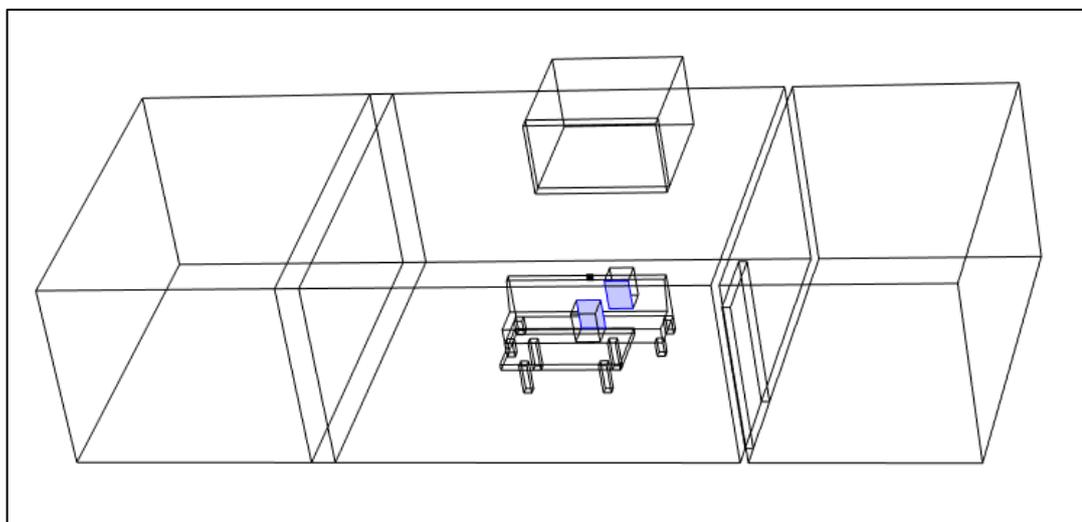


Рисунок 32 – Выборка поверхностей источника звука

Результат расчета потоков энергии и их визуализация представлены на рисунке 33. Вывод здесь такой же как и в предыдущем пункте, однако можно добавить, что при моделировании потоков энергии, можно заметить, что через

стеклопакет всё же проходит звук, который при должной технической обеспеченности можно подслушать.

