

ФГБОУ ВО «ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

на правах рукописи

ЖОГОЛЕВА ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ШУМА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СТРОИТЕЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ШУМОЗАЩИТЫ В
СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ
ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор, Леденев В.И.

Москва - 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ШУМА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШУМОЗАЩИТЫ В ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЯХ КАК В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ОБЪЕМОВ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Здания как системы акустически связанных воздушных объемов. Особенности формирования шумовых полей в таких системах.....	10
1.2 Основные факторы, влияющие на процессы распространения воздушного шума в системах акустически связанных объемов, и их учет при проектировании шумозащиты в зданиях.....	12
1.3 Современные методы расчета воздушного шума в помещениях и опыт их использования для определения энергетических характеристик в зданиях как в системах акустически связанных помещений.....	28
Выводы по главе 1 и определение направлений исследований.....	36
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ В ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЯХ С ЯЧЕЙКОВЫМИ И АНФИЛАДНЫМИ СИСТЕМАМИ ПЛАНИРОВКИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ АКУСТИКИ ПОМЕЩЕНИЙ.....	38
2.1 Статистический метод расчета шума в зданиях с ячейковой и анфиладной системами планировки.....	38
2.2 Экспериментальная проверка статистического расчетного метода.....	44
2.3 Исследования особенностей формирования шумовых полей в соразмерных акустически связанных помещениях и оценка необходимости их учета при расчетах шума на основе статистической теории акустики.....	49
2.4 Исследование шумового режима в квартирах как в системах акустически связанных помещений на основе статистического метода расчета шума.....	68
2.5 Оценка влияния звукопоглощения и звукоизоляции дверей на шумовой режим в анфиладных системах акустически связанных соразмерных помещений.....	76
Выводы по главе 2.....	80
ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОВЫХ ПОЛЕЙ В ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЯХ С КОРИДОРНЫМИ И ЯЧЕЙКОВО-	

КОРИДОРНЫМИ СИСТЕМАМИ ПЛАНИРОВКИ.....	82
3.1 Численный метод расчета шумового режима в зданиях с коридорными и ячейково-коридорными системами планировки.....	82
3.2 Экспериментальная проверка предложенного расчетного метода при ячейково-коридорной системе планировки квартиры.....	90
3.3 Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных с целью подтверждения точности предложенного расчетного метода для коридорной системы планировки.....	96
Выводы по главе 3.....	99
ГЛАВА 4. РАСЧЕТЫ ШУМА В СИСТЕМАХ ПОМЕЩЕНИЙ, АКУСТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ЧЕРЕЗ ПРОСТРАНСТВО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОЛКОВ И ЧЕРЕЗ ОБЩЕЕ ВОЗДУШНОЕ ПРОСТРАНСТВО.....	100
4.1 Расчет шума в системах помещений, связанных через пространство технологического подвешного потока.....	100
4.2 Расчет шума в системах помещений с перегородками неполной высоты, связанных через общее воздушное пространство.....	116
4.2.1 Выбор расчетной модели для оценки распространения шума в помещениях с перегородками неполной высоты.....	116
4.2.2 Расчетная модель шумового поля, образующегося в системе акустически связанных помещений с перегородками неполной высоты и численные методы ее реализации при зеркальной, диффузной и зеркально-диффузной моделях отражения звука от ограждений.....	119
4.3 Экспериментальные и расчетные исследования шума в системе акустически связанных помещений с перегородками неполной высоты.....	126
4.3.1 Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных в физической модели помещения с перегородками неполной высоты.....	127
4.3.2 Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных в крупногабаритной модели помещения с перегородками неполной высоты...	135
4.3.3 Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных в административном помещении с перегородками неполной высоты.....	145
Выводы по главе 4.....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	185

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Происходящие в гражданских зданиях функциональные и технологические процессы, как правило, сопровождаются шумовым загрязнением воздушной среды. Возникающая звуковая энергия, распространяясь в среде здания, создает неблагоприятный шумовой режим. В этой связи здания с позиций распространения в них звуковой энергии в общем случае следует рассматривать как системы акустически связанных помещений. Для снижения шума в них наиболее приемлемы строительно-акустические средства защиты, ограничивающие звуковую энергию на путях ее распространения в среде акустически связанных помещений. Для выбора этих средств и установления их требуемых характеристик необходимо иметь методы и методики расчета шума, учитывающие факторы, влияющие на процессы формирования шумового режима в среде зданий. В этой связи совершенствование методов расчета воздушного шума и разработка методик их реализации с целью использования для проектирования средств шумозащиты в гражданских зданиях как в системах акустически связанных помещений, является актуальной научной задачей, имеющей практическое значение.

Степень разработанности темы. В настоящее время на основе исследований шумовых полей помещений, выполненных Антоновым А.И., Гусевым В.П., Ковригиным С.Д., Крышовым С.И., Леденевым В.И., Осиповым Г.Л., Шубиным И.Л. и др. разработаны надежные методы расчета шума в отдельных замкнутых объемах помещений. Такие же работы выполняли Schroeder M.R., Kuttruff H., Jeske W., Gremer L., Hodgson M. и др. В тоже время имеется ограниченное количество целенаправленных исследований, связанных с разработкой методов и методик расчета шума в системах связанных помещений. В России к ним относятся работы Антонова А.И., Головки А.В., Леденева В.И., Маньковского В.С. За рубежом исследования распространения шума в связанных помещениях ранее занимались Sabine W.C., Eyring C.F., а позднее Jeske W., Kruzins E., Lyle C.D. и др.

Анализ предлагаемых расчетных моделей и методов их реализации показывает, что они не в полной мере учитывают сложный характер формирования воздушных шумовых полей как единого акустического процесса, зависящего от объемно-планировочных решений отдельных объемов и здания в целом, от звукопоглощающих и звукоизолирующих характеристик ограждений объемов, наличия общих воздушных связей между объемами и других факторов. В этой связи необходима разработка новых и совершенствование существующих методов и методик расчета, путем более полного учета в них этих особенностей.

Цель и задачи диссертационной работы.

Цель работы - разработка методов и методик расчета энергетических характеристик шума, позволяющих исследовать распространение звуковой энергии в системах акустически связанных помещений гражданских зданий и выполнять надежные расчеты уровней звукового давления при проектировании строительно-акустических средств снижения шума и оценке их акустической эффективности.

Задачи работы: произвести исследования формирования шумового режима в зданиях как системах акустически связанных объемов и оценить основные факторы, влияющие на распространение шума в них; выполнить анализ методов расчета энергетических параметров шума с точки зрения возможности использования их для оценки шумового режима в гражданских зданиях как системах акустически связанных объемов и определения акустической эффективности архитектурно-планировочных и строительно-акустических средств снижения шума; совершенствовать методы расчетов уровней звукового давления в гражданских зданиях со структурами из соразмерных помещений и на их основе выполнить оценку влияния параметров помещений и их акустических связей на выбор средств защиты в зданиях как в акустически связанных объемах; разработать методы и методики расчетов уровней звукового давления в зданиях со сложными системами планировок и с планировками, объединенными общим воздушным пространством; разработать компьютерные программы для реализации расчетных методов и методик; произвести экспериментальную проверку разработанных методов и методик расчета шума в системах акустически связанных помещений.

Научная новизна работы:

- на основе статистического метода расчета шума в системах акустически связанных соразмерных помещений с ячейковой и анфиладной планировками и интегрального уравнения Куттруфа получены новые данные о степени влияния акустических связей на распределение звуковой энергии в этих системах и выполнено совершенствование статистического метода расчета;

- разработан новый метод расчета шума в системах акустически связанных помещений с коридорными и ячейково-коридорными системами планировки, учитывающий при расчете энергетических характеристик шумового поля зеркально-диффузный характер отражения звука от ограждений в коридоре и особенности распространения в нем отраженной энергии как в длинном помещении;

- разработаны новая методика расчета шума для проектирования строительно-акустических средств шумозащиты в системах помещений, акустически связанных через пространство потолков технологического назначения и компьютерная программа для ее реализации. В методике учитываются условия поступления в пространство потолка звуковой энергии от транзитных воздуховодов и из шумных помещений и особенности распространения в нем звуковой энергии как в плоском помещении;

- предложена новая методика расчета шума в системах помещений, связанных общим воздушным пространством, основанная на реализации расчетной модели, описывающей шумовое поле в системе при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений. В методике система помещений рассматривается в виде трехмерной модели, позволяющей при разработке объемно-планировочных решений более полно учитывать влияние на шумовое поле общего воздушного пространства.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается:

- в применении для исследования шумовых полей в системах акустически связанных помещений подхода, позволяющего рассматривать на основе интегрального уравнения Куттруфа процесс формирования и распространения

звуковой энергии в системе как единый взаимосвязанный процесс для всех ее акустически связанных объемов;

- в совершенствовании существующего и разработке нового метода и методик расчета шума, позволяющих наиболее полно учитывать процессы формирования общего шумового поля в системе акустически связанных помещений, исходя из их формы, пропорций, акустических связей, характера отражения звука от ограждений, положения источников шума в системе и характера излучения ими звуковой энергии;

- в разработке методик расчета шума для проектирования строительно-акустических средств шумозащиты в сложных системах помещений, акустически связанных через пространство потолков технологического назначения и через общее воздушное пространство, позволяющих учесть особенности формирования и распространения в них звуковой энергии как в несоразмерных помещениях;

- в разработке компьютерных программ, позволяющих определять необходимые энергетические характеристики шумовых полей и выполнять разработку строительно-акустических средств защиты с учетом объемно-планировочных и конструктивных параметров помещения, их акустических характеристик, параметров источников шума и других факторов, влияющих на формирование шумовых полей в системах помещений.

Методология и методы исследования.

При разработке темы выполнены теоретические и экспериментальные исследования. Целью теоретических исследований являлась оценка процессов формирования общего шумового поля в системах акустически связанных воздушных объемов помещений и разработка методов и методик расчета энергетических характеристик шума помещений в зданиях с различными планировочными системами. Исследования выполнены с использованием геометрической и статистической теории акустики помещений. Расчеты произведены с использованием разработанных компьютерных программ. Экспериментальные исследования выполнены для подтверждения результатов, полученных на основе разработанных методов и методик.

Положения, выносимые на защиту: результаты исследований процессов формирования шумовых полей в системах связанных соразмерных помещений и

влияния на них акустических связей, выполненные на основе статистического метода расчета шума и уравнения Кутруффа; метод расчета шума в системах с ячейково-коридорной и коридорной системами планировки; методики расчета шума для проектирования строительно-акустических средств шумозащиты в сложных системах помещений с потолками технологического назначения и с общим воздушным пространством; компьютерные программы, реализующие разработанные методы и методики расчетов.

Степень достоверности результатов. При выполнении исследований и разработке расчетных методов использованы положения классических геометрической и статистической теорий акустики помещений. Допущения, использованные при разработке методов и методик, общеприняты в работах российских и зарубежных авторов. Достоверность разработанных методов и методик подтверждена сравнением расчетных и экспериментальных данных, полученных на реальных объектах, а также на модельных установках для сложных акустических систем. При проведении экспериментов использованы общепринятые методики, оборудование и приборы, соответствующие ГОСТ. Полученные при сравнительном анализе данные сопровождались подробным анализом результатов изменений энергетических характеристик шума при изменении акустических связей, звукопоглощения и звукоизоляции ограждений в помещениях.

Апробация работы. Результаты диссертации представлялись и обсуждались: на международных научных конференциях «Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г.Л.» (г.Москва, 2012, 2013, 2014, 2016 гг.); на международной научно-практической конференции «Наука, образование, общество: тенденции и перспективы» (Москва, 2013г.); на международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (Пенза, 2013г.); на международной научно-практической конференции «Экологическая безопасность и энергосбережение в строительстве» (Москва-Кавала, 2013г.); на международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы городского строительства» (Пенза, 2013г.); на международной научно-практической конференции «Проблемы экологической безопасности и энергосбережения в строительстве и ЖКХ» (Москва-Кавала,

2014г.); на международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт» (Тамбов, 2015 г.).

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения:

п.6 «Поиск рациональных форм, размеров зданий, помещений и их ограждений исходя из условий их размещения в застройке, деятельности людей и движения людских потоков, технологических процессов, протекающих в здании, санитарно-гигиенических условий, экологической безопасности»; п.7 «Развитие теоретических основ строительно-акустических методов и средств, поиск рациональных объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, направленных на повышение эффективности капиталовложений, энерго- и ресурсосбережение, создание комфортных условий для людей и оптимальных для технологических процессов».

Реализация результатов работы. Исследования выполнялись в НОЦ «ТГТУ-НИИСФ РААСН» в рамках выполнения НИР «Разработка методов оценки шумового режима в зданиях и на прилегающих к ним территориях для использования их при мониторинге шумового загрязнения среды и разработке мер по снижению шума в городской застройке» (код проекта 882) с финансированием из средств Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания. Разработанные расчетные программы переданы для использования в НИИСФ РААСН. Программы применяются в Научно-техническом центре по проблемам архитектуры и строительства ТГТУ, а также в учебном процессе ТГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, из которых 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, зарегистрировано 4 программы для ЭВМ в федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 130 наименований и 2 приложений. Общий объем работы 194 страницы. Основной текст, включая 60 рисунков, 28 таблиц, изложен на 167 страницах, объем приложения 27 страниц.

ГЛАВА 1. ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ШУМА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШУМОЗАЩИТЫ В ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЯХ КАК В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ОБЪЕМОВ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формирование шумового режима в любом отдельном объеме здания в наиболее общем виде следует рассматривать как единый взаимосвязанный процесс распространения воздушного шума во всех объемах объемно-пространственной структуры здания, имеющих между собой разного рода акустические связи. Объективный учет этих связей, условий и факторов формирования шумовых полей в пространстве зданий как в системах акустически связанных объемов является основой для разработки надежных методов расчета энергетических характеристик шумовых полей в зданиях различного функционального и технологического назначения и различной объемно-пространственной структуры. В этой связи в главе рассмотрены условия формирования шумового режима в зданиях как в системах акустически связанных объемов, определены основные факторы, влияющие на процесс распространения в них воздушной звуковой энергии. В главе также выполнен анализ имеющихся методов расчета воздушного шума в зданиях, при разработке которых в этой или иной мере учитывалась акустическая связь между отдельными помещениями, и практический опыт использования их для расчетов уровней звукового давления и проектирования в зданиях мероприятий по защите от воздушного шума.

По результатам главы определены основные направления исследования.

1.1 Здания как системы акустически связанных воздушных объемов. Особенности формирования шумовых полей в таких системах

В практике борьбы с воздушным шумом известно, что шум, возникающий в одном из воздушных объемов здания, распространяясь в его пространстве,

проникает в смежные объемы и создает в них тот или иной уровень зашумления. Количество звуковой энергии, проникающей в соседние объемы, зависит от вида акустической связи между объемами. По условиям распространения воздушного шума к акустическим связям между объемами относятся открытые проемы, общие воздушные пространства, звукоизолирующие преграды. При наличии между объемами любого вида из перечисленных связей эти объемы по условиям распространения в них воздушного шума можно считать акустически связанными.

Вид и количество таких связей между объемами существенно влияет на процессы формирования шумовых полей как в отдельных помещениях, так и в целом в системе. Это влияние во многом зависит от объемно-пространственной структуры здания. В зданиях, где отдельные объемы объединены общим воздушным пространством, например в офисных помещениях с перегородками неполной высоты, формирование общего шумового поля в основном зависит от условий распространения воздушной звуковой энергии в общем пространстве над перегородками. При объемно-планировочных структурах, когда отдельные объемы связаны между собой открытыми проемами больших размеров, формирование общего шумового поля из-за наличия прямых и обратных связей между объемами во многом определяется реверберационными процессами, протекающими в отдельных объемах, и перетеканием звуковой энергии между ними. При наличии между отдельными объемами только звукоизолирующих преград реверберационные процессы, происходящие в каждом из объемов, практически не влияют на перетекание звуковой энергии между ними и уровни звукового давления в менее шумных из них в основном определяются звукоизоляцией разделяющих объемы преград [2].

Кроме акустических связей на формирование общего шумового режима в системе акустически связанных объемов влияют условия формирования шумовых полей в отдельных объемах в зависимости от их объемно-планировочных параметров и акустических характеристик. Характер распределения звуковой энергии в отдельных замкнутых объемах при наличии в них разного вида источников шума определяет уровни звукового давления на их границах и, соответственно, величину звуковой энергии, проникающей в соседние объемы [10].

Как видно, процесс формирования шумового режима в системе акустически связанных объемов имеет целый ряд особенностей и является многофакторным процессом. Следовательно, при разработке методов расчета уровней звукового давления в зданиях необходимо учитывать эти особенности и факторы, влияющие на энергетические параметры шумовых полей в отдельных объемах и в целом в системах акустически связанных объемов.

1.2 Основные факторы, влияющие на процессы распространения воздушного шума в системах акустически связанных объемов, и их учет при проектировании шумозащиты в зданиях

Формирование шумового режима в системе акустически связанных воздушных объемов определяется двумя группами факторов. К первой группе относятся факторы, влияющие на распространение звуковой энергии в отдельно взятых объемах при наличии в них различных источников шума. Ко второй группе относятся факторы, определяющие акустическую связь между объемами и условия распространения воздушного шума в системе в целом.

Ниже последовательно рассмотрены эти факторы и показаны пути их учета в методах расчета энергетических параметров шумовых полей.

Энергетические характеристики шумовых полей в каждом отдельном объеме при наличии в нем источника шума определяется энергией прямого звука и энергией, возникающей при отражениях прямого звука от ограждений.

Первая составляющая напрямую зависит от характеристик источника шума. К ним относятся: частотная характеристика излучаемого звука; уровни звуковой мощности источника по частотам; пространственный характер излучения звука источником; фактор направленности; временная характеристика излучения звука [78].

Перечисленные характеристики при расчетах прямого звука принимаются по паспортным данным источников или устанавливаются на основании специально проводимых экспериментальных исследований. Как показывает выполненный

нами анализ, в настоящее время нет достаточного количества данных о характеристиках источников шума, определяющих шумовой режим в гражданских зданиях. Для их получения необходимо выполнение большого объема экспериментальных исследований по установлению перечисленных выше характеристик. Это является предметом отдельных исследований и не входит в задачи данной работы.

На величину энергетических характеристик излучаемого прямого звука оказывают также влияние геометрические параметры источников и их положение в объеме связанных помещений. В жилых помещениях источники шума, как правило, являются точечными или близкими по размерам к точечным. Это могут быть теле – и радиоаппаратура, бытовая техника, музыкальные инструменты и др. В других объемах здания, акустически связанных с объемами, в которых размещаются первичные источники шума, источниками прямого звука можно считать большие излучающие звук плоскости ограждений или большие открытые проемы, соединяющие эти объемы.

При оценке звука, излучаемого ограждениями, разделяющими объемы с разными уровнями шума, необходимо иметь сведения об уровнях звукового давления в шумном помещении вблизи ограждений; частотную характеристику звукоизоляции этого ограждения [43,69], а также учитывать при расчетах закономерности распространения прямого звука от плоских и линейных источников [12,16].

Через большие открытые проемы может передаваться прямая звуковая энергия от первичных источников, располагаемых в смежном объеме, а также отраженная энергия, сформированная в объеме с источником шума. Эта отраженная энергия будет являться прямой для вторичного объема и, соответственно, распространяться в его пространстве как от плоских или точечных источников. В ряде случаев эту энергию можно также определять, рассматривая процесс формирования отраженной энергии в смежных объемах как единый реверберационный процесс. Расчеты можно выполнять на основе метода прослеживания лучей [119,120] и методов статистической теории акустики [58,72].

Первичные источники шума существенно различаются между собой для разных по функциональным и технологическим процессам зданий и в этой связи по

разному могут влиять на формирование полей прямого звука и, соответственно, отраженных шумовых полей. Необходимые для расчетов прямого звука сведения об источниках шума в гражданских зданиях различного назначения рассмотрены ниже.

Формирование отраженного шума зависит от бóльшего количества факторов, влияющих как на абсолютные величины энергетических характеристик отраженной составляющей шумового поля, так и на процессы нарастания и затухания отраженной звуковой энергии [17].

Значительное влияние на величину и характер распределения отраженной звуковой энергии оказывает пространственное положение источников шума. В ближних к источнику зонах воздушного объема уровни звукового давления отраженного шума выше чем в дальних. От этого в значительной мере зависит наличие спадов отраженной энергии по мере удаления от источника шума.

Большое влияние на формирование и распространение отраженного шума в отдельных помещениях и в целом во всей системе оказывают звукопоглощающие характеристики поверхностей помещений и характер отражения звука от ограждений [35]. Распространение отраженного шума в системе зависит также от вида акустических связей между элементами системы, а именно, от звукоизолирующих свойств ограждений [1,33], размеров открытых проемов между элементами, от размеров и пропорций общего воздушного объема, объединяющего все полуоткрытые пространства, а также от размеров и пропорций последних.