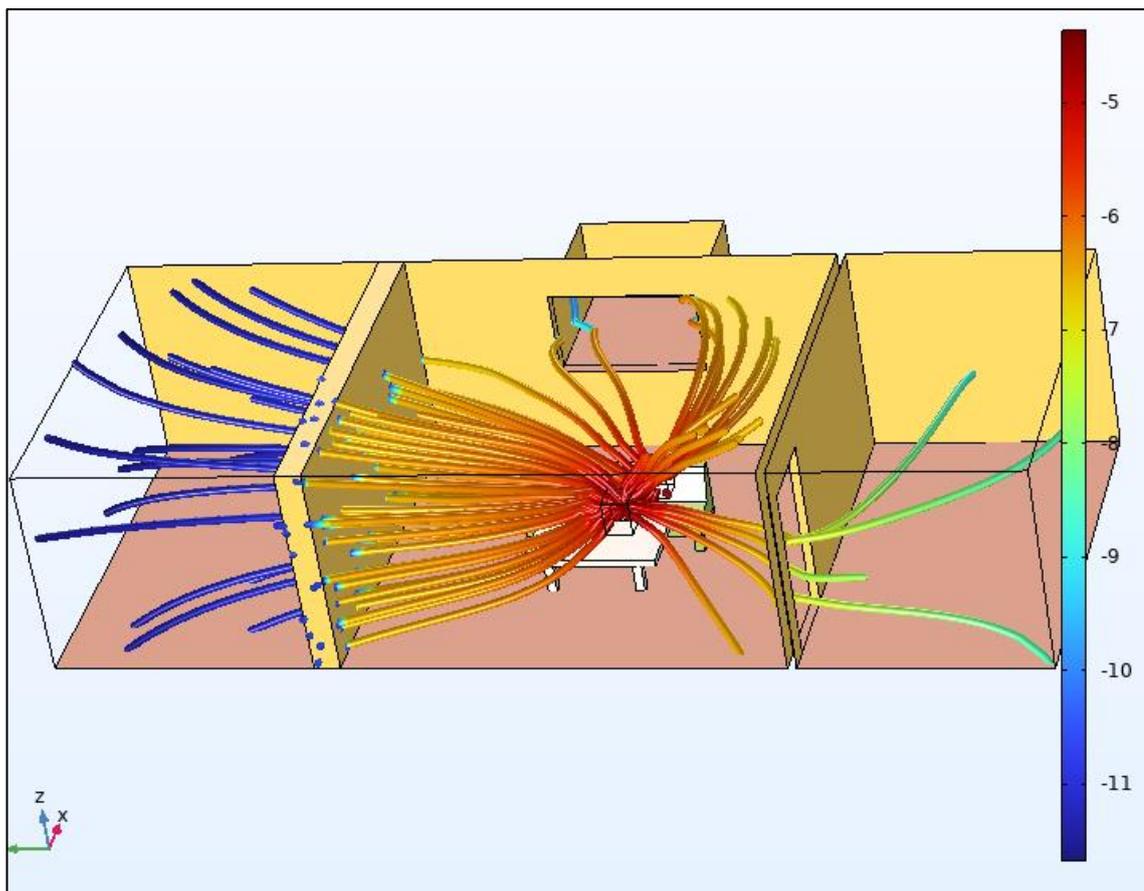


Рисунок 33 – Визуализация потоков энергии

4.2 Сравнение результатов реальных измерений и результатов моделирования

Исходя из данных, полученных при реальных тестах звукопроницаемости материалов. Есть информация, по используемым материалам в данном исследовании. При условии, что человек разговаривает спокойным голосом с одной стороны, а устройство для измерения уровня децибел стоит с другой стороны, можно сделать следующие выводы о поглощении звука различными материалами:

- кирпичная стена способна поглотить 47 дБ;
- дверь из сосны поглощает 12 дБ звука;
- стеклопакетное окно поглощает 35 дБ звука.

Указанные материалы имеют те же размеры, плотность и коэффициент поглощения, что и материалы, которые были использованы в данном исследовании. Чтобы выяснить достоверность данных, необходимо сверить количество прошедших через объекты дБ в реальных условиях и в модели данной работы. Исходя из данных уровня дБ в точках изображенных на рисунке 34, можно выяснить достоверность данных.

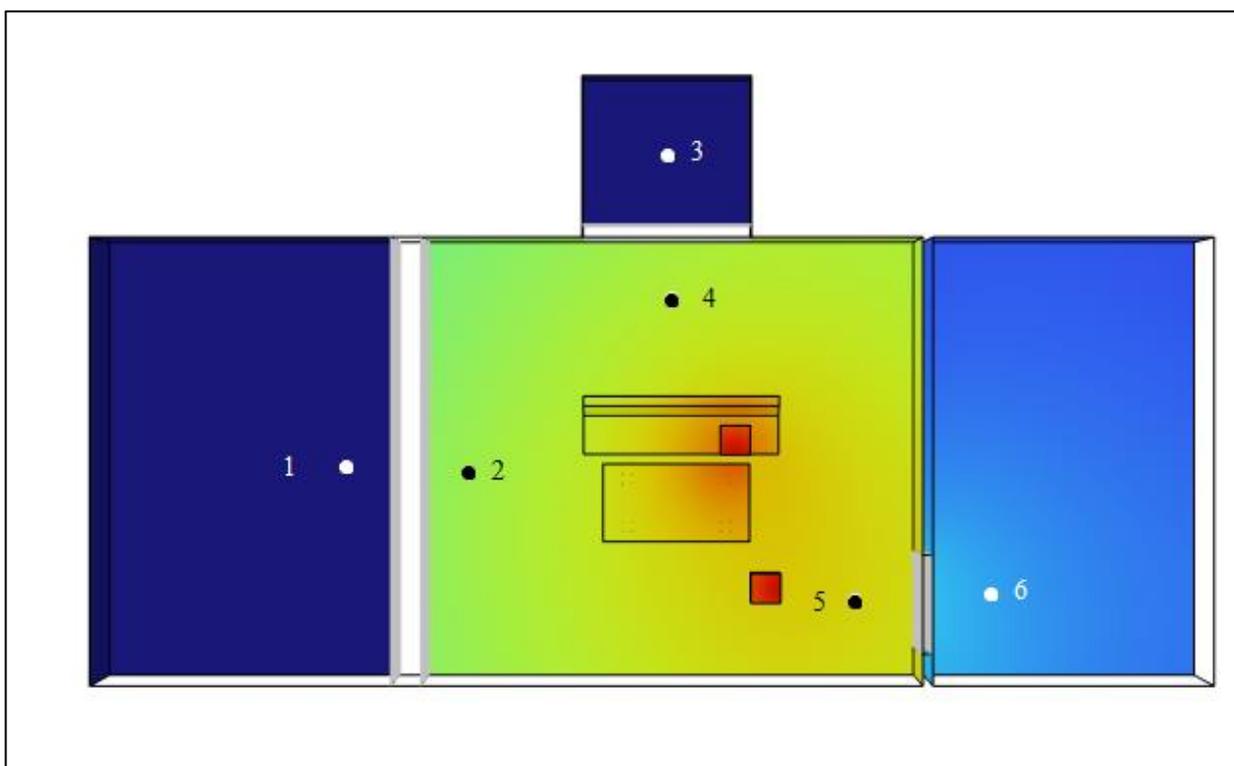


Рисунок 34 – Точки замера дБ

Для оценки точности и корректности разработанной модели звуковых волн, выполненной в программной среде COMSOL, были проведены измерения уровня звукового давления в нескольких контрольных точках. В данном разделе представлено сравнение данных, полученных в результате реальных измерений и результатов моделирования. Измерения проводились в шести контрольных точках, расположенных как внутри моделируемой комнаты, так и в соседних помещениях. Параметры звуковых источников соответствуют уровню звука спокойной речи человека.

Измерения уровня звукового давления (дБ) проводились в следующих точках, указанных на рисунке 34. В результате проверки звуковой

проницаемости ограждающих конструкций в реальной комнате, с которой и была сделана компьютерная модель данной работы, получены следующие результаты, представленные в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнение полученных значений реальной комнаты и компьютерной модели

Точка измерения	Реальные измерения (дБ)	Модель (дБ)	Отклонение (дБ)
Соседняя комната за стеной	18	20	2
Измеряемая комната перед стеной	64	63	1
С внешней стороны окна	30	32	2
Измеряемая комната перед окном	64	63	1
Соседняя комната за дверью	57	58	1
Измеряемая комната перед дверью	67	68	1

Полученные данные показывают, что модель, разработанная в COMSOL, демонстрирует высокую точность в прогнозировании уровня звукового давления в различных точках как внутри моделируемой комнаты, так и в соседних помещениях. Максимальное отклонение составило 2 дБ, что является допустимым значением для акустических измерений и свидетельствует о корректности модели.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- модель адекватно воспроизводит поведение звуковых волн и распределение звукового давления в заданных условиях;
- отклонения между реальными измерениями и моделью находятся в пределах допустимых значений, что подтверждает точность разработанной модели;
- использование модели в программной среде COMSOL позволяет эффективно прогнозировать акустические характеристики помещений, что может быть полезно для дальнейших исследований и практических применений в области акустической безопасности.

Результаты данного тестирования подтверждают, что разработанная модель является надежным инструментом для анализа звуковых волн в архитектурных конструкциях и может быть использована для прогнозирования и оптимизации акустических свойств помещений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из результатов тестирования, можно сделать вывод о достоверности результатов, полученных в результате работы анализатора 3D-модели помещения. Таким образом, данную компьютерную модель можно использовать при изучении защищенности помещения от кражи конфиденциальной информации, посредством акустических утечек.

Данное исследование может иметь практическую значимость в области информационной безопасности, так как звуковые волны могут использоваться в качестве внешнего источника информации для несанкционированного доступа к конфиденциальным данным.

Например, злоумышленники могут использовать методы акустического шпионажа, чтобы перехватывать звуковые сигналы, передаваемые через стены, потолки, полы и другие ограждающие конструкции, находящиеся в зоне доступности. Знание того, как звук распространяется через эти конструкции, может помочь в разработке мер защиты от такого типа атак.

Результаты исследования могут быть использованы для определения эффективности различных материалов и конструкций, которые могут снизить уровень шума и помех, проходящих через ограждающие конструкции. Это может быть особенно полезно для организаций, где конфиденциальная информация хранится в помещениях с высокой концентрацией людей, таких как банки, юридические фирмы и государственные учреждения.

Также результаты исследования могут быть использованы для разработки новых технологий и методов, направленных на защиту от акустического шпионажа. Например, на основе этих результатов могут быть созданы новые материалы, способные поглощать звуковые волны и тем самым снижать их уровень на определенной частоте. Это может привести к разработке новых типов конструкций, способных обеспечить более высокий уровень защиты от акустического шпионажа.

Таким образом, результаты исследования по моделированию прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции могут иметь практическую значимость в области информационной безопасности и способствовать разработке новых технологий и методов защиты от акустического шпионажа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Блохинцев, Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды / Д.И. Блохинцев. – М.: Изд-во "Наука", 1981. – 207 с.

2 Введение в COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf
– 12.02.2023.