Формирование шумового режима внутри помещений и в целом в системе акустически связанных помещений во многом зависит от объемно-планировочных параметров отдельных помещений, а также от пространственной структуры всей системы. Объемно-планировочные параметры влияют на характер отраженного поля. В соразмерных помещениях отраженное поле, как правило, диффузное, а в несоразмерных оно либо квазидиффузное или совсем недиффузное. Пространственная структура системы определяет вид акустических связей и тем самым определяет вид шумового поля в здании.

На степень диффузности поля также оказывает влияние наличие внутри помещений различных рассеивателей звука в виде убранства, оборудования и других предметов, находящихся в помещениях.

Большинство перечисленных факторов взаимосвязаны между собой и поэтому комплексно влияют на распространение шума в помещениях. Перечисленные факторы и их взаимосвязь показаны на рисунке 1.1

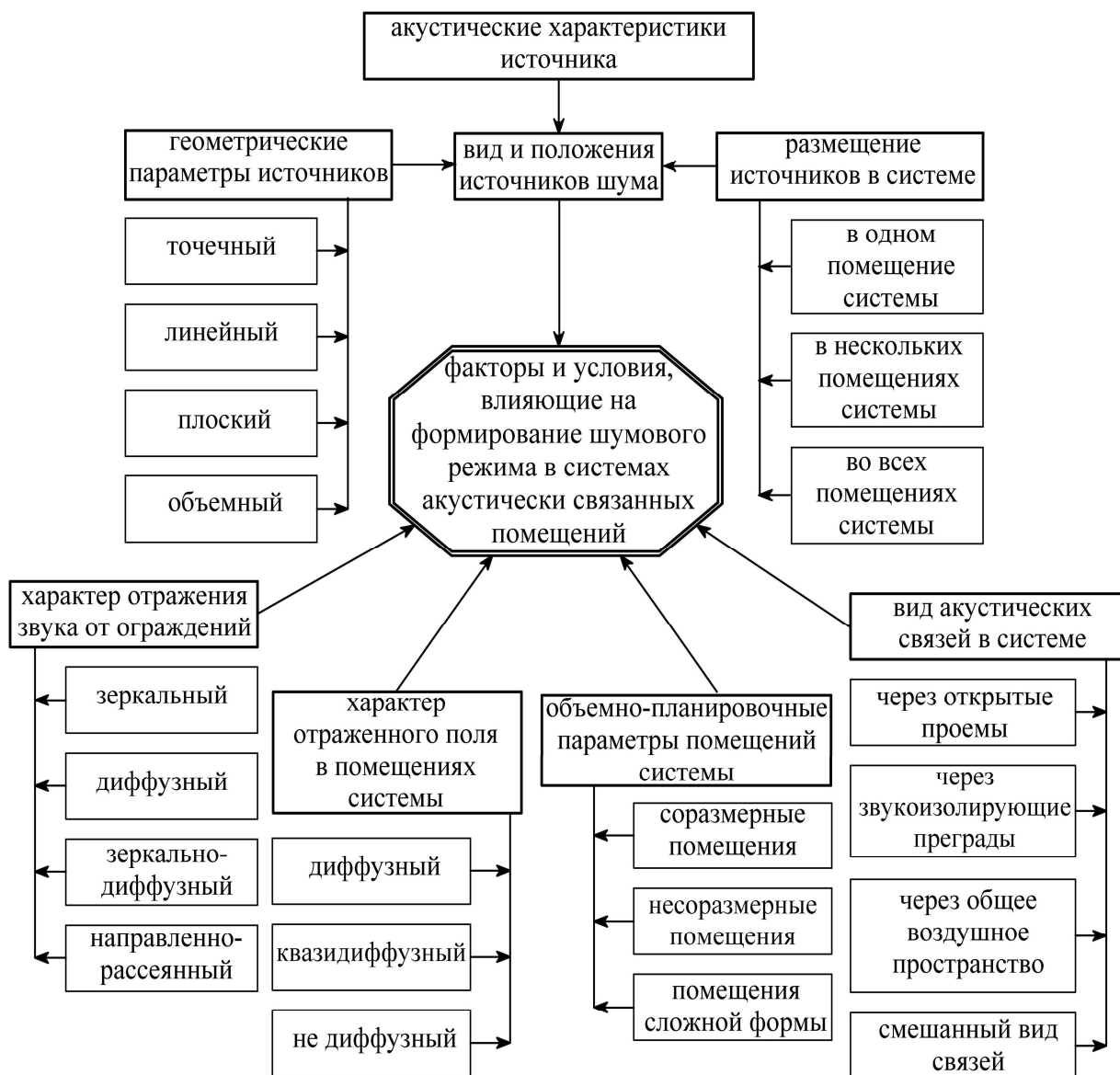


Рисунок 1.1 – Условия и факторы, влияющие на формирование шумовых полей в системах акустически связанных помещений гражданских зданий

Ниже рассмотрено влияние этих факторов на шумовой режим гражданских зданий различного назначения и необходимость их учета при расчетах энергетических характеристик шума в процессе проектирования средств защиты в зданиях как в системах акустически связанных помещений.

Формирование шумового режима в помещениях жилых зданий.

Шумовой режим в отдельных помещениях квартир жилых зданий формируется за счет прямого звука и отраженной составляющей звуковой энергии.

Прямой звук в основном определяет шумовой режим в помещениях с источником шума. Влияние на шумовой режим в этих помещениях оказывает также и отраженная составляющая шума. Шум в жилых зданиях возникает при действии многочисленных источников шума [6]. По условиям проникновения внутрь помещений они делятся на внешние и внутренние. К внешним относятся транспортные и внутриквартирные шума, бытовые шума соседних квартир, шумы технических и транспортно-коммуникационных помещений зданий, шумы встроенных предприятий культурного, социально-бытового и другого назначения. К внутренним шумовым воздействиям относятся шумы, вызванные трудовой деятельностью внутри квартиры, шумы от бытовой деятельности, шумы, возникающие при активном или пассивном отдыхе (занятия спортом, работа радио- и видеоаппаратуры), шумы санитарно-технического оборудования и бытовой техники.

Анализ мер снижения шума, используемых в жилых зданиях, показывает, что в настоящее время основное внимание уделяется проблемам защиты квартир от внешних источников шума. Для этого разработаны достаточно надежные, подтвержденные многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями методы ограничения проникновения шума в помещения квартир извне. При правильном их использовании на стадии проектирования и строительства они позволяют обеспечить выполнение нормативных требований. Как правило, эти методы в основном связаны с ограничением мощности внешних источников шума, снижением уровней шума на путях распространения их до ограждений квартир, с защитой от проникновения шума через внешние ограждения квартир.

Внутри квартир акустические условия проживания во многом определяются собственными многочисленными источниками шума. Особенности этих источников являются: свободное перемещение их в пределах квартиры; непостоянный во времени уровень звуковой мощности; возможность их возникновения в любое время суток. Эти особенности, а так же ряд других параметров источников шума затрудняют разработку эффективных мер по снижению внутриквартирных шумов. Необходимо иметь надежную методику по

анализу шумового режима в помещениях квартир с внутриквартирными источниками шума и разработке мер улучшения их акустического климата.

В помещениях без собственных источников шума шумовой режим определяют составляющие шума, приходящие из соседних объемов при наличии акустических связей с ними, и отраженный шум. В этом случае внимание следует уделить источникам шума, которыми являются ограждающие конструкции, излучающие в пространство квартиры шумы, возникающие в соседних объемах и во внешнем окружающем здание пространстве. Как правило, эти шумы проникают через большие плоскости стен и перекрытий и через оконные проемы. Поэтому их следует относить к плоским источникам, излучающим шум с больших по площади поверхностей.

Проблеме исследования процессов возникновения и распространения шума внутри квартир в настоящее время не уделяется должного внимания. В результате этого объемно-планировочные и конструктивные решения квартир проектируются без учета процессов формирования шумовых полей в квартирах и, как следствие этого, при эксплуатации в квартирах не обеспечиваются условия комфорта по шумовому режиму.

В целом пространство квартиры с точки зрения распространения звуковой энергии представляет собой воздушные объемы, связанные в единое целое акустическими связями через открытые проемы и через звукоизолирующие конструкции в виде дверей и перегородок. Процесс распространения звуковой энергии в такой системе акустически связанных помещений является многофакторным, требующим учета при расчетах уровней шума звукоизолирующих и звукопоглощающих характеристик ограждений и пространственных параметров всех элементов квартиры [2,9].

Ограничение распространения шума в квартирах возможно обеспечить применением архитектурно-планировочных и строительно-акустических средств снижения шума.

Современные квартиры представляют собой, как правило, незначительные по объему закрытые пространства, предназначенные для выполнения достаточно большого количества одновременно протекающих функциональных процессов. При выполнении большинства из них возникает шумовое загрязнение среды

квартиры. Оно оказывает негативное воздействие на протекание других функциональных процессов, требующих обеспечения более благоприятных акустических условий. Исключение подобных неблагоприятных воздействий может быть обеспечено на ранних стадиях проектирования квартир путем рационального зонирования их объемов, исходя из акустических условий отдельных функциональных зон. Выбор рациональных по акустическим условиям планировок является достаточно сложной задачей. Решение ее затрудняется ограниченностью объема квартиры, многофункциональностью и, следовательно, необходимостью обеспечения при разработке планировки других комфортных и социальных критериев жилища. Выбор планировки также существенно зависит от конструктивных схем и систем несущего остова здания [40].

Ограниченные возможности архитектурно-планировочных мер снижения шума требуют применения для уменьшения распространяющейся в объеме квартиры звуковой энергии строительно-акустических средств, путем соответствующего устройства звукопоглощающих и звукоизолирующих конструкций. Звукоизоляция внутри квартиры обеспечивается внутриквартирными перегородками, перекрытиями и стенами. Следует отметить, что звукоизолирующая способность стен и перегородок при наличии в них дверных проемов в значительной мере определяется звукоизоляцией дверей [2]. Звукопоглощение шума в квартире происходит в процессе поглощения звуковой энергии в помещениях при падении звуковых волн на ограждающие конструкции, убранство и оборудование, размещенное в этих помещениях. Оно зависит от принятых отделочных материалов ограждений, насыщения помещений мебелью и оборудованием и в каждом случае имеет конкретное значение. В процессе эксплуатации его можно регулировать, например, путем изменения звукопоглощающих свойств ограждений, мебели и др.

В условиях эксплуатации звуковая энергия, излучаемая источниками, распространяется по помещениям квартир, проникая в них через открытые проемы и звукоизолирующие преграды. В этой связи квартира по условиям распространения шума является типичной системой акустически связанных объемов, имеющей общее шумовое поле, сформированное в зависимости от объемно-планировочных параметров помещений, звукоизоляции и

звукопоглощающих характеристик ограждений, мебели, оборудования и убранства помещений, а также от места расположения и мощности источников шума. Изменяя в процессе проектирования объемно-планировочное решение квартиры, вид и положение связей между комнатами, а также звукоизоляцию и звукопоглощение ограждений, возможно изменять распределение звуковой энергии в системе в целом и тем самым достигать наиболее оптимальных условий для создания акустического комфорта в квартирах.

Решение этой многофакторной задачи возможно при наличии достаточно надежного метода оценки энергетических параметров общего шумового поля квартиры. Во многом выбор такого метода зависит от систем планировки квартир.

Современные жилые дома в основном возводятся многосекционными. При этом отдельные секции дома могут проектироваться с определенными объемно-планировочными решениями. Наиболее широкое распространение в практике строительства жилых зданий имеют секционные, коридорные и коридорно-секционные планировочные решения [18].

В секционной системе планировки (см. рисунок 1.2) каждая квартира 2 имеет непосредственную связь с лестницей 1. Лестница является значительным источником шума в секции. Поэтому защита помещений квартир от шума, возникающего в лестнично-лифтовом узле, является важной задачей. Решение ее достигается соответствующим планировочным решением квартир и устройством надлежащей звукоизоляции стен и входных дверей.

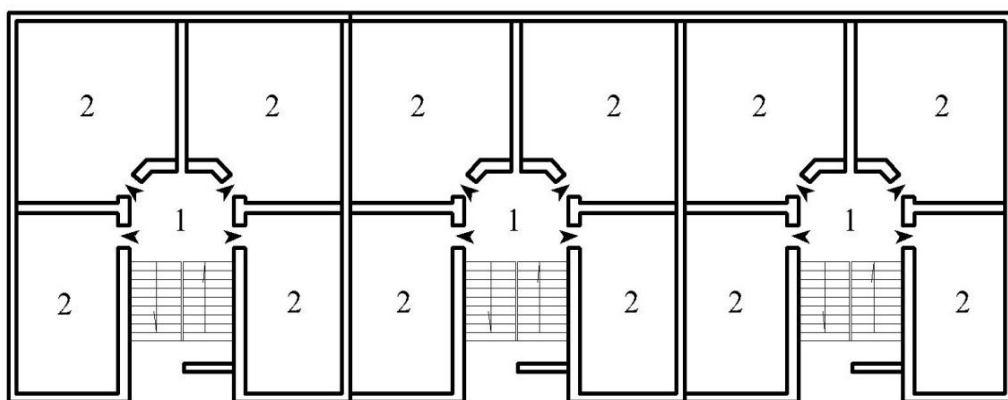


Рисунок 1.2 - Секционная система планировки жилых зданий

Коридорная система планировки секций предполагает наличие длинного коридора, в котором в процессе эксплуатации могут возникать различные источники шума. (см. рисунок 1.3). Шум от них свободно распространяется по

коридору 3 и проникает в отдельные квартиры 2, где в дальнейшем распределяется как в системе акустически связанных помещений. Для снижения шума, проникающего в квартиры, необходимо повышать звукоизоляцию стен и входных дверей квартиры, а также устраивать звукопоглощение на потолке коридора. Планировка квартир в этом случае должна учитывать защиту от шума, проникающего из коридора.

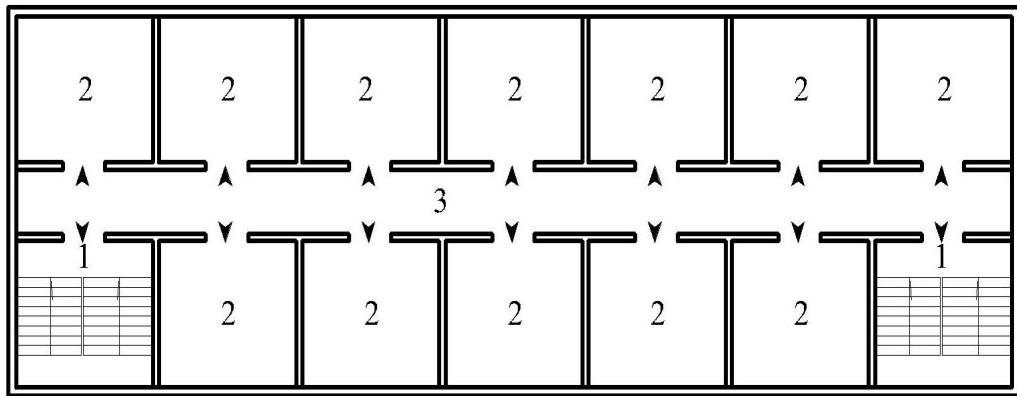


Рисунок 1.3 - Коридорная система планировки жилых зданий

Коридорно-секционная система планировки (см. рисунок 1.4) имеет в составе секции коридор 3, объединяющий все квартиры 2 секции. Такое решение применяется с целью уменьшения количества лестничных клеток. Лестнично-лифтовый узел 1, является мощным источником шума. Поэтому при такой планировке секций необходимо, как и в других случаях, производить устройство стен и входных дверей в квартиры с повышенной звукоизоляцией.

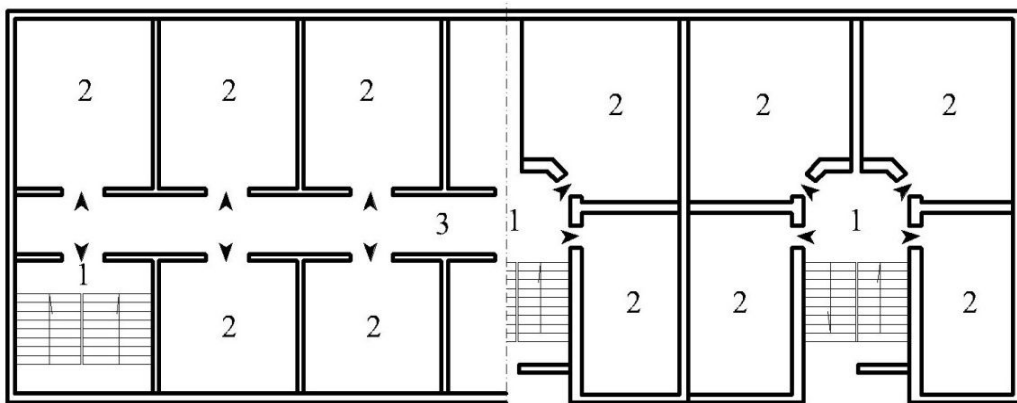


Рисунок 1.4 - Коридорно-секционная система планировки жилых зданий

Современные планировки отдельных квартир в основном определяются социальным статусом жилых зданий и зависят от количества комнат в квартире. В настоящее время существует три типа планировки квартир.

Первая, наиболее распространенная система, это ячейковая система планировки (см. рисунок 1.5). Ячейковые системы квартиры, как правило, малогабаритные проектируются с главным распределительным звеном, который одновременно является и входным узлом квартиры. С ним через двери связаны все отдельные помещения квартиры. Между собой помещения квартир разделяются звукоизолирующими перегородками. Помещения квартиры также могут быть связаны между собой дверями.

Особенностью ячейковой системы планировки с позиции распределения звуковой энергии в квартире является следующее. Шум, возникающий в любом помещении квартиры, проникает через двери в прихожую и затем распределяется по другим помещениям квартиры. В этом случае необходимо обеспечивать повышенную звукоизоляцию дверей. Эффективным также может быть устройство звукопоглощения в прихожей [2].

Так как помещения квартиры являются соразмерными по длине, ширине и высоте, в них формируются диффузные звуковые поля, и следовательно, расчетный метод можно разработать, основываясь на классической статистической теории акустики помещений [9,58,72].

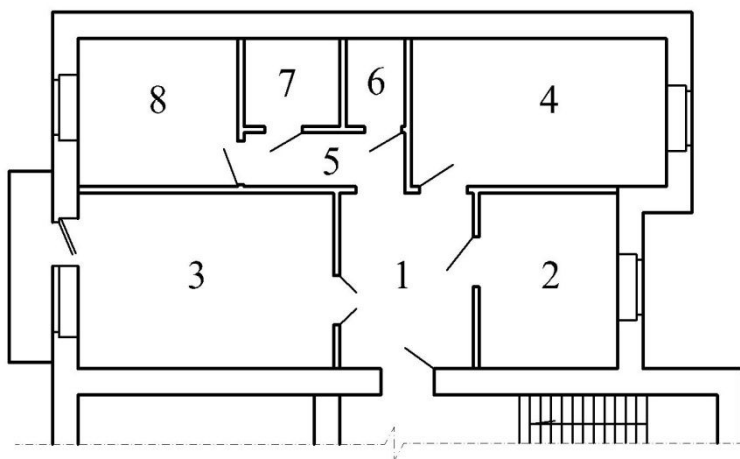


Рисунок 1.5 - Схема квартиры с ячейковой системой планировки

Второй, достаточно распространенной системой планировки квартир является ячейково-коридорная система. В ячейково-коридорной системе планировки все помещения связаны с коридором (см. рисунок 1.6). Через коридор происходит передача звуковой энергии по всем помещениям квартиры. Так как в этих случаях коридор является достаточно длинным помещением с небольшими поперечными размерами, в нем происходит существенное затухание звуковой

энергии. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке расчетного метода, учитывающего снижение шума при удалении от источника [10].

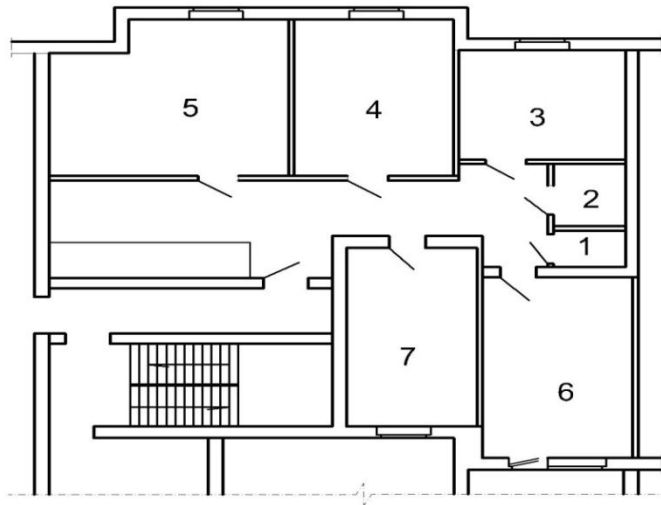


Рисунок 1.6 - Схема квартиры с ячейково - коридорной системой планировки

К третьей, достаточно распространенной в последнее время системе планировки относятся квартиры-студии, имеющие свободную планировку (см. рисунок 1.7). В них распределение звуковой энергии происходит как в одном помещении, разделенном перегородками неполной высоты. Из-за их наличия в пространстве квартиры создаются разные условия для распределения звуковой энергии в нижней и верхней зонах пространства. В этом случае требуется более сложная расчетная модель, учитывающая распределение звуковой энергии в объеме квартиры через общее воздушное пространство.

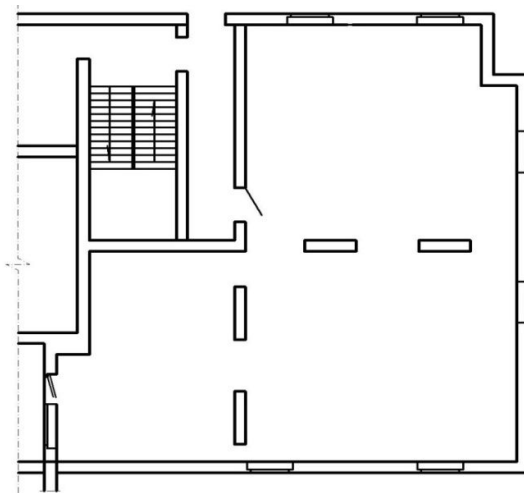


Рисунок 1.7 - Схема квартиры со свободной планировкой

Формирование шумового режима в помещениях общественных зданий.

Энергетические характеристики шумовых полей в помещениях общественных зданий определяются энергией прямого звука и энергией,

возникающей при отражениях прямого звука от ограждений, а также звуковой энергией, приходящей в них из соседних помещений через акустические связи.

На формирование шумового режима общественных зданий оказывают влияние характеристики внешних и внутренних источников шума.

К внутренним источникам шума относятся собственные шумы, возникающие при выполнении функционального процесса. Они, как и протекающие функциональные процессы, отличаются большим разнообразием. Внутренние источники шума в помещениях общественных зданий могут быть точечными, линейными, распределенными по площади помещения, объемными, смешанными и т.д. Выбор расчетной схемы источника зависит от его положения в пространстве, а также от взаимного расположения источника и приемника шума. Для разных ситуаций расположения один и тот же источник можно считать линейным или точечным, точечным или объемным и т.д. Внутренние источники оказывают негативное влияние на шумовой режим помещений, в которых они находятся. Это влияние зависит от параметров источника шума и акустической эффективности используемых в помещении мер снижения шума.

Внешними для помещений общественных зданий являются шумы, возникающие за пределами этих помещений. К ним относятся шумы, проникающие в здания извне, а также шумы соседних помещений, приходящие в помещения через акустические связи (открытые проемы, звукоизолирующие преграды и т.п.). Источниками такого шума для помещения могут быть вентиляционные отверстия (точечные источники), вентиляционные короба (линейные источники), плоскости проемов (точечные и плоские источники), плоскости стен (плоские источники). Распространение шума от таких источников имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при оценке энергетических параметров шумового режима. В частности, такие плоские источники как стены из-за своих больших размеров даже при незначительной интенсивности излучения звука с поверхностей могут создавать значительные уровни шума в помещении.

Имеющийся опыт показывает, что при проектировании общественных зданий по условиям обеспечения в них требований к шумовому режиму, здания следует рассматривать как системы воздушных объемов, связанные в единое целое

акустическими связями через открытые проемы, звукоизолирующие конструкции в виде дверей и перегородок [10] и через общие воздушные пространства, объединяющие эти объемы. Процесс распространения звуковой энергии в таких системах является многофакторным, требующим учета при расчетах уровней шума звукоизолирующих и звукопоглощающих характеристик ограждений и пространственных параметров всех элементов здания. В настоящее время такому подходу не уделяется должного внимания. В результате большинство объемно-планировочных и конструктивных решений в общественных зданиях проектируется без учета условий формирования шумовых полей и, как следствие, в последующем в них не обеспечиваются требуемые условия комфорта по шумовому режиму.

Ограничение распространения шума в общественных зданиях, как и в жилых, возможно обеспечить применением архитектурно-планировочных и строительно-акустических мер снижения шума.

Современные общественные здания представляют собой, как правило, разнообразные по объему планировки пространства, предназначенные для выполнения достаточно большого количества одновременно протекающих функциональных процессов [19]. При выполнении большинства из них возникает шумовое загрязнение среды помещений. Оно оказывает негативное воздействие на протекание других функциональных процессов, требующих обеспечения более благоприятных акустических условий. Исключение подобных неблагоприятных воздействий может быть обеспечено на ранних стадиях проектирования общественных зданий путем рационального зонирования внутренних объемов, исходя из акустических условий отдельных функциональных зон. Выбор рациональных по акустическим условиям планировок является сложной задачей. Решение ее затрудняется разнообразием объемно-планировочных решений, многофункциональностью и, следовательно, необходимостью обеспечения при разработке планировок других, кроме шумового загрязнения, комфортных условий. На изменение планировок также существенно влияют конструктивные схемы и системы несущего остова здания [40].

Ограниченные возможности архитектурно-планировочных мер снижения шума требуют применения для этих целей строительно-акустических средств в виде экранирующих, звукоизолирующих и звукопоглощающих конструкций.

Звукоизоляция в общественных зданиях обеспечивается внутренними перегородками, стенами и перекрытиями. В перегородках и стенах всегда имеется большое количество дверей и в этом случае их звукоизолирующая способность, как и в жилых зданиях, в основном определяется звукоизоляцией дверных заполнений [2]. На шумовой режим в помещениях общественных зданий существенное влияние оказывают звукопоглощающие свойства ограждающих конструкций, убранства и оборудования, размещенного в этих помещениях. При проектировании звукопоглощение в помещениях можно регулировать путем соответствующего выбора отдельных материалов ограждений, устройства и мебели. Таким образом, рассматривая общественное здание как систему акустически связанных объемов, имеющих общее шумовое поле, сформированное в зависимости от объемно-планировочных параметров отдельных помещений, звукоизоляции ограждений, звукопоглощающих характеристик ограждений, мебели, оборудования и убранства помещений, а также от расположения и мощности источников шума, можно достаточно эффективно обеспечивать при проектировании требования защиты от шума. Изменяя в процессе проектирования объемно-планировочное решение, вид и положение связей между отдельными помещениями, а также звукоизоляцию и звукопоглощение ограждений, возможно изменять распределение звуковой энергии в системе в целом и тем самым достигать оптимальных условий для создания акустического комфорта в зданиях.

Решение этой многофакторной задачи возможно при наличии достаточно надежного метода оценки энергетических параметров общего шумового поля в системах акустически связанных между собой помещений. Во многом выбор такого метода зависит от систем планировки зданий.

Современные общественные здания имеют значительное разнообразие в планировочных решениях. Среди них широкое распространение имеют анфиладные планировки, планировки коридорного типа, планировки открытого типа (с выгородками), ячейковые планировки, а также смешанные планировки, например, коридорно-ячейковые [19].

Наименьшее распространение в общественных зданиях имеют ячейковые системы планировки. Они, как правило, входят в состав смешанной коридорно-ячейковой системы. К ним относятся, например, офисные здания. При этом отдельные офисы в пределах такой системы проектируются по ячейковой схеме. Ячейки имеют свои внутренние источники шума. Шум в них также может проникать из коридоров. Ячейки в офисах состоят из мало- и среднегабаритных помещений. Проектируются они с главным распределительным звеном, который одновременно является и входным узлом ячейки. С ним через двери связаны все отдельные помещения ячейки. Между собой помещения разделяются звукоизолирующими перегородками. В ряде случаев помещения ячейки также могут быть связаны между собой дверями.

Особенностью ячейковой системы планировки в общественных зданиях, как и в жилых зданиях, с позиции распределения в ней звуковой энергии является следующее. Шум, возникающий в любом помещении ячейки, проникает через двери во входной узел и затем оттуда распределяется по другим помещениям. В этом случае необходимо обеспечивать повышенную звукоизоляцию дверей.

Наибольшая эффективность звукопоглощающего материала наблюдается в том случае, если он располагается в зоне максимальной концентрации отраженного звука, то есть вблизи источника шума. При отсутствии фиксированных мест источников шума эффективным может быть устройство звукопоглощения во входном узле.

Так как помещения ячеек являются в основном соразмерными по длине, ширине и высоте, в них формируются диффузные звуковые поля, и следовательно, расчетный метод можно разработать, основываясь на классической статистической теории акустики помещений [58,72].

Ячейково-коридорная система планировки офисов предполагает наличие длинного коридора, в котором в процессе эксплуатации могут возникать различные источники шума. Шум от них свободно распространяется по коридору и проникает в отдельные офисы, где в дальнейшем распределяется в ячейках как в системах акустически связанных помещений. Для снижения шума, проникающего в отдельные ячейки, необходимо повышать звукоизоляцию стен и входных дверей ячеек, а также устраивать звукопоглощение на потолке коридора. Планировка

ячеек в этом случае должна учитывать защиту от шума, проникающего из коридора.

Коридорные системы планировки предполагают, как правило, расположение с одно или с двух сторон от коридора помещений, связанных с коридором через двери. К ним, например, относятся административные здания и здания учебных заведений. Коридорные системы могут быть тупиковые, замкнутые, Т- и П-образные и т.д.

С позиций распространения шума в подобных системах планировок коридор является достаточно длинным помещением с относительно небольшими поперечными размерами. В коридоре происходит существенное пространственное затухание звуковой энергии. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке расчетного метода [10].

В общественных зданиях некоторое распространение имеют также анфиладные системы планировки. Они представляют собой последовательно связанные, как правило, открытыми проемами помещения. В этом случае акустическая связь в них осуществляется через открытые проемы. Связь также может происходить и через звукоизолирующие ограждения в виде дверей, разделяющих помещения анфилад. Такие схемы планировки имеют музеи, выставочные залы, железнодорожные вокзалы и т.д. В состав анфиладных систем планировки могут входить как соразмерные, так и несоразмерные помещения. В случае несоразмерных помещений необходимо учитывать квазидиффузный характер формирования звуковых полей в них и выбирать соответствующие методы расчета распределения в них отраженной звуковой энергии. В анфиладных системах большое влияние на формирование шумового режима оказывает перетекание отраженной звуковой энергии между объемами. Особенно это проявляется в системах с открытыми проемами, например, в выставочных залах и железнодорожных вокзалах. Процесс этого перетекания необходимо учитывать при разработке расчетных методов [7,8].

В последнее время начинают находить распространение общественные здания со свободной системой планировки. Распределение звуковой энергии в них происходит как в одном объеме, разделенном перегородками неполной высоты. Из-за наличия перегородок в общем пространстве создаются разные условия для

распределения звуковой энергии в нижней и верхней зонах пространства. В этом случае требуются более сложные расчетные модели, учитывающие распределение звуковой энергии в целом в объеме всего замкнутого пространства, например, модели, основанные на статистическом энергетическом подходе [27,31,52,75] и комбинированные геометрические статистические модели, разработанные для производственных зданий [5,28,82].

1.3 Современные методы расчета воздушного шума в помещениях и опыт их использования для определения энергетических характеристик в зданиях как в системах акустически связанных помещений

Современные методы расчета энергетических характеристик шума в помещениях основаны на положениях волновой, геометрической или статистической теорий акустики [23,62,71,79,103]. В силу особенностей этих теорий разработанные методы расчета имеют определенные ограничения, связанные с неучетом тех или иных факторов, влияющих на формирование шумовых полей.

Согласно волновой теории воздушный объем помещений рассматривается в виде колебательной системы с распределенными параметрами. При действии в помещении воздушного источника шума в объеме возбуждаются собственные колебания на частотах, близких к частотному спектру источника. Возбужденные источником колебания воздушного объема и возникающие при этом их формы определяются геометрическими параметрами помещения и граничными условиями.

При расчетах на основе волновой теории энергетических характеристик звуковых полей возникают существенные затруднения, приводящие в последующем к погрешностям. В первую очередь они связаны с невозможностью точного задания параметров, характеризующих рассматриваемый объем помещения как колебательную систему. Погрешности расчетов происходят из-за идеализации расчетных моделей по геометрическим формам, акустическим

характеристикам ограждений, характеру отражения звука. Значительные проблемы возникают также при необходимости учета влияния предметов и оборудования, находящихся в объеме, на распределение в нем звуковой энергии. Возникающие в погрешности возрастают еще более при рассмотрении связанных помещений как единой колебательной системы. На точность расчетов оказывает также частотный состав шума. С ростом возбуждающих частот количество возбужденных мод возрастает многократно. Это приводит к значительному увеличению времени вычислений и росту погрешностей. Поэтому в основном методы волновой теории используются при расчетах в пустых помещениях правильной геометрической формы, достаточно ограниченных размеров в диапазонах низких частот [65]. В этом случае при решении практических задач используются методы, основанные на модальном подходе [124] и методы конечного элемента [92].

Перечисленные особенности расчетов с использованием методов волновой теории и возникающие при этом погрешности потребовали разработки новых методов, основанных на некоторых упрощениях представлений о распространение звуковой энергии. К ним относятся методы, основанные на геометрической и статистической теориях акустики.

Достаточно широкое распространение в практике расчетов энергетических характеристик шумовых полей получили методы, основанные на принципах геометрической теории акустики помещений. В середине 20-го века были разработаны геометрические методы расчета с использованием зеркальной модели отражения звука от поверхности ограждений, широко используемой в светотехнике [66]. В основе методов лежат принцип построения лучевых картин звукового поля, когда для звуковых лучей выполняется закон геометрической оптики, и принцип суперпозиции, при котором звуковая энергия в любой точке объема представляется как результат арифметического суммирования энергий, пришедших в точки от источника звуковой энергии, а также принесенных всеми лучами, отраженными от ограждений.

К методам, основанным на таком представлении об отражении звука, относится метод построения картин отражения [80,130], метод построения площадок одинакового числа отражений [37], метод мнимых источников [64].

Два первых метода в основном были использованы в архитектурной акустике и не нашли распространения в практике оценки шумового режима помещений. Метод мнимых источников, кроме решения задач архитектурной акустики, используется также при оценке шумового режима в помещениях и разработке строительно-акустических средств снижения шума в них [32,39,42,81]. Анализ принципов, положенных в основу метода мнимых источников, показывает что его применение ограничивается пустыми помещениями правильной геометрической формы. Для расчетов шума в системах связанных помещений метод мало пригоден. Попытка использования такого подхода для расчета шумового режима в связанных помещениях была предпринята в докторской работе Лиля С.Д. [107]. Следует также отметить, что метод мнимых источников может использоваться только при зеркальной модели отражения звука от ограждений, что во многих случаях не соответствует реальному характеру отражения. Наличие смешанного отражения, когда кроме зеркального отражения присутствует и рассеянная составляющая, потребовало от Лиля С.Д. модифицировать предложенный в работе [107] метод путем учета в нем диффузно отраженной энергии [106].

К методам геометрической теории акустики относится также широко зарекомендовавший себя в последнее время метод прослеживания лучей. Идея лучевого метода заключается в прослеживании траекторий и энергий заданного набора лучей, исходящих из источника звуковой энергии. Метод, появившийся во второй половине 20-го века [119,120], использовался для моделирования акустических процессов в помещениях. В связи с развитием вычислительной техники и созданием различных модификаций метода в последнее время он начал находить широкое применение в практике оценки шумового режима помещений в виде самостоятельного метода, а также в составе комбинированных расчетных моделей [15,56,57,76,87,89,104,122]. Широкое применение метод имеет в исследовательской практике, и в частности, при исследованиях статистических характеристик звуковых полей [4,63,121,128]. В последнее время метод нашел также применение при исследованиях формирования шумового режима и процессов распространения шума при работе в помещениях источников с непостоянной во времени звуковой мощностью [20].

Как показывает практика, метод прослеживания лучей может использоваться для решения поставленных в работе задач. Его преимуществами является возможность расчетов в помещениях сложной формы, а также при наличии в них разного вида технологического оборудования [56,57]. Метод позволяет оценивать излучение звуковой энергии источниками сложной формы [76], а также оборудованием, размещаемым в кожухах и кабинах [15]. К определенному преимуществу метода относится возможность его использования как при зеркальной, так и диффузной моделях отражения звука от ограждений [88,95]. При той или другой моделях отражения метод может быть применен для исследований распространения шума в системах акустически связанных помещений. Об этом в частности свидетельствуют зарубежная практика использования метода [87,89,122].

Существенным ограничением применения метода является невозможность его прямого использования при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений, когда одна часть энергии отражается зеркально, а другая рассеивается диффузно. Попытки модификации метода применительно к такому характеру отражения не дают удовлетворительного результата. К ним, в частности, относятся работы [94,117], в которых на основе принципа учета частичного рассеяния отраженной звуковой энергии, используемого в методе Монте-Карло [105], часть ранних отражений лучей прослеживается при зеркальной модели отражения, а более поздние отражения рассматриваются при диффузном отражении. Такой подход противоречит реальному разделению отраженной энергии на зеркальную и диффузную составляющие. Поэтому в случае сложного характера отражения звука от ограждений метод может использоваться в составе комбинированных расчетных моделей.

Наиболее широкое распространение при оценке энергетических характеристик звуковых полей получили методы статистической теории акустики помещений. Методы, основанные на результатах экспериментальных исследований конца 19-го века и хорошо развитые теоретически в первой половине 20-го века [55, 62,90,116,129], используются в настоящее время при расчетах шумовых полей в помещениях, в которых создается диффузное отраженное звуковое поле. Такому полю присущи признаки однородности и изотропности. В этом случае звуковая

энергия в каждой точке помещения является результатом арифметического суммирования средних энергий отражений, проходящих через нее, и плотность звуковой энергии в конкретный момент времени одинакова по всему объему, а приход в любую точку объема отраженной энергии со всех направлений равновероятен.

С момента своего появления и до настоящего времени методы статистической теории используются при оценке шума в связанных помещениях для случаев постоянного и непостоянного в них шумовых режимов. Допустимость использования статистической теории при непостоянном режиме показана Ф. Морзом в работе [62].

Впервые выражения для оценки затухания в двух связанных помещениях даны в работе Сэбина и Эйринга [90,116]. Затем подобные выражения также для двух помещений были получены Маньковским В.С. [58], Кремером Л. [93] и позднее Лилем С.Д. [108]. Все указанные работы относятся к системам из двух связанных большими проемами помещений.

В тоже время Еске В. сделал попытку использовать статистическую теорию для расчета шумового режима в системе помещений, состоящей из большого количества объемов, разделенных перегородками неполной высоты, и, следовательно, имеющих общий воздушный объем над перегородками. В работе [96] им получены выражения для определения спадов уровней звукового давления в таких системах бесконечной и конечной длины. Подобные исследования на основе статистической теории были выполнены Головки А.В., Крышовым С.И., Ковригиным С.Д. [25]. Выполненные Головки А.В. экспериментальные исследования подтвердили удовлетворительную точность предложенных выражений [24].

Следует отметить, что рассмотренные методы расчета, основанные на представлениях о диффузном звуковом поле используются в основном для простейших систем помещений, как правило, состоящих из двух объемов, и для одного вида связи - через открытый проем.

Более широкие возможности применения статистической теории получены в работе Головки А.В. [26]. Методы, предложенные в работе, позволяют выполнять

расчеты в системах из большого количества связанных помещений, в том числе, и в анфиладных системах помещений [7,8].

Применение диффузной теории и, соответственно, разработанных на ее основе методов ограничивается соразмерными помещениями, в которых обеспечиваются условия однородности и изотропности отраженного звукового поля. Как показано в работе [36] Заборовым В.И. и Кочергиным И.А. условия, соответствующие диффузному полю, обеспечиваются только для некоторых групп по степени соразмерности помещений и при определенном звукопоглощении их ограждений. Поэтому на практике рекомендуется использовать методы диффузного поля в соразмерных помещениях, у которых соотношения наименьшего и наибольшего размеров 1 к 5 и менее [21,22].

Выполненный в разделе 1.2 анализ объемно-планировочных решений показал, что в системах акустически связанных помещений гражданских зданий присутствуют несоразмерные помещения (длинные и плоские), в которых применение для расчетов уровней звукового давления статистических методов диффузного поля дает большие погрешности. В этом случае необходимо использовать методы, учитывающие наличие в несоразмерных помещениях спадов отраженной энергии. Выполненные Ледневым В.И. [54], Крышовым С.И. [45], Антоновым А.И. [11] экспериментальные исследования показали, что в несоразмерных помещениях отраженная звуковая энергия не распределяется равномерно по объему как в диффузном звуковом поле, а спадает по мере удаления от источника. Установлено, что в этих случаях нарушается признак диффузности поля по однородности, однако при диффузном отражении звука от ограждений сохраняется его второй признак - равновероятность прихода отраженной энергии в расчетную точку изотропно со всех направлений. Такие поля, согласно определению Шредера М.Р., являются квазидиффузными [118]. Для расчета уровней звукового давления в квазидиффузных полях используются методы, разработанные на основе статистического энергетического подхода [52]. Анализ разработанных статистических энергетических методов показывает, что наиболее приемлемым из них для решения задач по оценке шумового режима в акустически связанных системах с несоразмерными помещениями является численный метод.

На основе этого метода, в частности, были произведены исследования шумового режима в квартире [50], а также в производственном здании [51].