3 Ворона, В.А. Способы и средства защиты информации от утечки по техническим каналам / В.А. Ворона, В.О. Костенко // Computational nanotechnology. – 2016. – Вып. 3 – 223 с.

4 Горелик, Г.С. Колебания и волны: введение в акустику, радиофизику и оптику / Г.С. Горелик. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1950. – 551 с.

5 ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2008. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. – Взамен ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2008; введ. 2009-10-01. – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 40 с.

6 Григорян, Д.Г. Моделирование прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции / Д.Г. Григорян, А.В. Бушманов. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2022. – № 47 (442). – С. 7-9

7 Григорян, Д.Г. Моделирование прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции / Д.Г. Григорян, А.В. Бушманов. – Текст: непосредственный // Молодёжь XXI века: шаг в будущее : материалы XXIII региональной научно-практической конференции (Благовещенск, 24 мая 2022 г.). [В 4 т.]. Т. 4. Технические науки. Физико-математические науки. Информационные технологии. Химические науки. – Благовещенск : Дальневосточный ГАУ, 2022. – С. 189-190

8 Гринченко, В.Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках / В.Т. Гринченко, И.В. Вовк. – Киев : Наук. думка, 1986. – 237 с.

- 9 Долженко, В.Н. Шум и вибрация: источники, контроль, защита / В.Н. Долженко, В.С. Фокин. – М.: РГОТУПС, 2003. – 50 с.
- 10 Каторин, Ю.Ф. Защита информации техническими средствами / Ю.Ф. Каторин – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 416 с.
- 11 Кочетов, А.А. Акустическая безопасность и электроакустические системы / А.А. Кочетов, В.Н. Спиридонов. – М.: Техносфера, 2012. – 240 с.
- 12 Кочкин, А. А. Физико-технические основы проектирования звукоизоляции легких ограждающих конструкций зданий из элементов с вибродемпфирующими слоями : монография / А. А. Кочкин, Н. А. Кочкин ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Вологодский государственный университет. – Вологда : ФГБОУ ВО "Вологодский гос. ун-т", 2022 (Вологда). – 163 с.
- 13 Красильников, В. А. Звуковые волны в воздухе, воде и твердых телах [Текст]. – 2-е изд., перераб. – М.: Гостехиздат, 1954. – 440 с.
- 14 Крылов, В.В. Основы теории излучения и рассеяния звука / В.В. Крылов. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 116 с.
- 15 Ларичкин, В.В. Техническая акустика и защита от шума / В.В. Ларичкин, К.П. Гусев. – Новосибирск : НГТУ, 2011. – 57 с.
- 16 Москаленко, В.В. Акустическая безопасность на предприятиях и в офисах / В.В. Москаленко. – М.: Издательство "Дело и сервис", 2008. – 160 с.
- 17 Овечкин, Г.В. Компьютерное моделирование: Учебник / Г.В. Овечкин. – М.: Academia, 2017. – 379 с.
- 18 Панцке, К.Ю. Защита от шума и вибрации в строительстве / К.Ю. Панцке, Э. Кекритц, П. Краузе. – Киев : Будивэльнык, 1988. – 86 с.
- 19 Скучик, Е. Основы акустики [Текст] : Пер. с англ. / Под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Л. М. Лямшева. – М.: Мир, 1976. – 22 с.
- 20 Торокин, А.А. Инженерно-техническая защита информации / А.А. Торокин – М.: Изд-во «Гелиос АРВ», 2005. – 892 с.
- 21 Федотов, А.Д. Компьютерная визуализация результатов моделирования в COMSOL Multiphysics / А.Д. Федотов. – СПб.: Питер, 2016. – 212 с.

22 Acoustics Module User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.aco/AcousticsModuleUsersGuide.pdf> – 16.02.2023.

23 Acoustic-Structure Interaction [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.models.aco.acoustic_structure/acoustic_structure.html – 20.01.2024.

24 Beranek, Leo L. Acoustics: sound fields and transducers / Leo L. Beranek. – Kidlington, Oxford ; Waltham, Ma. : Acad. press, 2012. – 704 с.

25 Beranek, Leo L. Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications / Leo L. Beranek. – Kidlington, Oxford ; Waltham, Ma. : Acad. press, 1992. – 523 с.

26 COMSOL Multiphysics Physics Builder Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doc.comsol.com/5.3/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_PhysicsBuilderManual.pdf – 15.02.2024.

27 The Acoustic-Shell Interaction, Transient Interface [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.aco/aco_ug_acousticstructure.06.30.html – 12.02.2024.