В зарубежной практике при оценке шума в помещениях в последнее время нашли распространение методы, основанные на представлениях о диффузионной модели, предложенной Ф. Олендорфом в 60-х годах 20-го века [110,111]. С использованием данного подхода в конце 90-х годов 20-го века и в начале 21-го века за рубежом начали активно развиваться методы расчета энергетических характеристик шумовых полей при диффузном характере отражения звука от ограждений. В настоящее время предложены различные модификации таких методов, полученные путем различных изменений входящих в них составляющих [83,84,85,91,97,98,109,113,114,125,126,127]. Предложенные методы авторы использовали также для решения некоторых задач распространения звуковой энергии в акустически связанных помещениях [82,86,99,112,115,123]. Исследования подобного вида производил также Е. Kruzinst [100,101].

Анализ разработанных статистических энергетических методов расчета отраженных звуковых полей и методов, основанных на представлениях о диффузионной модели, показывает, что их точность зависит от степени соответствия принятой идеальной диффузной модели отражения звука от ограждений реальному процессу отражения. Известно [17,30,48,59], что характер отражения звука от ограждающих поверхностей в условиях реальных помещений имеет смешанный характер, при котором часть энергии отражается зеркально, а другая часть при отражении диффузно рассеивается. В этом случае образуется два отраженных звуковых поля, закономерности формирования и распространения которых значительно отличаются друг от друга. В этом случае использование при расчетах только зеркальной или только диффузной модели отражения приводит к значительным погрешностям. Учесть смешанный характер отражения в рассмотренных выше моделях не представляется возможным. Такие попытки предпринимались в зарубежной практике с целью расширения возможности использования диффузионного подхода к оценке звуковых полей при зеркально-диффузном характере отражения [91,125,127]. Выполнилось это путем формального введения поправочных коэффициентов к коэффициенту диффузии, который аналогичен коэффициенту связи в статистической энергетической модели.

В то же время Антоновым А.И. в работе [11] было показано, что в этом случае коэффициент связи не остается постоянной величиной, а изменяется в пространстве помещения, что и является основной причиной ограничения применения указанных выше расчетных моделей. Поэтому в практике расчетов начинают находить комбинированные методы, в которых распространение отраженной зеркальной и диффузной энергий рассматривается отдельно [38,44,49,59]. Опыт разработки методов расчетов при зеркально-диффузной модели отражения показал, что наиболее перспективными в этом случае являются комбинированные модели, включающие в себя метод прослеживания лучей и численный статистически энергетический метод. Такие модели использованы в работах Макарова А.М. [57] и Соломатина Е.О. [76] при решении задач по оценке распространения шума в производственных помещениях сложной формы с оборудованием различного вида при постоянном шумовом режиме и в работе Бацуновой А.В. [20] при расчетах шума с источниками непостоянной во времени звуковой мощностью. Суть этих методов заключается в том, что они учитывают при отражениях переход части зеркальной энергии в рассеянную энергию, которая затем распространяясь в объеме создает квазидиффузное отраженное звуковое поле. При этом обратный переход рассеянной энергии в зеркальную не возможен.

Анализ исследований, выполненных на основе данного подхода, дает основание для использования его при разработке расчетных методов оценки шумового режима в системах акустически связанных помещений, в которые входят несоразмерные помещения и в которых создаются квазидиффузные звуковые поля.

При разработке новых методов расчетов и, анализе границ применения и достоверности существующих методов расчетов находит применение интегральное уравнение, предложенное Куттруфом для расчета энергетических характеристик шума и исследования процессов формирования шумовых полей [102,105].

$$I_{(ds')} = \frac{1}{\pi} \int_S (1-\alpha) I_{(ds)} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{|r|^2} ds + I_{(ds')}^0, \quad (1.1)$$

где $I_{(ds')}$ - интенсивность отраженной звуковой энергии, падающей на участок ds' ; $(1-\alpha)I_{(ds)}$ - интенсивность падающей на элемент ds' отраженной звуковой энергии, определяемая вкладами отраженной от всех других элементов ограждений ds ; $I_{(ds')}^0$ - интенсивность отраженной звуковой энергии, образующейся при падении

прямого звука на элемент ds' ; $|\vec{r}|$ - радиус - вектор, соединяющий элементы ds и ds' ; θ_1 и θ_2 - углы между вектором $\vec{r}$ и нормальными к элементам ds и ds' .

Как показали выполненные в работах [20,54] с использованием интегрального уравнения исследования, на его основе возможно производить при диффузном характере отражения звука от ограждений анализ процессов реверберации, оценку градиентов плотности отраженной звуковой энергии, плотности потоков отраженной энергии и других значимых параметров формируемых отраженный звуковых полей, в том числе и в акустически связанных помещениях. Интегральное уравнение использовано для этих целей и в настоящей работе в главе 2.

Выводы по главе 1 и определение направлений исследований

1. Разработка объемно-планировочных и конструктивных решений гражданских зданий с учетом распространения в них звуковой энергии и разработка эффективных средств защиты от шума возможна при наличии надежных методов расчета энергетических характеристик шума, основанных на представлениях о распределении звука в зданиях как системах акустически связанных помещений.

2. Выбор расчетных методов зависит от условий и факторов, влияющих на формирование шумового режима в отдельных помещениях и в целом во всей системе акустически связанных объемов. Основными из них, которые следует учитывать при выборе методов, являются пропорции помещений, характер отражения звука от ограждений и вид акустических связей между помещениями.

3. Для систем акустически связанных помещений с объемами, имеющими соразмерные пропорции, можно использовать методы статистической теории акустики, основанные на принципах диффузного поля. Для систем акустически связанных помещений с несоразмерными объемами при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений следует применять комбинированные

методы, включающие в себя метод прослеживания лучей и статистический энергетический метод.

Исходя из изложенного и поставленной цели **основными направлениями исследований в работе являются:**

- корректировка статистических методов расчета шума в акустически связанных соразмерных помещениях с учетом вида связей в системе, положения источников шума и других факторов, влияющих на распространение звуковой энергии в таких системах;
- разработка методов и методик расчетов в системах акустически связанных помещений при наличии в них несоразмерных помещений и при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений;
- разработка компьютерных программ, реализующих предложенные в работе методы расчета энергетических характеристик шума в системах акустически связанных помещений гражданских зданий и обеспечивающих оценку акустической эффективности средств снижения шума в этих системах;
- экспериментальные исследования в системах акустически связанных объемов с целью оценки точности новых и совершенствованных методов расчетов в различных системах акустически связанных помещений.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ В ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЯХ С ЯЧЕЙКОВЫМИ И АНФИЛАДНЫМИ СИСТЕМАМИ ПЛАНИРОВКИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ АКУСТИКИ ПОМЕЩЕНИЙ

Как показано в главе 1 вид систем планировки зданий существенно влияет на распределение звуковой энергии в них. Связано это в первую очередь с особенностями процессов формирования звуковой энергии в отдельных помещениях этой системы и обмена ею с соседними объемами. Условия формирования звуковых полей необходимо учитывать при разработке новых и корректировке существующих методов расчета энергетических параметров шума в зданиях как в системах акустически связанных помещений. В этой главе работы рассмотрены статистические методы расчета, которые возможно использовать в зданиях с ячейковой и анфиладной системами планировки, состоящими из соразмерных помещений. На основе этих методов проанализированы различные факторы, влияющие на формирование шумового режима в жилых и общественных зданиях с такими планировками.

2.1 Статистический метод расчета шума в зданиях с ячейковой и анфиладной системами планировки

При работе источников шума в соразмерных помещениях ячейковых и анфиладных систем планировки формируются диффузные отраженные звуковые поля с равномерным распределением звуковой энергии по объему помещений. В этом случае оценку отраженного шума в помещениях можно производить на основе статистической теории акустики помещений [14,58,72]. Разработанные в настоящее время для связанных помещений расчетные методы имеют ряд допущений, которые могут приводить к существенным погрешностям. К ним относятся:

1. Предполагается, что отраженные звуковые поля в помещениях являются идеально диффузными. В тоже время известно, что при наличии открытых связей между помещениями вблизи открытых проемов диффузность по признаку однородности резко нарушается. Это может приводить к существенным погрешностям при оценке обмена звуковой энергии между помещениями. В районе проема появляются направленные потоки звуковой энергии. Оценка погрешностей расчетов за счет данного допущения ранее не производилась.

2. В помещениях системы с источниками шума образуются поля прямого звука и отраженные звуковые поля. При расчетах прямую составляющую звуковой энергии от локального источника не выделяют отдельно. Рассматривается суммарный результат от прямого и отраженного звука, что в ряде случаев является допущением, дающим существенные погрешности при расчетах. Данное обстоятельство в настоящее время не исследовано.

3. В ряде случаев в расчетных моделях отсутствует учет обратного обмена энергией между «тихим» и «шумным» помещениями. При этом не производится оценка влияния такого допущения на точность расчетов.

Данные упрощения были вызваны необходимостью выполнения трудоемких расчетов вручную. При компьютерных расчетах необходимость в таких упрощениях отпадает. Ниже рассматривается расчетная модель, в полном объеме учитывающая все процессы перетекания звуковой энергии в системе акустически связанных помещений.

В общем случае в помещении с источником звука звуковая энергия определяется прямой и отраженной составляющими энергии. Прямая энергия вычисляется достаточно просто для каждого помещения. Отраженная энергия зависит от звукопоглощающих характеристик помещений, их связей между собой и других факторов, влияющих на ее распределение в системе помещений.

С позиций статистической теории акустики при диффузном звуковом поле уравнение, описывающее изменение отраженной звуковой энергии в i -ом помещении системы акустически связанных соразмерных помещений, может быть получено на основе закона сохранения энергии.

Изменение количества отраженной звуковой энергии в i -ом помещении системы определяется отраженной энергией, возникающей при работе источника

звука в i -ом помещении $(1-\alpha_i)W_i$, отраженной энергией, образовавшейся в i -ом помещении от прямого звука, проникающего из связанных с ним j -х помещений $(1-\alpha_i)\gamma_{ij}W_j$, проникающего отраженного звука из связанных j -х помещений $\beta_{ji}E_j$, потерями энергии за счет поглощения ее в объеме i -го помещения $\nu_i E_i$ и оттока в смежные акустически связанные помещения энергии отраженного звука $\beta_{ji}E_i$ и энергии прямого звука $\gamma_{ji}W_i$. То есть

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} = \left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ji}\right) W_i + \sum_{j=1}^N \beta_{ij} E_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} (1 - \alpha_i) W_j - \nu_i E_i - \sum_{i=1}^N \beta_{ji} E_i \quad (2.1)$$

Начальные условия могут задаваться в виде $E_i = E_{oi}$ при $t = t_0$. При $t \gg t_0$ и при наличии действующих с постоянной мощностью источников шума влияние начального распределения энергии E_{oi} на звуковое поле быстро уменьшается и устанавливается стационарное звуковое поле, описываемое уравнением

$$\left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ji}\right) W_i + \sum_{j=1}^N \beta_{ij} E_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} (1 - \alpha_i) W_j - \nu_i E_i - \sum_{i=1}^N \beta_{ji} E_i = 0 \quad (2.2)$$

Схема баланса отраженной энергии для i -го помещения приведена на рисунке 2.1.

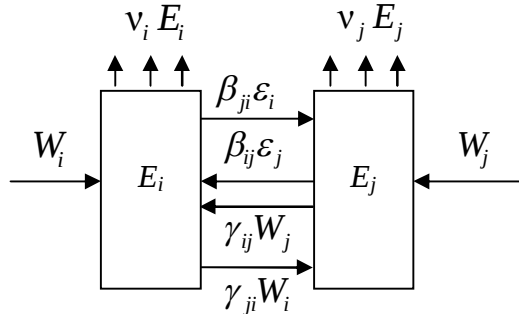


Рисунок 2.1 - Схема баланса отраженной звуковой энергии для i -го помещения

Уравнение (2.2) является математической записью закона сохранения отраженной звуковой энергии. Как видно, при установившемся режиме звукового поля количество поглощенной в i -м объеме помещения и ушедшей в соседние помещения звуковой энергии компенсируется излученной перешедшей в отраженную энергию источника и энергией, пришедшей из смежных акустически связанных помещений.

Для решения задач по оценке шумового режима и анализу влияния различных факторов на распределение звуковой энергии в связанных помещениях уравнения (2.1) и (2.2) удобнее записать через плотности звуковой энергии,

учитывая, что в соразмерных помещениях отраженное звуковое поле диффузно и плотность отраженной звуковой энергии в i -ом помещении определяется как

$$\varepsilon_i = E_i / V_i \quad (2.3)$$

Тогда уравнение (2.1) можно записать в виде

$$\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} = \left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ji}\right) \frac{W_i}{V_i} + \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \varepsilon_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} (1 - \alpha_i) \frac{W_j}{V_i} - \nu_i \varepsilon_i - \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \varepsilon_i \quad (2.4)$$

Соответственно, уравнение (2.2) будет иметь вид

$$\left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ji}\right) \frac{W_i}{V_i} + \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \varepsilon_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} (1 - \alpha_i) \frac{W_j}{V_i} - \nu_i \varepsilon_i - \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \varepsilon_i = 0 \quad (2.5)$$

В уравнениях (2.1) - (2.5) N - общее количество связанных с i -м помещением j -х помещений; α_i - средний коэффициент звукопоглощения в i -ом помещении; V_i - коэффициент потерь звуковой энергии в i -ом помещении; β_{ij}, β_{ji} - коэффициенты передачи отраженной звуковой энергии из j -го помещения в i -е помещение и наоборот из i -го в j -е; γ_{ij}, γ_{ji} - коэффициенты передачи прямой энергии из j -го помещения в i -е помещение и наоборот из i -го в j -е; V_i - объем i -го помещения.

В условиях диффузного звукового поля коэффициенты потерь звуковой энергии находятся как

$$\nu_i = \frac{c \alpha_i S_i}{4V_i(1 - 0.5\alpha_i)}, \quad (2.6)$$

а коэффициенты передачи отраженной энергии из j -го помещения в i -е рассчитываются по формуле

$$\beta_{ij} = \frac{c}{4V_i(1 - 0.5\alpha_j)} \left(S_{ij}^{\text{дв}} \cdot \tau_{ij}^{\text{дв}} + S_{ij}^{\text{пер}} \cdot \tau_{ij}^{\text{пер}} \right). \quad (2.7)$$

Аналогичным образом определяются коэффициенты β_{ji} .

В выражениях (2.6) и (2.7) приняты обозначения: c - скорость звука в воздухе; S_i, V_i - площадь ограждений и объем i -го помещения; V_j - объем j -го помещения; α_i, α_j - средние коэффициенты звукопоглощения ограждений i -го и j -го помещений; $S_{ij}^{\text{дв}}, \tau_{ij}^{\text{дв}}$ - площадь и коэффициент звукопередачи двери между i -м и j -м помещениями; $S_{ij}^{\text{пер}}, \tau_{ij}^{\text{пер}}$ - то же перегородки.

При средних коэффициентах звукопоглощения $\alpha_i \leq 0.1$ коэффициенты ν_i и β_{ij} могут вычисляться по формулам

$$\nu_i = c\alpha_i S_i / 4V_i, \quad (2.8)$$

$$\beta_{ij} = \frac{c}{4V_i} \left(S_{ij}^{\text{дв}} \cdot \tau_{ij}^{\text{дв}} + S_{ij}^{\text{пер}} \cdot \tau_{ij}^{\text{пер}} \right) \quad (2.9)$$

При записи выражений (2.4) - (2.5) использованы известные зависимости статистической теории акустики помещений [58].

Определение коэффициентов γ_{ij}, γ_{ji} является более сложной задачей ее решение рассмотрено ниже при учете влияния прямого звука на звуковые поля в смежных помещениях.

Таким образом для оценки распределения звуковой энергии в ячейковой и анфиладной системах планировки как в системах акустически связанных помещений необходимо решать системы линейных уравнений (2.1) и (2.2) или (2.4) и (2.5) с их числом, равным количеству помещений в системе. При стационарном режиме работы источников шума системы уравнений (2.2) и (2.5) можно решать, методом Гаусса. Численное решение системы уравнений (2.1) и (2.4) может быть выполнено с использованием явных и неявных схем. Наиболее просто алгоритмизируется решение систем уравнений (2.1) и (2.4) методом конечных разностей по явной схеме. Например для уравнения (2.4), заменив дифференциалы на конечные разности $\Delta \varepsilon$ и Δt , можно записать выражение для приращения энергии в i -ом помещении за интервал времени Δt в виде

$$\Delta \varepsilon_i = \left[\left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ji} \right) \frac{W_i}{V_i} + \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \varepsilon_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} (1 - \alpha_i) \frac{W_j}{V_j} - \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \varepsilon_i - \nu_i \varepsilon_i \right] \Delta t \quad (2.10)$$

Величина плотности отраженной звуковой энергии $\varepsilon_i^{t+\Delta t}$ во время $t + \Delta t$ выражается через плотность ε_i^t во время t с учетом начальных условий $\varepsilon_i^{t_0} = \varepsilon_{0i}$

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^{t+\Delta t} = \varepsilon_i^t + \Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i^t & \left[1 - \left(\nu_i + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \right) \Delta t \right] + \\ & + \left[\sum_{j=1}^N (1 - \alpha_i) \gamma_{ij} \frac{W_j^t}{V_j} + \beta_{ij} \varepsilon_j^t + \left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ji} \right) \frac{W_i^t}{V_i} \right] \Delta t \end{aligned} \quad (2.11)$$

Выполненные расчеты показали, что устойчивость решения уравнений по явной схеме обеспечивается при обеспечении условия

$$\Delta t < \frac{0.05}{\left(\nu_i + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \right)} \quad (2.12)$$

Решая систему уравнений в виде (2.5), можно определить плотность отраженной энергии в каждом i -м помещении ε_i и вычислить для них уровни звукового давления. При наличии в i -ом помещении прямого источника звука уровень звукового давления определится как

$$L_i = 10 \lg[(\varepsilon_{\text{при}} + \varepsilon_i) c / I_0] \quad (2.13)$$

где $\varepsilon_{\text{при}}$ - плотность прямой звуковой энергии, $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² - интенсивность звука на пороге слышимости.

Для реализации рассмотренной расчетной модели разработана компьютерная программа, позволяющая производить расчеты уровней шума в системах акустически связанных соразмерных помещений при стационарном и нестационарном режимах работы источников шума [67]. Она пригодна для решения задач при ячейковых и анфиладных системах планировки.

В записанных уравнениях учитывается отток энергии в смежные помещения и обратный приток энергии из смежных помещений, а также рассматривается отдельно распространение в системе помещений прямой и отраженной энергии.

В практике расчетов достаточно часто и без должного обоснования пренебрегают обратным притоком энергии из смежных помещений, а также в помещениях с источником шума не разделяют энергию прямого и отраженного звука. В этом случае уравнения (2.1) и (2.2) существенно упрощаются и имеют вид

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} = W_i - \sum_{j=1}^N \beta_{ji} E_i - \nu_i E_i \quad (2.14)$$

$$\nu_i E_i + W_i - \sum_{j=1}^N \beta_{ji} E_i \quad (2.15)$$

Схема баланса звуковой энергии для данного случая приведена на рисунке 2.2.

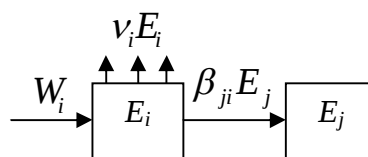


Рисунок 2.2 - Схема баланса звуковой энергии для i -го помещения

Как и ранее, для плотности отраженной энергии уравнения (2.14) и (2.15) можно записать в виде

$$\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} = \frac{W_i}{V_i} + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \varepsilon_i - \nu_i \varepsilon_i \quad (2.16)$$

$$\nu_i \varepsilon_i = \frac{W_i}{V_i} - \sum_{i=1}^N \beta_{ji} \varepsilon_i \quad (2.17)$$

Решение систем уравнений (2.16) и (2.17) аналогично предыдущему. При этом устойчивость решения по явной схеме обеспечивается при выполнении условия (2.12).

Таким образом, для описания звуковых полей в ячейковых и в анфиладных системах соразмерных помещений при диффузном звуковом поле и для разработки строительно-акустических мероприятий по снижению шума в них можно использовать рассмотренный выше точный статистический метод и разработанную для его реализации компьютерную программу [67]. Он позволяет учитывать конкретные условия формирования шумового режима в отдельных помещениях системы и акустическую связь между ними.

2.2 Экспериментальная проверка статистического расчетного метода

Для оценки точности расчетов шума статистическим методом произведены экспериментальные исследования и выполнено их сравнение с данными расчетов. Методика экспериментальных исследований и результаты сравнительного анализа приведены ниже.

При проведении сравнительного анализа поставлена и решена задача оценки степени соответствия предложенного расчетного метода реальным условиям формирования звуковых полей помещений в ячейковых системах планировок.

Выбор объекта исследований производился исходя из условий обеспечения в исследуемой системе акустически связанных помещений диффузного отражения звука от поверхностей и достаточно равномерного распределения звуковой энергии в каждом объеме системы. В этой связи в качестве объекта исследования принята

типовая трехкомнатная квартира ячейковой системы планировки с соразмерными помещениями.

Аппаратурное обеспечение экспериментальных исследований включало источники звуковой энергии, комплект шумометрических приборов и аппаратуру для измерения времени реверберации. При измерениях использовался всенаправленный источник звука (додекаэдр) OED-SP-012-600. Звуковая мощность источника 90 дБ и выше. Показатель направленности источника не превышал ± 5 дБ. Измерения выполнялись шумомером ЭКОФИЗИКА-110А. Исследование реверберации производилось с использованием шумомера и программного обеспечения приборов фирмы Октава «110 UTIL», позволяющего записывать и анализировать временные и энергетические характеристики шума в помещениях.

Методика измерений. Выбор количества и положения точек измерений в квартире отвечал требованиям анализа распределения отраженной энергии с позиции влияния на нее характера отражения звука и пропорций помещений. Общее количество точек измерения в квартире принималось таким, чтобы по результатам исследований можно было судить об общей картине распределения звуковой энергии в квартире. Измерения для всех расчетных точек в помещении выполнялись в одной характерной плоскости на уровне 1.5 м от пола. Шумовой фон во всех случаях был на 10-15 дБ ниже уровней звукового давления, создаваемых источником в наиболее удаленных точках.

Сравнительная оценка расчетных и экспериментальных данных выполнена на основе результатов статистической обработки. Расхождения между расчетными данными и экспериментом характеризовались статистическим показателем - средним квадратичным отклонением

$$\Delta L_{\text{кв}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\Delta L - \Delta \bar{L})^2 / N}, \quad (2.20)$$

где ΔL - разность измеренного и рассчитанного уровней; $\Delta \bar{L}$ - среднее расхождение данных расчетов и эксперимента, равное $\Delta \bar{L} = \sum_{i=1}^N \Delta L / N$; N – количество расчетных точек.

Расчеты выполнялись с помощью компьютерной программы [67].

Схема квартиры приведена на рисунке 2.3. Квартира состоит из 8 помещений, разделенных кирпичными перегородками со звукоизоляцией 41 дБ.

Звукоизоляция дверных заполнений 10 дБ. Высота помещения 2.7 м. Остальные параметры помещений квартиры даны в таблице 2.1. Всего произведено три серии экспериментов при трех изменениях места положения источника шума в квартире. Измерения в каждом помещении производились не менее чем в трех точках при открытых и закрытых дверях во всех помещениях квартиры.

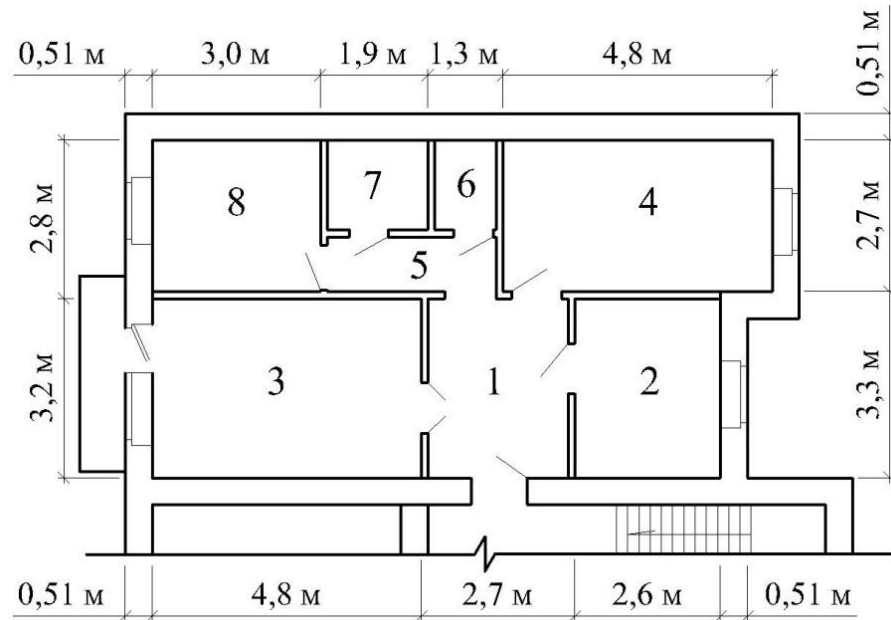


Рисунок 2.3 - Схема квартиры к расчету

Таблица 2.1 - Параметры помещений квартиры

№ пом.	Площадь ограждений помещения, S_i м ²	Площадь дверного проема помещения	Объем помещения, V_i м ³	Средний коэффициент звукопоглощения помещений α_i
1	2	3	4	5
1	46.8	2.0	21.6	0.2
2	48.0	1.8	22.5	0.1
3	73.9	2.0	41.5	0.2
4	66.4	1.8	35.0	0.2
5	27.6	1.84	8.1	0.2
6	18.1	1.4	4.8	0.1
7	24.1	1.4	7.8	0.05
8	47.0	1.8	21.9	0.2

Результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных приведены в таблицах 2.2 – 2.4.

Таблица 2.2 - Расчетные и экспериментальные уровни шума в помещениях квартиры при расположении источника в помещении №1

№ помещения квартиры	Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp}=1000$ Гц, дБ			Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp}=4000$ Гц, дБ		
	Измеренные $L_{\text{э}}$	Расчетные L_p	$\Delta L_{\text{кв}}$	Измеренные $L_{\text{э}}$	Расчетные L_p	$\Delta L_{\text{кв}}$
1	2	3	4	5	6	7
Все двери помещений квартиры открыты						
1	88.31	87.10	1.21	85.93	87.10	1.17
2	82.55	81.40	1.15	80.14	81.40	1.26
3	76.13	76.50	0.37	75.19	76.50	1.31
4	78.64	76.10	2.54	75.89	76.10	0.21
5	82.05	81.20	0.85	80.70	81.20	0.50
6	69.75	69.10	0.65	68.41	69.10	0.69
7	67.75	67.20	0.55	66.23	67.20	0.97
8	77.14	76.20	0.64	74.53	76.20	1.68
Все двери помещений квартиры закрыты						
1	90.30	88.90	1.46	89.20	88.90	0.30
2	73.20	72.30	0.87	71.20	72.30	1.10
3	68.60	67.20	1.36	66.10	67.20	1.14
4	65.30	66.60	1.30	64.80	66.60	1.85
5	82.80	81.50	1.29	79.60	81.50	1.87
6	70.40	71.80	1.37	72.10	71.80	0.32
7	68.30	70.10	1.85	71.80	70.10	1.72
8	53.80	52.80	0.96	51.70	52.80	1.09

Таблица 2.3 - Расчетные и экспериментальные уровни шума в помещениях квартиры при расположении источника в помещении №2

№ помещения квартиры	Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp}=1000$ Гц, дБ			Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp}=4000$ Гц, дБ		
	Измеренные $L_{\text{э}}$	Расчетные L_p	$\Delta L_{\text{кв}}$	Измеренные $L_{\text{э}}$	Расчетные L_p	$\Delta L_{\text{кв}}$
1	2	3	4	5	6	7
Все двери помещений квартиры открыты						
1	82.10	80.80	1.26	79.80	80.80	1.01
2	90.10	88.50	1.59	88.40	88.50	0.14
3	71.20	69.90	1.33	68.20	69.90	1.69
4	71.60	70.30	1.34	68.80	70.30	1.46
5	79.90	78.10	1.79	77.10	78.10	0.98

Продолжение табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7
6	66.90	68.10	1.19	66.20	68.10	1.88
7	64.10	63.20	0.92	61.30	63.20	1.87
8	69.40	69.20	0.20	67.50	69.20	1.70
Все двери помещений квартиры закрыты						
1	71.20	71.30	0.15	69.90	71.30	1.45
2	90.60	89.00	1.59	88.50	89.00	0.48
3	44.00	42.10	1.94	40.40	42.10	1.74
4	44.10	42.30	1.77	43.90	42.30	1.64
5	64.10	62.50	1.60	60.80	62.50	1.70
6	52.20	50.80	1.40	49.10	50.80	1.70
7	47.70	45.80	1.86	44.60	45.80	1.18
8	38.20	36.50	1.70	35.40	36.50	1.10
Открыта дверь второго помещения						
1	82.10	80.90	1.20	81.60	80.90	0.70
2	88.70	87.60	1.05	87.90	87.60	0.30
3	54.70	55.70	1.04	54.30	55.70	1.36
4	54.90	53.20	1.70	52.70	53.20	0.53
5	75.20	73.50	1.70	71.90	73.50	1.60
6	68.60	67.30	1.25	63.10	64.30	1.25
7	67.40	66.20	1.20	65.10	66.20	1.10
8	56.40	55.10	1.30	54.20	55.10	0.90

Таблица 2.4 - Расчетные и экспериментальные уровни шума в помещениях квартиры при расположении источника в помещении №3

№ помещения квартиры	Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp}=1000$ Гц, дБ			Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp}=4000$ Гц, дБ		
	Измеренные $L_{\text{э}}$	Расчетные L_p	$\Delta L_{\text{кв}}$	Измеренные $L_{\text{э}}$	Расчетные L_p	$\Delta L_{\text{кв}}$
1	2	3	4	5	6	7
Все двери помещений квартиры открыты						
1	75.20	73.90	1.33	73.50	73.90	0.39
2	69.80	68.10	1.70	66.40	68.10	1.67
3	84.90	83.90	1.00	85.10	83.90	1.17
4	67.10	65.40	1.70	64.70	65.40	0.72
5	72.00	70.20	1.82	71.50	70.20	1.28
6	58.90	57.10	1.80	58.60	57.10	1.48
7	66.90	65.10	1.80	63.90	65.10	1.20
8	57.90	56.40	1.50	55.40	56.40	1.05

Продолжение табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7
Все двери помещений квартиры закрыты						
1	61,20	59,80	1,40	58,40	59,80	1,40
2	43,50	44,10	0,59	42,90	44,10	1,20
3	85,80	84,90	0,90	85,20	84,90	0,26
4	45,70	46,20	0,51	44,80	46,20	1,40
5	61,10	60,70	0,38	61,00	60,70	0,32
6	48,60	50,10	1,52	48,10	50,10	1,97
7	45,50	46,40	0,88	44,90	46,40	1,50
8	46,40	46,30	0,05	45,10	46,30	1,20
Открыта дверь третьего помещения						
1	76,90	75,10	1,78	73,80	75,10	1,32
2	60,20	61,80	1,58	60,20	61,80	1,58
3	85,10	83,30	1,77	81,90	83,30	1,43
4	58,50	57,10	1,38	56,20	57,10	0,92
5	70,90	69,40	1,46	68,20	69,40	1,24
6	61,20	60,30	0,90	59,30	60,30	1,00
7	63,10	62,20	0,92	60,70	62,20	1,48
8	54,60	53,20	1,37	51,60	53,20	1,63

Анализ показывает, что метод обеспечивает достаточную точность расчетов уровней шума в квартирах. Расхождение результатов расчетов с экспериментом не превышают 2 дБ. Метод адекватно реагирует на изменение условий распространения звуковой энергии в акустически связанных помещениях при изменениях акустических связей между помещениями квартиры.

2.3 Исследования особенностей формирования шумовых полей в соразмерных акустически связанных помещениях и оценка необходимости их учета при расчетах шума на основе статистической теории акустики

Целью исследований в данном разделе является оценка точности статистического подхода к расчету шума в акустически связанных помещениях и уточнение методики расчета на основе исследования энергетических параметров методами математического моделирования. Для упрощения записей исследования

выполнялись на примере двух связанных соразмерных помещений. Полученные результаты можно распространить на другое количество связанных помещений.

Учет влияния прямого звука источника шума и его положения на звуковое поле в смежном помещении.

По сравнению с предложенным расчетным методом в настоящее время в практике используется упрощенный метод расчета, при котором в двух связанных между собой помещениях уровни звукового давления определяются:

для помещения с источником шума как

$$L_1 = L_w + 10 \lg(4 / \alpha_1 S_1), \quad (2.19)$$

для помещения без источника шума как

$$L_2 = L_w + 10 \lg \left(\frac{4(S'_{\text{пер}} \tau_{\text{пер}} + S_{\text{дв}} \tau_{\text{вд}})}{\alpha_1 S_1 \alpha_2 S_2} \right). \quad (2.20)$$

В формулах (2.19) и (2.20) L_w - уровень акустической мощности источника шума, размещенного в первом помещении; $\alpha_1, S_1, \alpha_2, S_2$ - средние коэффициенты звукопоглощения и площади ограждающих конструкций, соответственно, в первом «шумном» и во втором «тихом» помещениях; $S_{\text{дв}}, \tau_{\text{вд}}$ - площадь и коэффициент звукопроницаемости двери; $\tau_{\text{пер}}$ - коэффициент звукопроницаемости перегородки; $S'_{\text{пер}}$ - площадь перегородки без учета площади двери.

Видно, что недостатком расчета уровней звукового давления с использованием выражений (2.19) и (2.20) является объединение прямого и отраженного звука с последующим расчетом его как для диффузного поля. В реальности вблизи источника шума суммарное звуковое поле за счет наличия прямого звука не диффузно. Это может приводить к существенным погрешностям. Ниже произведен учет влияния прямого звука и положения источника на шум в связанных помещениях и выполнена оценка величины этого влияния.

Звуковая энергия при действии в помещении локального точечного ненаправленного источника определяется энергиями прямого и отраженного звука, плотности которых определяются как

$$\varepsilon'_{np} = W / 4\pi r^2 c, \quad (2.21)$$

$$\varepsilon' = 4W(1 - \alpha_1) / \alpha_1 c S_1. \quad (2.22)$$

Интенсивность падающей энергии на элемент ограждения ds составляет

$$I|_{ds} = \varepsilon'_{\text{пр}} c \cos \theta + \varepsilon' c / 4, \quad (2.23)$$

где θ - угол между нормалью к ds и направлением подающего луча прямого звука.

Мощность акустической энергии, изучаемой ограждением в смежное «тихое» помещение, равна

$$W'' = \int_{S'_{\text{пер}} + S_{\text{дв}}} I \tau ds = \frac{\varepsilon' c S'_{\text{пер}} \cdot \tau_{\text{пер}}}{4} + \frac{\varepsilon' c S_{\text{дв}} \cdot \tau_{\text{дв}}}{4} + \int_{S'_{\text{пер}}} \varepsilon'_{\text{пр}} c \cdot \tau_{\text{пер}} \cdot \cos \theta ds + \int_{S_{\text{дв}}} \varepsilon'_{\text{пр}} c \cdot \tau_{\text{дв}} \cos \theta ds. \quad (2.24)$$

Для перехода в полярную систему координат запишем

$$ds = r^2 \sin \gamma \cdot d\gamma \cdot d\theta \quad (2.25)$$

где γ, θ - угловые координаты в полярной системе; r - расстояние от источника шума до элемента ограждения ds .

С учетом (2.21) и (2.25) и замены пределов интегрирования выражение для акустической мощности прямого звука, излучаемой перегородкой в смежное помещение, (2.24) можно записать в виде

$$\int_{S'_{\text{пер}}} \varepsilon'_{\text{пр}} c \cdot \tau_{\text{пер}} \cdot \cos \theta ds = \int_{\Omega_{\text{пер}}} \frac{W c \tau_{\text{пер}}}{4\pi r^2 c} \cdot r^2 \cos \theta \sin \gamma d\gamma d\theta = \frac{W \tau_{\text{пер}} \Omega_{\text{пер}}}{4\pi}, \quad (2.26)$$

где $\Omega_{\text{пер}}$ - телесный угол, под которым из точки источника шума видна перегородка.

Отношение $\Omega_{\text{пер}} / 4\pi$ показывает долю прямой звуковой энергии, падающей на элемент ограждения. Аналогично (2.26) можно записать выражение и для дверного проема.

После преобразований окончательно имеем формулу для определения уровня звукового давления во втором помещении

$$L_2 = L_W + 10 \lg \left(\frac{S'_{\text{пер}} (1 - \alpha_1) \tau_{\text{пер}}}{\alpha_1 S_1} + \frac{S_{\text{дв}} (1 - \alpha_1) \tau_{\text{дв}}}{\alpha_1 S_1} + \frac{\Omega_{\text{пер}} \tau_{\text{пер}}}{4\pi} + \frac{\Omega_{\text{дв}} \tau_{\text{дв}}}{4\pi} \right) + 10 \lg \left(\frac{4}{\alpha_2 S_2} \right). \quad (2.27)$$

Для вычисления телесных углов $\Omega_{\text{пер}}$ и $\Omega_{\text{дв}}$ удобно разделить конструкции на треугольники и воспользоваться выражением Люиле [41]

$$\Omega = 4 \arctg \sqrt{tg \left(\frac{P}{2} \right) tg \left(\frac{A - P}{2} \right) tg \left(\frac{B - P}{2} \right) tg \left(\frac{C - P}{2} \right)}, \quad (2.28)$$

где A, B, C – угол граней телесного угла при его вершине; $P = (A + B + C) / 2$.

В компьютерных программах для небольших элементов ограждений возможно приближенное определение телесных углов в виде

$$\Omega = S \cdot \cos \theta / R^2, \quad (2.29)$$

где R – расстояние от источника до геометрического центра элемента ограждения;
 θ - угол между R и нормалью к элементу ограждения площадью S .

Ниже на конкретном примере дан анализ расхождения результатов расчетов уровней звукового давления в двух связанных помещениях при приближенном и точном учетах прямого звука.

Пример 1. Рассчитать уровни звукового давления в помещениях, разделенных перегородкой площадью $S_{\text{пер}}=15 \text{ м}^2$ со звукоизоляцией $R_{\text{пер}}=26 \text{ дБ}$. Схема помещений приведена на рисунке 2.4. Источник шума мощностью $L_W=100 \text{ дБ}$ находится в «шумном» помещении в точке №2. Коэффициенты звукопоглощения ограждений $\alpha_{\text{стен}} = \alpha_{\text{пола}} = 0.07$, потолка $\alpha_{\text{пот}} = 0.43$. Дверь площадью $S_{\text{дв}} = 3 \text{ м}^2$ имеет звукоизоляцию $R_{\text{дв}} = 0$ в открытом состоянии и $R_{\text{дв}} = 10 \text{ дБ}$ в закрытом. Высота помещения $h=3 \text{ м}$.

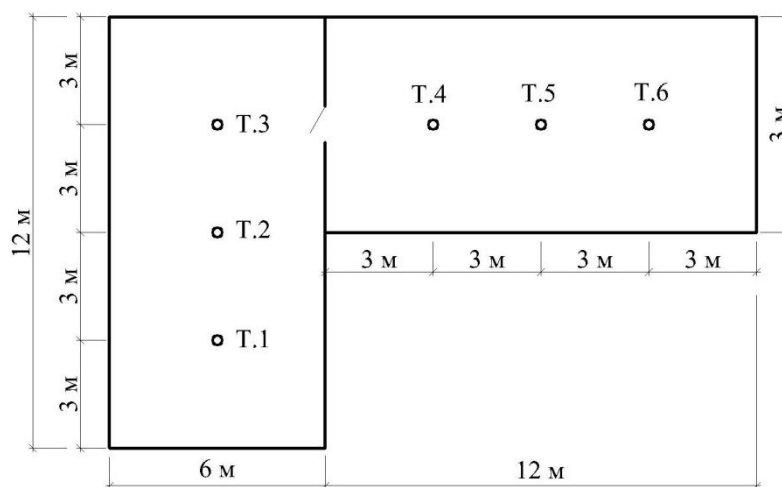


Рисунок 2.4 - Расчетная схема двух акустически связанных помещений

Характеристики помещений, необходимые для расчета: площадь ограждений $S_{\text{огр}} = 2(6 \cdot 3 + 6 \cdot 12 + 12 \cdot 3) = 252 \text{ м}^2$; средние коэффициенты звукопоглощения ограждений при закрытой двери $\alpha_1 = \alpha_2 = (2 \cdot 0.07 \cdot 6 \cdot 3 + 2 \cdot 0.07 \cdot 12 \cdot 3 + 0.07 \cdot 12 \cdot 6 + 0.43 \cdot 12 \cdot 6) / 252 = 0.173$; тоже при открытой двери ($\alpha_{\text{дв}} \approx 1$) и при отсутствии обратной связи $\alpha_1 = \alpha_2 = (252 \cdot 0.07 + 6 \cdot 12 \cdot (0.43 - 0.07) + 3(1 - 0.07)) / 252 = 0.184$

Результаты расчета уровней звукового давления по упрощенным формулам (2.19) и (2.20)

Средний уровень звукового давления в помещении с источником шума при открытой двери составляет $L_1 = 100 + 10 \lg [4 / (0.184 \cdot 252)] = 89.4$ дБ, тоже при закрытой двери $L_1 = 100 + 10 \lg [4 / (0.173 \cdot 252)] = 89.6$ дБ.

Средний уровень звукового давления в смежном «тихом» помещении при открытой двери равен $L_2 = 100 + 10 \lg [(4(15 \cdot 10^{-0.1 \cdot 26} + 3 \cdot 10^0) / (0.184 \cdot 252 \cdot 0.184 \cdot 252))] = 77.5$ дБ, тоже при закрытой двери $L_2 = 100 + 10 \lg [(4(15 \cdot 10^{-0.1 \cdot 26} + 3 \cdot 10^{-0.1 \cdot 10}) / (0.173 \cdot 252 \cdot 0.173 \cdot 252))] = 68.5$ дБ.

Результаты расчета уровней звукового давления в «тихом» помещении с учетом разделения падающей на перегородку энергии на прямую и отраженную.

Источник помещался в точках 1,2,3 при открытом ($R_{дв} = 0$) и закрытом ($R_{дв} = 10$ дБ) дверном проеме. Данные расчета приведены в таблице 2.5

По результатам расчетов установлено, что положение источника шума относительно звукоизолирующей конструкции влияет на величину звуковой энергии в защищаемом «тихом» помещении. Чем ближе источник шума находится к перегородке, тем выше значение уровня звука в смежном помещении. В данном случае увеличение шума достигает $\Delta L = 1.3$ дБ. С ростом несоразмерности помещений это значение может возрастать.

Таблица 2.5 - Результаты расчета уровней звукового давления с учетом положения источника шума и прямого звука

Уровень отраженной энергии в помещении с источником, L_1 , дБ	Положение источника (номер точки)	$\Omega_{дв, стер}$		$\Omega_{пер, стер}$		Звукоизоляция двери, $R_{дв}$, дБ	Уровень звука в «тихом» помещении, L_2 , дБ		
		по (2.28)	по (2.29)	по (2.28)	по (2.29)		с учетом (2.28)	с учетом (2.29)	по (2.20) без учета положения источника
88.5	1	0.00237	0.00235	0.0162	0.0119	0	77.4	77.4	77.5
88.8						10	67.9	67.9	68.5
88.5	2	0.00915	0.00919	0.0469	0.0563	0	77.9	77.9	77.5
88.8						10	68.3	68.3	68.5
88.5	3	0.0236	0.0255	0.0788	0.1326	0	78.7	78.8	77.5
88.8						10	69.2	69.3	68.5

Результаты расчетов показали также, что приближенный расчет телесных углов элементов ограждений Ω по формуле (2.29) обеспечивает достаточную точность. В данном конкретном случае погрешность расчета не превышает 0.15 дБ.

Оценка необходимости учета обратной акустической связи в системе помещений

В уравнениях (2.19) и (2.20) не учитывается возвращение звуковой энергии из помещения без источника звука в помещение с источником. Такое положение может быть в том случае, если шумовая ситуация в смежных помещениях «контрастная», то есть имеется значительный перепад уровней шума в помещениях. Обратный приход энергии можно игнорировать при высокой звукоизоляции разделяющего ограждения и при отсутствии связи между помещениями в виде открытых проемов. В остальных случаях (открытые двери, перегородки не полной высоты и т.п.) это неочевидно. Возвращение энергии из «тихих» помещений в «шумные» в ряде случаев может оказать влияние на уровни «шумного» помещения. Поэтому ее неучет в некоторых ситуациях может приводить к погрешностям в расчетах. Ниже приведен анализ таких ситуаций.

Система уравнений для отраженного звукового поля в двух акустически связанных соразмерных помещениях, в каждом из которых имеется источник шума имеет вид

$$\begin{cases} E_1(\nu_1 + \beta_{21}) = (1 - \alpha_1 - \gamma_{21})W_1 + \beta_{12}E_2 + (1 - \alpha_1)\gamma_{12}W_2; \\ E_2(\nu_2 + \beta_{12}) = (1 - \alpha_2 - \gamma_{12})W_2 + \beta_{21}E_1 + (1 - \alpha_2)\gamma_{21}W_1. \end{cases} \quad (2.30)$$

Решением системы уравнений являются выражения

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{(1 - \alpha_1 - \gamma_{21})W_1 + \frac{\beta_{12}}{(\nu_2 + \beta_{12})}[(1 - \alpha_2 - \gamma_{12})W_2 + (1 - \alpha_2)\gamma_{21}W_1] + (1 - \alpha_2)\gamma_{21}W_1}{(\nu_1 + \beta_{21}) - \beta_{12}\beta_{21}/(\nu_2 + \beta_{12})} \\ E_2 &= \frac{(1 - \alpha_2 - \gamma_{12})W_2 + \frac{\beta_{21}}{(\nu_1 + \beta_{21})}[(1 - \alpha_1 - \gamma_{21})W_1 + (1 - \alpha_1)\gamma_{12}W_2] + (1 - \alpha_1)\gamma_{12}W_2}{(\nu_2 + \beta_{12}) - \beta_{21}\beta_{12}/(\nu_1 + \beta_{21})} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Пример 2. Для помещений в примере 1 (рисунок 2.4) рассчитаны значения уровней звукового давления при действии двух источников шума. В левом помещении в точке №2 располагается источника с постоянной акустической мощности $L'_w = 100$ дБ. Мощность источника шума в правом помещении L''_w (точка

№5) изменялась от 60 до 100 дБ. Расчеты произведены при открытой ($R_{\text{дв}} = 0$) и закрытой ($R_{\text{дв}} = 10$ дБ) двери.

Результаты расчетов даны в таблице 2.6 и приведены на графиках рисунка 2.5. Расчеты показали, что в помещении с источником шума бóльшей мощности (помещение №1) обратная связь практически не проявляется (см. столбец 3, таблицы 2.6). При увеличении акустической мощности в смежном помещении до равного значения уровень звукового давления увеличивается менее чем на 0.4 дБ при открытой двери и практически не увеличивается при закрытой двери. В помещении №2 с более тихим источником шума воздействие акустической связи очевиднее. При уровне $L''_w < 70$ дБ уровень звука в правом помещении полностью определяется энергией, проникающей через перегородку и дверь. При равенстве энергетических характеристик источников шума в смежных помещениях и близких акустических параметрах помещений влияние акустической связи на параметры звукового поля минимально. При $L'_w = L''_w = 100$ дБ все три графика рисунка 2.6 с $R_{\text{дв}} = 0$, $R_{\text{дв}} = 10$ дБ и $R_{\text{дв}} = \infty$ сходятся в одну точку

Таблица 2.6 - Результаты расчета уровней шума с источниками звука в каждом помещении.

Уровень акустической мощности источника в помещении №2, L''_w , дБ	Звукоизоляция двери, $R_{\text{дв}}$, дБ	Уровень звукового давления, L , дБ	
		в помещении №1, L' , дБ	в помещении №2, L'' , дБ
1	2	3	4
60	0	88.54	78.31
	10	88.80	69.19
70	0	88.54	78.36
	10	88.80	69.54
80	0	88.54	78.74
	10	88.80	71.99
90	0	88.58	81.43
	10	88.81	79.25
100	0	88.93	88.93
	10	88.85	88.85

$$\begin{cases} \nu_k E_k = W_k (1 - \alpha_k); \\ \nu_k E_k = \beta_{kn} E_k + \gamma_{kn} W_k \text{ при } n = k \pm 1; \\ \nu_i E_i = \beta_{ji} E_j \text{ где } j = i - 1 \text{ при } i > k + 1; j = i + 1 \text{ при } i < k - 1. \end{cases} \quad (2.34)$$

Система уравнений (2.34) решается методом последовательной подстановки.

Исследование фактического распределения звуковой энергии между связанными помещениями и оценка соответствия ему расчета на основе диффузного метода.

Исследование фактического распределения энергии между помещениями и оценка соответствия ему расчетов диффузным методом произведена на примере двух помещений. Система уравнений для двух помещений с прямой и обратной акустическими связями для плотности отраженной звуковой энергии имеет вид

$$\begin{cases} \nu_1 \varepsilon_1 - \beta_{12} \varepsilon_2 = W_1 (1 - \alpha_1); \\ \nu_2 \varepsilon_2 - \beta_{21} \varepsilon_1 = 0. \end{cases} \quad (2.35)$$

Коэффициенты потерь ν_1 и ν_2 при записи уравнений в виде (2.35) находятся по выражению

$$\nu_i = c \alpha_i S_i / 4, \quad (2.36)$$

а коэффициенты связи рассчитываются как

$$\beta_{12} = \beta_{21} = \sum_{k=1}^{k=k} S_k \tau_k c / 4, \quad (2.37)$$

где k - количество элементов с разной звукоизоляцией в ограждении между помещениями i и j ; τ_k - коэффициент звукопроницаемости k -го элемента ограждения (перегородки, двери).

При исследовании помещений с открытым проемом площадью A передачей звука через звукоизолирующие ограждения можно пренебречь и коэффициент связи будет равен

$$\beta_{12} = \beta_{21} = cA / 4. \quad (2.38)$$

Для анализа решение системы уравнений производится итерационным способом. За шаг итерации принимается процесс возвращения энергии из соседнего помещения. Плотность энергии в первом помещении определяется как

$$\varepsilon_1 = \frac{4W_1(1-\alpha_1)}{\alpha_1 S_1 c} \left[1 + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{A^2}{\alpha_1 S_1 \alpha_2 S_2} \right)^i \right]. \quad (2.39)$$

Точное решение уравнений (2.35) дает

$$\varepsilon_1 = \frac{4W_1(1-\alpha_1)}{\alpha_1 S_1 c \left(1 - \frac{A^2}{\alpha_1 S_1 \alpha_2 S_2} \right)}; \quad (2.40)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{A}{\alpha_2 S_2} \varepsilon_1 = \frac{4AW_1(1-\alpha_1)}{c(\alpha_1 S_1 \alpha_2 S_2 - A^2)} \quad (2.41)$$

Пример 3. Для количественной оценки результатов расчетов по формулам (2.39) - (2.41) произведен численный расчет шума в двух связанных помещениях (рисунок 2.6).

Параметры каждого из помещений: высота $h=4$ м; площадь ограждений $S_1 = S_2 = 168 \text{ м}^2$; средние коэффициенты звукопоглощения $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.26$; акустическая мощность источника шума $L_w = 100$ дБ; площадь открытого проема $A = 2 \cdot 4 = 8 \text{ м}^2$.



Рисунок 2.6 - Схема двух акустически связанных помещений для примера 3

Плотности звуковой энергии и уровни звукового давления в помещениях согласно (2.40) и (2.41) равны

$$\varepsilon_1 = \frac{4 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{0,1 \cdot 100} (1 - 0.26)}{0.26 \cdot 168 \cdot 340 (1 - 0.26 \cdot 168 \cdot 0.26 \cdot 169)} = 0.206 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/м}^3$$

$$L_1 = 10 \lg \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} \right) = 10 \lg \left(\frac{0.206 \cdot 10^{-5} \cdot 340}{10^{-12}} \right) = 88.45 \text{ дБ};$$

$$\varepsilon_2 = \frac{8}{0.26 \cdot 168} \cdot 0.206 \cdot 10^{-5} = 0.038 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/м}^3$$

$$L_2 = 10 \lg \left(\frac{0.038 \cdot 10^{-5} \cdot 340}{10^{-12}} \right) = 81.11 \text{ дБ}.$$

Произведена оценка скорости схождения ряда в (2.39). Сравнение выражений (2.39) и (2.40) позволяет записать

$$1 + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{A^2}{\alpha_1 S_1 \alpha_2 S_2} \right)^i = \frac{1}{1 - \frac{A^2}{\alpha_1 S_1 \alpha_2 S_2}}. \quad (2.42)$$

Выполнен численный анализ ряда в (2.42)

$$1 + 0,03354 + 0,00113 + 0,00004 \dots = 1,0347.$$

Таким образом, в подавляющем большинстве случаев можно пренебречь звуковой энергией, возвращающейся из второго «тихого» помещения в первое с источником шума, то есть можно принимать

$$\varepsilon_1 = 4W_1(1 - \alpha_1) / \alpha_1 S_1 c. \quad (2.43)$$

Погрешность такого упрощения для рассмотренного примера составляет

$$\Delta L = 10 \lg \left(\frac{1}{1 - \frac{A^2}{\alpha_1 S_1 \alpha_2 S_2}} \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{1 - \frac{8^2}{0.26 \cdot 168 \cdot 0.26 \cdot 168}} \right) = 0.15 \text{ дБ}.$$

Использование упрощенного выражения (2.43) вместо (2.40) может быть оправданным для оценки энергетических параметров акустических полей связанных помещений. Оно позволяет временно исключить из анализа мало значимую величину обратной связи.

Для получения точного решения для рассмотренного примера произведены расчеты уровней звукового давления с использованием интегрального уравнения Куттруфа [102]. Результаты расчетов приведены на рисунке 2.7.

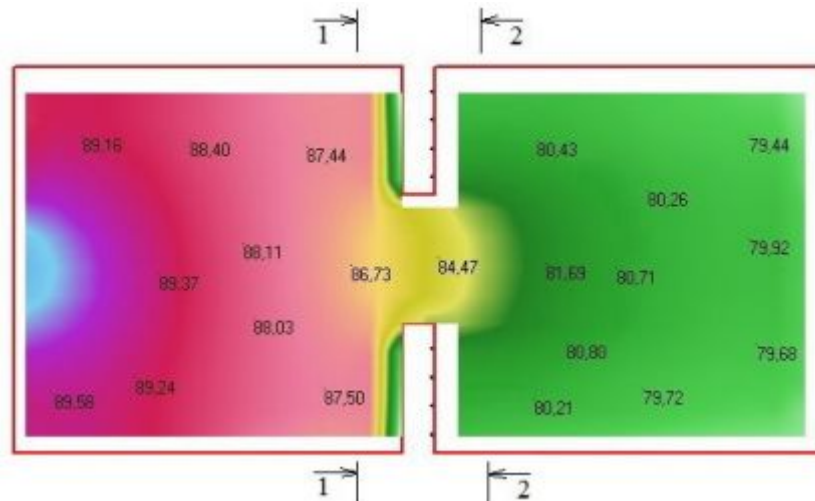


Рисунок 2.7 - Шумовая карта в связанных помещениях на высоте 2 м от пола

Полученное при расчете среднее значение отраженной энергии в первом помещении с источником шума $L_1 = 88.4$ дБ хорошо согласуется с расчетом по методу диффузного поля $L_1 = 88.45$ дБ. В помещении №2 без источника шума расхождение в значениях средних уровней больше. При $L_2 = 80.3$ дБ – по интегральному уравнению и $L_2 = 81.11$ дБ – по (2.41) оно равно 0.7 дБ.

В первом помещении максимальный уровень составляет $L_{1\max} = 90.8$ дБ. Минимальный уровень равен $L_{1\min} = 86.3$ дБ рядом с проемом в перегородке на высоте 3.5 м от уровня пола. Во втором помещении $L_{2\max} = 83.2$ дБ, рядом с проемом, $L_{2\min} = 79.7$ дБ. Перепады уровней отраженного звука составляют, соответственно, $\Delta L_1 = 90.8 - 86.3 = 4.5$ дБ и $\Delta L_2 = 83.2 - 79.7 = 3.5$ дБ. Как видно, для шумовых полей в соразмерных помещениях этот перепад весьма существен. В месте проема в перегородке звуковое поле не диффузно. В плоскости перед проемом со стороны помещения 1 наблюдается «провал» энергии по сравнению с ближайшими участками помещения на $\Delta L = 1$ дБ (см. рисунок 2.8). Снижение уровня шума объясняется снижением интенсивности звуковой энергии, возвращающейся из помещения 2 в помещение 1.

В помещении 2 за перегородкой (см. рисунок 2.9), наоборот, наблюдается локальное повышение уровня звуковой энергии по сравнению с остальными зонами помещения за счет поступления энергии из помещения 1 с источником звука.

Проверка согласованности результатов расчета локальной энергетической аномалии выполнена при анализе градиентов плотности потоков звуковой энергии и интенсивности звука в месте проема.

Из карты на рисунке 2.10 видно, что во втором помещении распределение энергии значительно равномернее. Минимальный перепад энергии у дальней от источника шума стены помещения 2 (градиент $= 0,71 \cdot 10^{-5} / 340$ Дж/м⁴). Это объясняется отражениями от стены прямого звука. Наибольший градиент плотности энергии наблюдается в зоне максимальных отражений прямого звука в области расположения источника шума. В области проема в перегородке наблюдается рост неравномерности плотности энергии из-за большой разности прихода энергии с различных направлений.

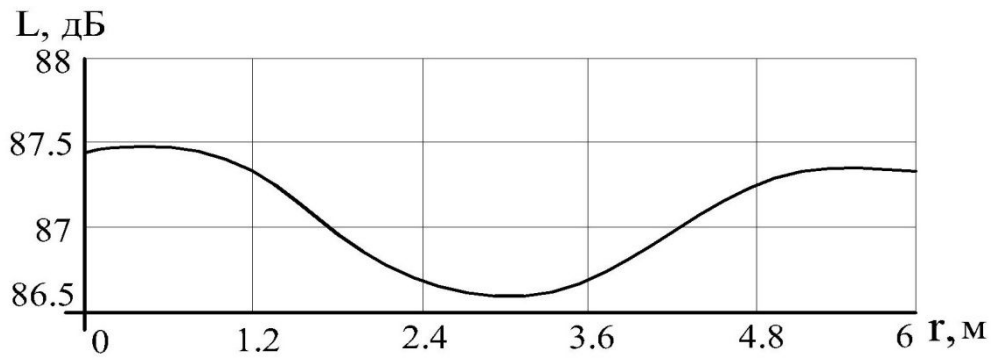


Рисунок 2.8 - График изменения уровня шума перед перегородкой с проемом (см. сечение 1-1 на рисунке 2.7)

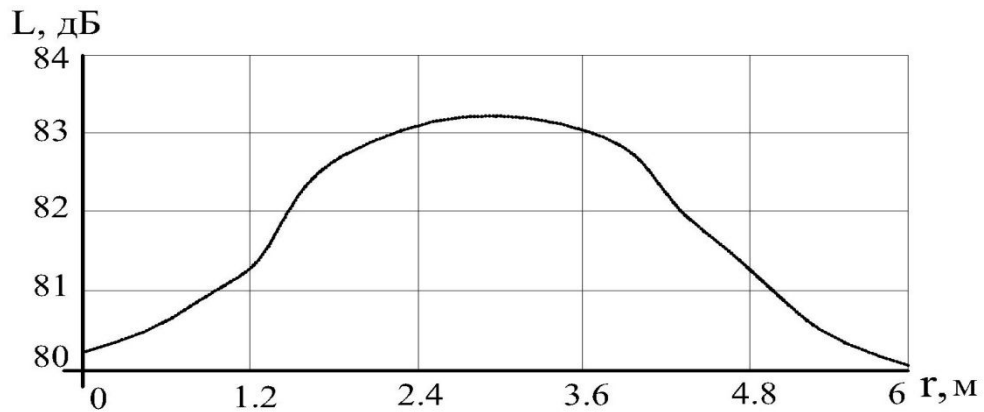


Рисунок 2.9 - График изменения уровня шума за перегородкой с проемом (см. сечение 2-2 на рисунке 2.7)

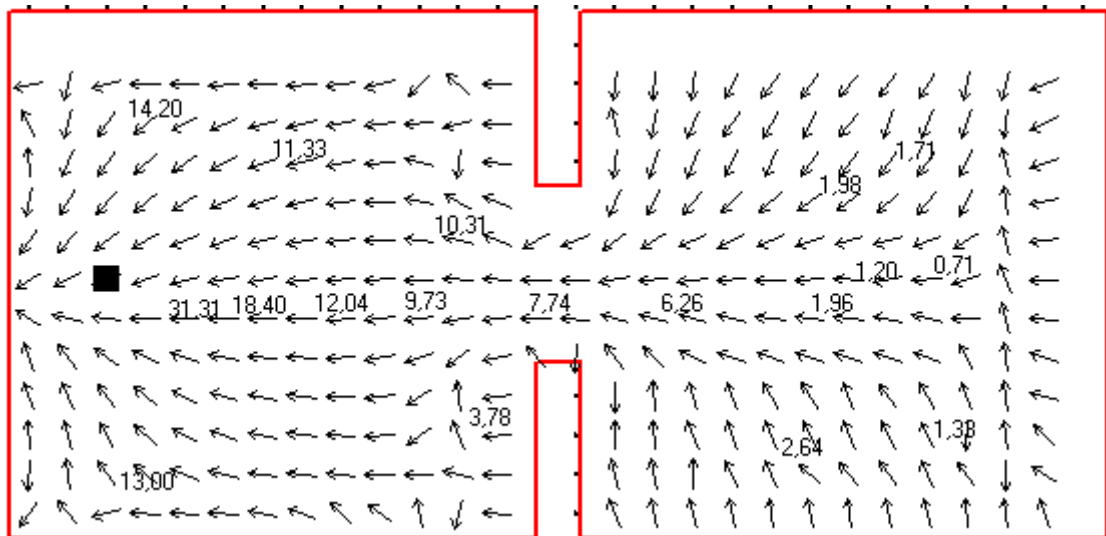


Рисунок 2.10 - Карта градиентов плотности звуковой энергии (Дж/м^4 , значения увеличены на $340 \cdot 10^5$)

В целом результаты выполненного исследования показывают, что формируемое звуковое поле в связанных помещениях не в полной мере диффузно из-за наличия открытых проемов. В тоже время для практических расчетов

величина погрешности, возникающая из-за неучета нарушения диффузности, является несущественной и ей можно пренебречь при использовании предложенного статистического метода. В помещениях с закрытыми дверными проемами эта погрешность будет еще менее существенной.

Исследование влияния прямого звука, проникающего через открытый проем, на шум в помещении без источника.

Для рассмотренного выше примера в помещении 1 наблюдается хорошее совпадение в результатах расчетов среднего уровня шума по методу диффузного поля и с использованием интегрального уравнения. Во втором помещении расхождение близко к 1 дБ. В рассмотренном примере принималось, что вся излученная источником звука энергия поступает в первое помещение и формирует в нем отраженное звуковое поле.

При наличии открытого проема и нахождения источника шума в определенной зоне помещения часть прямой энергии может поступать непосредственно в смежное помещение и после отражения от ограждения участвовать в создании отраженного звукового поля этого помещения (см. рисунок 2.11).

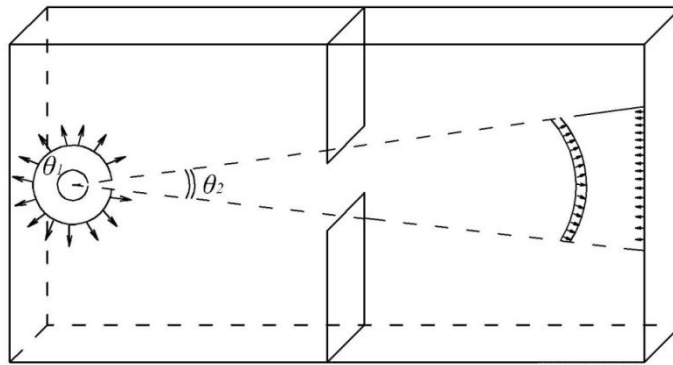


Рисунок 2.11 - Схема к расчету распределения первого отражения

На рисунке 2.11 показаны пространственные углы θ_1, θ_2 излучения источником прямого звука для 1 и 2 помещения соответственно. С учетом перераспределения поступающей от источника шума энергии система уравнений (2.35) примет вид

$$\begin{cases} \frac{\alpha_1 c S_1}{4} \varepsilon_1 - \frac{Ac}{4} \varepsilon_2 = \frac{\theta_1}{4\pi} W(1 - \alpha_1), \\ -\frac{Ac}{4} \varepsilon_1 + \frac{\alpha_2 c S_2}{4} \varepsilon_2 = \frac{\theta_2}{4\pi} W(1 - \alpha_2). \end{cases} \quad (2.44)$$

Его решение представляется как

$$\varepsilon_1 = \frac{\frac{\theta_1}{4\pi} W(1-\alpha_1) + \frac{A}{\alpha_2 S_2} \cdot \frac{\theta_2}{4\pi} W(1-\alpha_2)}{\frac{\alpha_1 c S_1}{4} \left(1 - \frac{A^2}{\alpha_1 S_1 \alpha_2 S_2} \right)}, \quad (2.45)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{A}{\alpha_2 S_2} \varepsilon_1 + \frac{4}{\alpha_2 c S_2} \cdot \frac{\theta_2}{4\pi} W(1-\alpha_1). \quad (2.46)$$

Сравнение решений (2.40), (2.41) и (2.45), (2.46) позволяет установить влияние перераспределения вводимой от источника шума энергии между помещениями. Для упрощения выражений с целью исключения малозначимых факторов выполнен численный анализ компонентов решений (2.45) и (2.46).

Множитель $\frac{\theta_2}{4\pi}$ вычислен по приближенной формуле как $\theta_2 / 4\pi \approx A / 4\pi r^2 = 8 / 4\pi \cdot 5.2^2 = 0.024$. Тогда $\theta_1 / 4\pi \approx 1 - 0.024 = 0.976$

Величина ε_1 определена с учетом значения плотности энергии в первом помещении $0.206 \cdot 10^{-5}$ Дж/м³, полученного ранее при $\alpha_1 = \alpha_2$ $\varepsilon_1 = 0.206 \cdot 10^{-5} (0.976 + 8 \cdot 0.024 / 0.26 \cdot 168) = 0.202 \cdot 10^{-5}$ Дж/м³. Уровень звука в первом помещении равен $L_1 = 10 \lg (0.202 \cdot 10^{-5} \cdot 340 / 10^{-12}) = 88.37$ дБ.

Значение L_1 лишь на 0.08 дБ меньше значения уровня, определенного по формуле (2.40), в котором не учитывается перераспределение прямой энергии между помещениями. Значение уровня L_1 также хорошо согласуется с результатом расчета отраженной звуковой энергии интегральным уравнением - $L_1 = 88.4$ дБ.

Аналогично вычислено значение ε_2

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \frac{8}{0.26 \cdot 168} \cdot 0.202 \cdot 10^{-5} + \frac{4 \cdot 0.024 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{10}}{0.26 \cdot 168 \cdot 340} (1 - 0.26) = (0.037 + 0.0048) 10^{-5} = \\ &= 0.042 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/м}^3 \\ L_2 &= 10 \lg \left(\frac{0.042 \cdot 10^{-5} \cdot 340}{10^{-12}} \right) = 81.55 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Увеличение среднего уровня отраженной энергии в помещении составляет $\Delta L_2 = 81.55 - 81.11 = 0.45$ дБ. В тоже время расхождение между результатами расчета по методу диффузного поля и интегральному уравнению возрастает до $\Delta L_2 = 81.55 - 80.3 = 1.25$ дБ. Уточнение методики расчета привело к повышению уровня звука в «тихом» помещении и соответственно показало погрешность метода диффузного поля, когда не разделяются прямая и отраженная энергии.

Исследование потока звуковой энергии и коэффициента связи между помещениями.

Установлено, что вблизи проема в перегородке, соединяющего два помещения, происходит резкое снижение диффузности звукового поля. Интенсивность ухода энергии из помещения 1 с источником шума значительно превышает интенсивность возвращающегося звука из помещения 2 (см. рисунок 2.12).

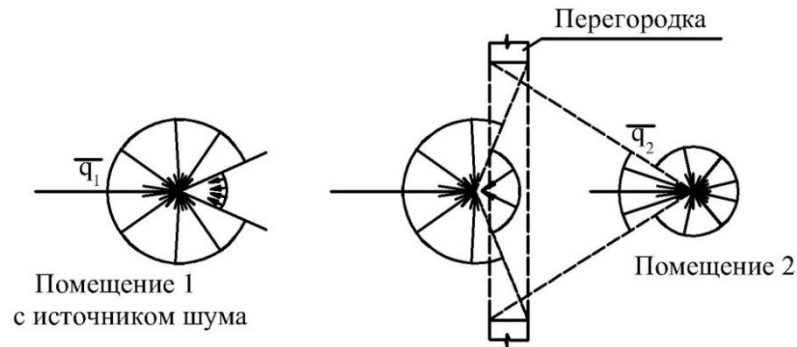


Рисунок 2.12 - Принципиальная схема пространственного распределения потоков энергии вблизи проема, соединяющего помещения 1 и 2

Методом диффузного поля для примера 3 вычислены значения интенсивности звуковой энергии, поступающей:

из первого помещения во второе

$$I_1 = \frac{\varepsilon_1 c}{4} = \frac{\varepsilon_0 \cdot 10^{0.1 L_1} c}{4} = \frac{10^{-12} \cdot 10^{0.188,45}}{4} = 17.5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2;$$

из второго помещения в первое

$$I_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot 10^{0.1 L_2} c}{4} = \frac{10^{-12} \cdot 10^{0.181,55}}{4} = 3.57 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2;$$

где $\varepsilon_0 = 10^{-12} / c$ - пороговое значение плотности звуковой энергии, Дж/м³.

Тогда плотность потока звуковой энергии в проеме равна

$$q = I_1 - I_2 = (17.5 - 3.57) \cdot 10^{-5} = 13.9 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2.$$

Величина плотности потока энергии вблизи ограждения помещений, связанная с поглощением звуковой энергии ограждениями, равна интенсивности поглощенной энергии и составляет

- в первом помещении

$$q_1 = I_{\text{погл1}} = \frac{\varepsilon_1 c \alpha_1}{4(1 - 0.5 \alpha_1)} = \frac{I_1 \alpha_1}{1 - 0.5 \alpha_1} = 17.5 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0.26}{1 - 0.5 \cdot 0.26} = 5.23 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2;$$

- во втором помещении

$$q_2 = I_{\text{пол 2}} = \frac{I_2 \cdot \alpha_2}{(1 - 0.5\alpha_2)} = 3.57 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0.26}{1 - 0.5 \cdot 0.26} = 1.07 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2.$$

Полученная при компьютерном моделировании на основе интегрального уравнения карта векторов плотности потоков звуковой энергии приведена на рисунке 2.13

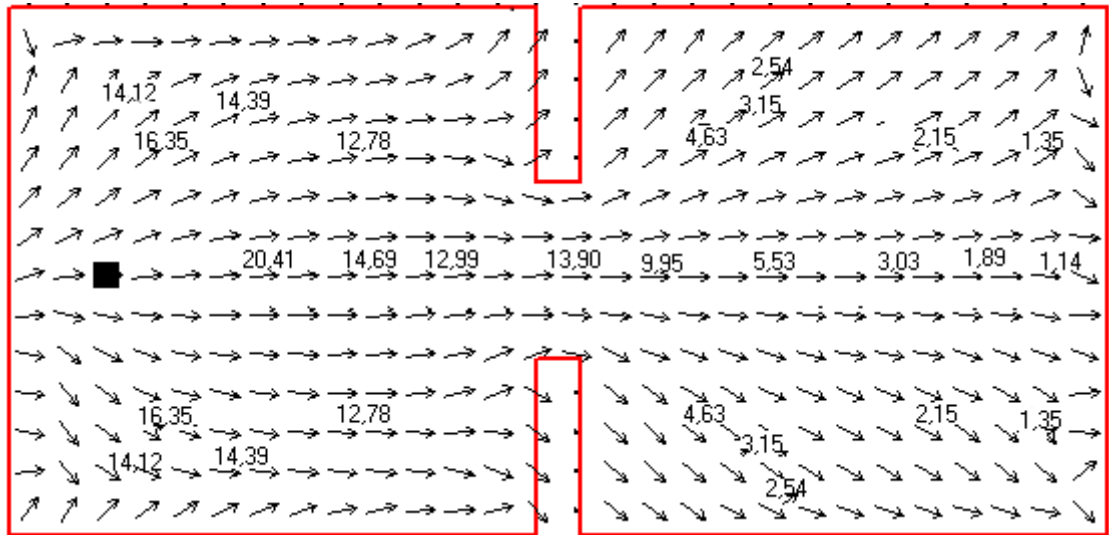


Рисунок 2.13 - Карта плотности потоков звуковой энергии (значения в Вт/м² увеличены в 10⁵ раз).

Результаты моделирования q показывают, что плотность потока энергии через проем $q_1 = 13.90 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² совпадает со значением, рассчитанным по методу диффузного поля. В тоже время на большинстве участков первого помещения плотность потоков энергии вблизи ограждений, за исключением зоны перед перегородкой, наиболее удаленной от источника шума, значительно больше среднего значения, полученного методом диффузного поля $q = 5.23 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². Такая же закономерность наблюдается и во втором помещении.

Для расчета распределения энергии между акустически связанными помещениями по методу диффузного поля и другими статистическими методами важно знать точное значение энергии, передающейся через проем, то есть величину коэффициента связи. Для смежного помещения проем можно рассматривать как источник шума с акустической мощностью $W_2 = \beta_{21} \varepsilon_1$, величина которого зависит от коэффициента связи $\beta_{21} = cA/4$.

С помощью компьютерного моделирования звукового поля на основе интегрального уравнения Куттруфа выполнен анализ процессов передачи звуковой

Для определения коэффициента k можно воспользоваться соотношением

$$\beta_{12} \cdot \varepsilon_2 = I_2 A$$

Тогда в данном случае k будет равен

$$k = cA\varepsilon_2 / I_{cp2} = (340 \cdot 0.042 \cdot 10^{-5}) / (0.5(2.0 + 1.9)10^{-5}) = 7.3$$

и коэффициент обратной связи определится как

$$\beta_{12} = cA / 7.3. \quad (2.47)$$

Величина коэффициента k индивидуальна для каждой системы помещений и, следовательно, ее необходимо определять в каждом конкретном случае. Для практических случаев, учитывая малое значение обратной акустической связи (см. 2.42), вместо (2.47) без снижения точности расчетов можно использовать выражение (2.38).

Изменения среднего коэффициента звукопоглощения помещений за счет открытого проема.

Как видно, через открытый проем уходит больше звуковой энергии, чем возвращается. Проем, следовательно, можно рассматривать как площадь стока энергии с условным коэффициентом звукопоглощения α_{np} .

При расчете α_{np} можно использовать значения для интенсивностей:

- падающей на проем

$$I_{nad} = I_1 = \frac{\varepsilon_1 c}{4} = \frac{W(1-\alpha_1)}{\alpha_1 S_1},$$

- возвращающейся через проем

$$I_{omp} = I_2 = \frac{WA(1-\alpha_1)}{\alpha_1 S_1 \alpha_2 S_2}$$

Тогда условно поглощенная энергия равна

$$I_{ногл} = I_{nad} - I_{omp} = \frac{W(1-\alpha_1)}{\alpha_1 S_1} \left(1 - \frac{A}{\alpha_2 S_2} \right),$$

Если принять $I_{ногл} = I_{nad} \cdot \alpha_{np} = \alpha_{np} \cdot (W(1-\alpha_1) / \alpha_1 S_1)$ - условный коэффициент α_{np} будет определяться как

$$\alpha_{np} = 1 - \frac{A}{\alpha_2 S_2} \quad (2.48)$$

Для рассмотренного примера 3 при исходных средних коэффициентах звукопоглощения $\alpha = 0.26$ α_{np} равен

$$\alpha_{np} = 1 - \frac{8}{0.26 \cdot 168} = 0.82$$

и, соответственно, средний коэффициент звукопоглощения помещения 1 найдется как

$$\alpha_1 = 0.23 + \frac{8(0.82 - 0.23)}{168} = 0.287.$$

Эту величину в данном случае следует использовать в расчетах.

2.4 Исследование шумового режима в квартирах как в системах акустически связанных помещений на основе статистического метода расчета шума

Рассмотренный статистический метод расчета уровней звукового давления в зданиях с ячейковой и анфиладной системами планировки дает возможность исследовать влияние различных факторов на распределение звуковой энергии в квартирах. Метод позволяет выполнять на стадии проектирования количественную и качественную оценку шумовых полей квартиры, производить ее зонирование по степени шумности помещений и разрабатывать на этой основе планировку квартир с позиций ограничения распространения шума в них.

Ниже рассмотрены две основные задачи, которые можно решать на основе статистического метода применительно к ячейковым системам планировки с соразмерными акустически связанными объемами.

Исследование влияния времени реверберации на шумовой режим квартир.

Возможность исследований процессов формирования нестационарных звуковых полей в квартирах имеет большое практическое значение. На основе обработки получаемых реверберационных графиков можно определять звукопоглощающие характеристики в помещениях квартиры и оценивать влияние звукопоглощения на снижение в них шума.

Построение реверберационных графиков и определение изменения звуковой энергии во времени возможно путем численного решения уравнения (2.4) с использованием разработанной компьютерной программы [67].

Ниже, в качестве оценки возможностей предложенного метода, приведены результаты расчета шума в трехкомнатной квартире, схема которой дана на рисунке 2.15. Квартира состоит из 8 помещений, разделенных кирпичными перегородками со звукоизоляцией 48 дБ. Звукоизоляция дверных заполнений 10 дБ. Источник шума с мощностью 90 дБ располагается в комнате 1. Параметры помещений квартиры даны в таблице 2.7. В ней приведены полученные при расчетах уровни шума в помещениях квартиры при всех закрытых и открытых дверях.

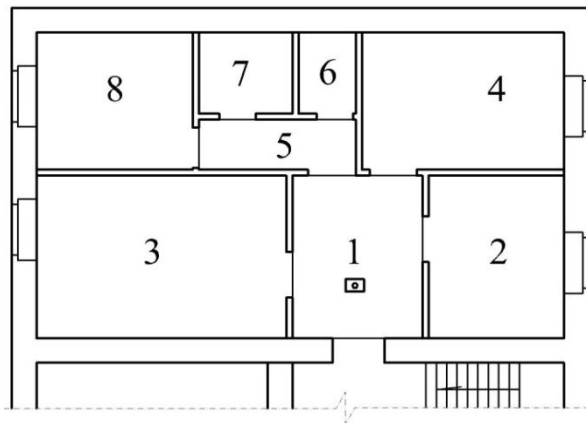


Рисунок 2.15 - Схема квартиры к расчету: - положение источника шума

Таблица 2.7 - Параметры помещений квартиры и рассчитанные в них уровни шума

№ пом.	Площадь ограждений, $S_i \text{ м}^2$	Объем, $V_i \text{ м}^3$	Средний коэффициент звукопоглощения α_i	Уровни шума, дБ	
				при закрытых дверях	при открытых дверях
1	56.8	28.5	0.2	84.8	82.5
2	63.6	34.2	0.1	69.6	76.4
3	89.4	55.9	0.3	63.3	70.9
4	83.6	50.8	0.3	63.6	71.2
5	52.2	12.6	0.2	68.9	74.0
6	28.0	9.6	0.05	60.8	72.4
7	44.0	19.2	0.05	60.6	72.4
8	63.8	34.6	0.3	49.0	64.1

На рисунках 2.16 и 2.17 приведены графики процессов нарастания и затухания звуковой энергии, рассчитанные для всех помещений квартиры после включения и отключения источника шума для случая, когда все двери открыты.

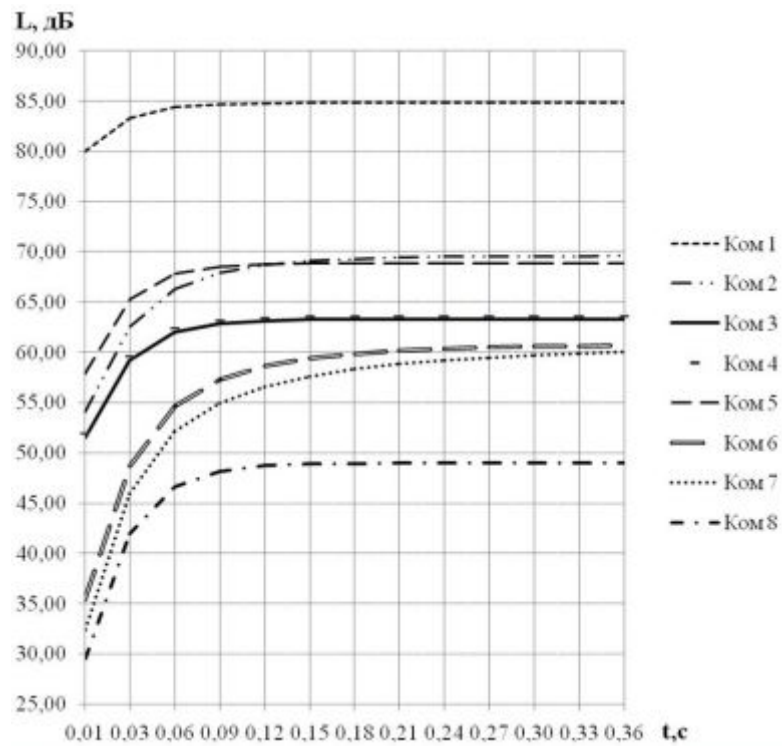


Рисунок 2.16 - Процесс нарастания звуковой энергии в помещениях квартиры как системе акустически связанных объемов.

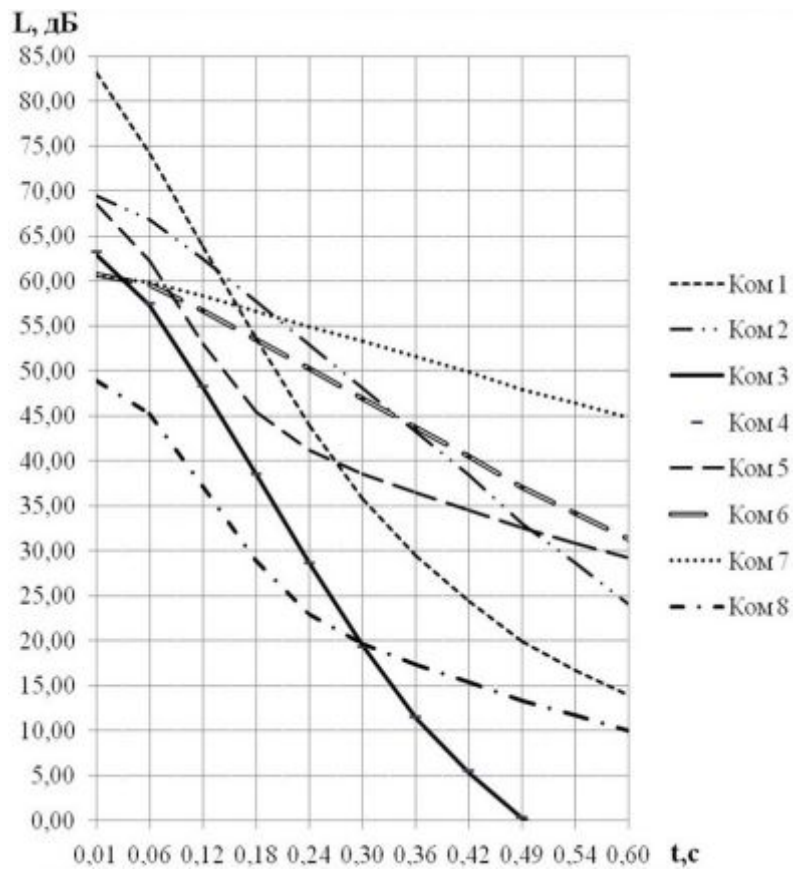


Рисунок 2.17 - Процессы реверберации звука в помещениях квартиры как в системе акустически связанных объемов

В таблице 2.8 приведены значения времени реверберации помещений, рассчитанные на основе системы уравнений (2.4) как для связанных помещений, и значения времени реверберации, рассчитанные по известной формуле Эйринга [58] как для изолированных одиночных помещений. Видно, что рассчитанное двумя способами время реверберации совпадает только в помещениях 2, 6 и 7, имеющих низкие коэффициенты звукопоглощения ограждений. В остальных помещениях наличие акустической связи значительно увеличивает время реверберации. На заключительных стадиях реверберации графики затухания звуковой энергии становятся более пологими, это объясняется процессом перераспределения энергии между помещениями. Звуковая энергия из помещений с более низкими коэффициентами звукопоглощения и, соответственно, с более низкой скоростью затухания звука передается в акустически связанные с ними помещения, имеющие более высокую скорость затухания звука.

Таблица 2.8 - Время реверберации в помещениях квартиры

№ помещения	Время реверберации, с	
	расчет по формуле Эйринга	расчет для системы акустически связанных помещений
1	0.35	0.53
2	0.75	0.76
3	0.29	0.51
4	0.28	0.51
5	0.23	0.95
6	1.09	1.15
7	2.10	2.15
8	0.26	0.90

В целом результаты расчетов показывают, что акустическая связь между помещениями существенно влияет на распределения звуковой энергии между ними как при стационарном, так и нестационарном шумовых режимах в квартире. В этом случае для расчета характеристик шумового режима и разработки мероприятий по его улучшению в квартирах с ячейковыми планировками можно с достаточной надежностью использовать предложенный статистический метод расчета шума. Он позволяет более объективно учитывать конкретные процессы формирования звуковых полей в отдельных помещениях и влияние акустических связей на перераспределение звуковой энергии между ними.

Метод позволяет оценивать изменение процессов реверберации во всех помещениях квартиры при изменении звукопоглощающих характеристик в отдельных ее помещениях и тем самым целенаправленно регулировать шумовой режим квартир за счет применения звукопоглощающих конструкций.

Оценка влияния звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций на шумовой режим квартир.

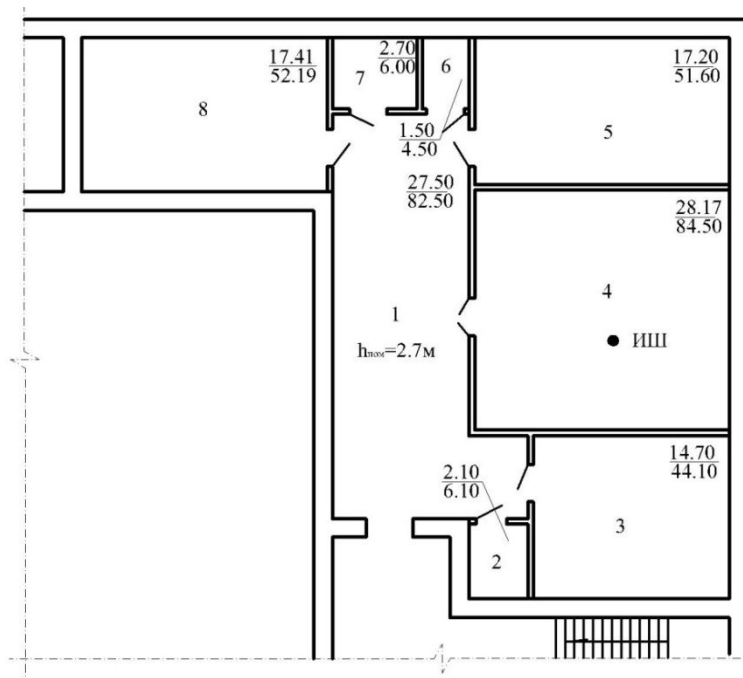
Звуковая энергия в квартире как системе акустически связанных объемов перетекает между помещениями через открытые проемы, а также через перегородки и двери. Таким образом, при отсутствии открытых проемов звукоизоляция перегородок и дверей является наиболее важным фактором, влияющим на шумовой режим квартиры. Однако, это влияние практически не учитывается при разработке объемно-планировочных решений квартир и проектировании внутриквартирных ограждающих конструкций (перегородок и дверей). Звукоизоляция внутриквартирных перегородок без дверей назначается на основании нормативных требований СП 51.13330.2011 «Защита от шума. Актуализированная версия СНиП 23-03-2003» [77], принятых без достаточных обоснований более 50 лет назад [73]. Согласно [77] нормативная величина звукоизоляции межкомнатных перегородок без дверей составляет $R_w=43\text{дБ}$. Звукоизоляция дверей и перегородок с дверьми не нормируется.

Как известно [9], шумовой режим в защищаемых от шума помещениях формируется с учетом звукоизолирующей способности всех элементов ограждений, располагаемых на путях распространения звуковой энергии от помещения с источником шума. Так как звукоизоляция дверей существенно ниже звукоизоляции перегородок, во многих случаях шумовой режим в помещениях в основном определяется звукоизоляцией дверей, находящихся на пути распространения шума в помещения. Поэтому при проектировании квартир необходимо обоснованно назначать расположение дверей не только исходя из функциональных требований, но и с учетом защиты от шума, а также назначать их звукоизоляцию с учетом уровня мощности источника шума, места его расположения и звукоизоляции других ограждений, находящихся на путях распространения от источника до защищаемого помещения.

Для определения рационального расположения дверей и требуемой величины их звукоизоляции необходимо иметь метод расчета, позволяющий оценить распределение звуковой энергии в квартирах, учитывая звукоизоляцию дверей и перегородок. Таким условиям отвечает рассмотренный выше статистический метод расчета уровней шума в квартирах с ячейковыми системами планировки и предложенная для его реализации компьютерная программа [68].

Методика оценки звукоизоляции перегородок и дверей на шумовой режим квартир показана на примере для типовой квартиры. Целью исследований являлось установление требуемой величины звукоизоляции дверей и перегородок для определенного шумового режима квартиры.

Исследования выполнены для трехкомнатной квартиры, схема которой показана на рисунке 2.18. Рассматривалась ситуация, когда источник шума располагался в комнате 4. Уровень звуковой мощности источника в исследуемой полосе частот составляет $L_W=80$ дБ. Звукопоглощение ограждений во всех помещениях квартиры было одинаковым. Средний коэффициент звукопоглощения поверхностей равен $\alpha_{cp}=0.10$.



Рисунке 2.18 - Схема исследуемой типовой квартиры: ● - ИШ- источник шума; $S_{пом}/V_{пом}$ – площадь (числитель) и объем (знаменатель) помещения

Расчеты производились для случаев изменения звукоизоляции перегородок от 30 до 49 дБ. Звукоизоляция дверей изменялась от 0 (открытые двери) до 25 дБ.

На рисунках 2.19 и 2.20 приведены результаты расчетов уровней звукового давления в помещениях 3 и 5, полученные при указанных выше изменениях звукоизоляции перегородок $R_{пр}$ и дверей $R_{дв}$.

Анализ приведенных на рисунках 2.19 и 2.20 графиков показывает следующее.

Уровень звукового давления в помещениях 3 и 5 при открытых дверях ($R_{дв}=0$ дБ) практически не зависит от величины звукоизоляции перегородок. Аналогичная ситуация наблюдается и при малой звукоизоляции дверей ($R_{дв}=5$ дБ).

При звукоизоляции дверей $R_{дв}=10$ дБ рост звукоизоляции перегородок в диапазоне от 30 до 41 дБ оказывает влияние на уровни звукового давления в помещениях 3 и 5. При этом с увеличением $R_{пр}$ это влияние уменьшается.

Рост звукоизоляции дверей более 20 дБ практически не влияет на уровни звукового давления в помещениях 3 и 5. Дальнейшее снижение уровней в исследованном диапазоне звукоизоляции перегородок определяется только ростом $R_{пр}$.

Таким образом, в рассмотренном случае установлено, что для обеспечения в помещениях 3 и 5 уровней звукового давления не более 40 дБ при работающем источнике шума с $L_w=80$ дБ необходимо иметь звукоизоляцию дверей не менее $R_{дв}=20$ дБ. При этом звукоизоляция перегородок не должна быть ниже 38 дБ.

В случае, если звукоизоляция дверей меньше 20 дБ обеспечить уровни звукового давления 40 дБ и ниже не представляется возможным при звукоизоляции перегородок менее 38 дБ.

При звукоизоляции дверей $R_{дв}=10$ дБ, что соответствует дверям, имеющим вентиляционный зазор между полотном двери и полом, требуемый уровень в 40 дБ обеспечить в принципе не возможно, так как в этом случае звукоизоляции перегородок выше 45 дБ практически не приводит к снижению уровней в помещениях 3 и 5. Уровень звукового давления в них в основном определяется звуковой энергией, пришедшей через двери.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что предложенный метод расчета может эффективно использоваться при совместном подборе звукоизоляции всех внутренних ограждающих конструкций исходя из обеспечения

требований к шумовому режиму квартиры при действии в них источников с заданной звуковой мощностью.

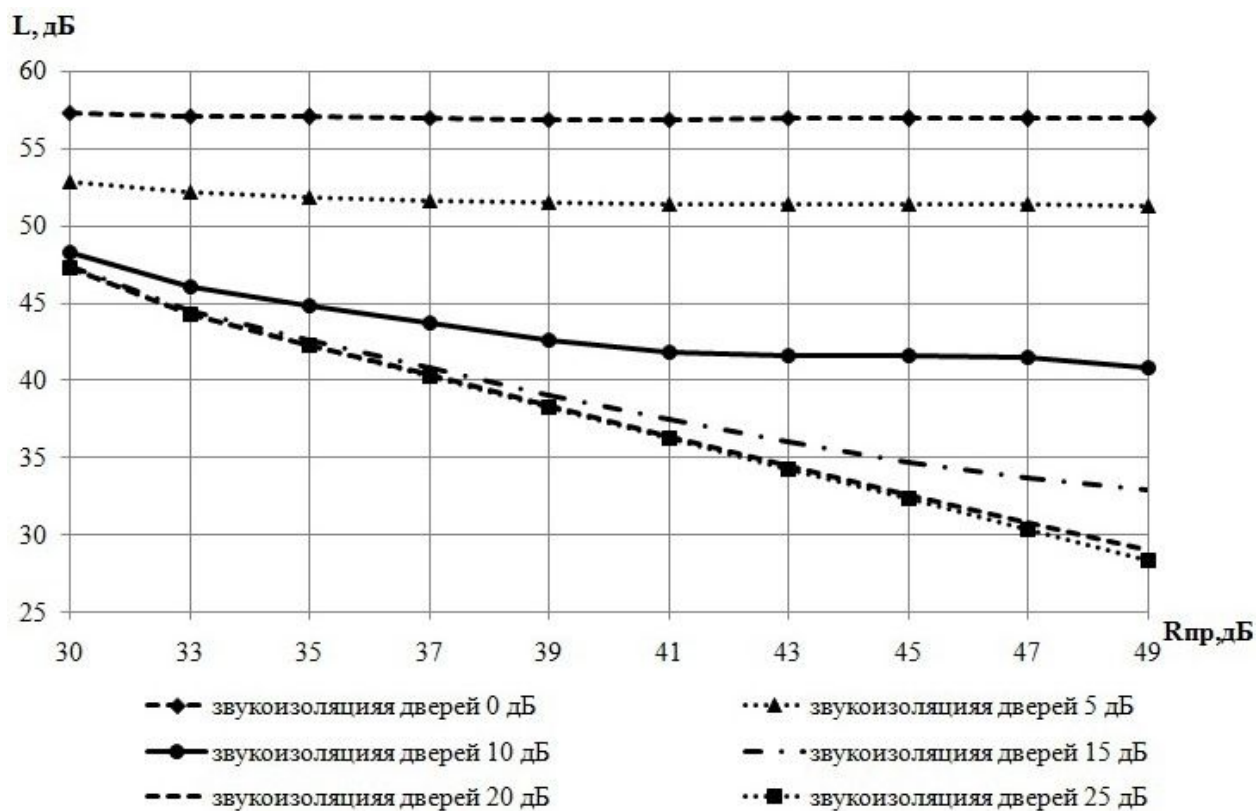


Рисунок 2.19 - Результаты расчетов уровней в 3 помещении

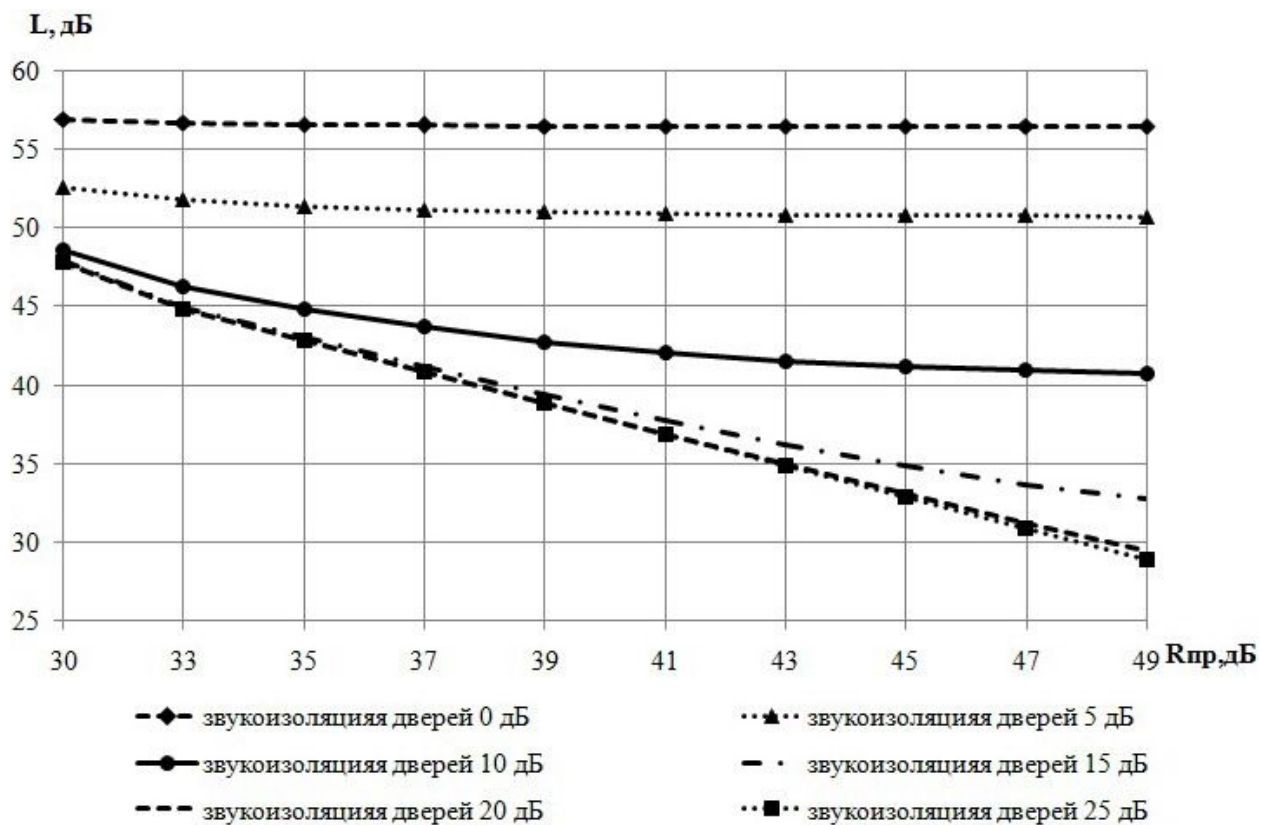


Рисунок 2.20- Результаты расчетов уровней в 5 помещении

2.5 Оценка влияния звукопоглощения и звукоизоляции дверей на шумовой режим в анфиладных системах акустически связанных соразмерных помещений

В анфиладных системах помещений передача звуковой энергии зависит от вида акустических связей между объемами и звукопоглощающих характеристик помещений. Акустическая связь может быть в виде открытых проемов или дверных проемов с невысокой звукоизоляцией дверных заполнений. В этом случае акустическая эффективность звукопоглощения зависит от вида связей между помещениями и от взаимного расположения источника и звукопоглощающих облицовок. Анализ акустической эффективности звукопоглощающих облицовок в этой ситуации можно выполнить путем сравнения результатов решения системы уравнений (2.5) при различных местах расположения источников шума и звукопоглощающих облицовок и при разных видах связи между помещениями [13].

Ниже приведено исследование влияния звукопоглощающих облицовок потолка на распределение звуковой энергии в анфиладной системе из последовательно связанных помещений. Для повышения наглядности и уменьшения числа других влияющих на результаты расчета факторов рассмотрена цепочка из трех помещений одинаковых размеров $6 \times 4 \times 3(h)$ м, связанных по схеме на рисунке 2.21.

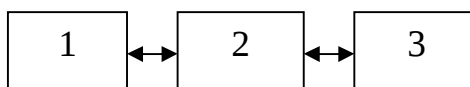


Рисунок 2.21 - Расчетная схема для трёх связанных помещений в прямоугольниках указаны номера комнат

Помещения разделены между собой перегородками площадью 12 м^2 со звукоизоляцией $R_{пр} = 40 \text{ дБ}$. В перегородках имеются двери площадью 2 м^2 . В закрытом состоянии звукоизоляция дверных заполнений равна $R_{дв} = 10 \text{ дБ}$. Средний коэффициент звукопоглощения ограждений помещений равен 0.20. Для дополнительного снижения шума использован звукопоглощающий потолок с

коэффициентом звукопоглощения $\alpha_{\text{ит}} = 0.80$. В системе помещений работает источник звука, имеющий уровень акустической мощности 90 дБ.

При исследовании рассматривались различные варианты взаимного расположения источника звука и звукопоглощающих облицовок. При этом учитывались два вида связей между помещениями: при открытых и закрытых дверях. Результаты расчетов приведены в таблицах 2.9 и 2.10.

Для оценки влияния звукопоглощения на общий уровень зашумленности помещений использован показатель среднего уровня звукового давления в системе k -х помещений, определяемый как

$$L_{cp} = 10 \lg \left(\sum_N V_k 10^{0.1L_k} / \sum_N V_k \right). \quad (2.49)$$

Таблица 2.9 - Результаты расчета уровней звукового давления в системе акустически связанных помещений при открытых дверях

№	Положение в помещениях						Уровень звукового давления в помещении, дБ			Средний уровень звукового давления в системе, дБ	Снижение уровня звукового давления в помещении за счет звукопоглощающих облицовок, дБ			Снижение среднего уровня звукового давления, дБ
	источника шума			звукопоглощающих облицовок										
	1	2	3	1	2	3	1	2	3		1	2	3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	*						81.9	71.0	60.4	77.50				
2		*					71.0	81.6	71.0	77.53				
3			*				60.4	71.0	81.9	77.50				
4	*						79.7	69.0	58.4	75.28	2.2	2	2	2.22
5		*					68.8	81.6	71.0	77.39	2.2	0	0	0.14
6			*				58.1	71.0	81.9	77.48	2.3	0	0	0.02
7	*						81.9	68.8	58.5	77.35	0	2.2	1.9	0.15
8		*					69.2	79.5	69.2	75.46	1.8	2.1	1.8	2.07
9			*				58.5	68.8	81.9	77.35	1.9	2.2	0	0.15
10	*						81.9	71.0	58.1	77.48	0	0	2.3	0.02
11		*					71.0	81.6	68.8	77.39	0	0	2.2	0.14
12			*				58.4	69.0	79.7	75.28	2.0	2	2.2	2.22

* ,  - положения соответственно источника шума и звукопоглощающих облицовок в помещениях системы.

Через открытые двери из помещения происходит отток звуковой энергии в смежные с ним объемы. Это равнозначно наличию в помещении абсолютно

поглощающего звук участка ограждения, равного по площади дверному проему. С учетом открытых дверей средний коэффициент звукопоглощения ограждений помещения №2 с двумя дверями составляет $\alpha_{\text{ср}} = 0.23$, а для остальных помещений с одной дверью соответственно $\alpha_{\text{ср}} = 0.215$.

Таблица 2.10 - Результаты уровней звукового давления в системе акустически связанных помещений при закрытых дверях

№	Положение в помещениях						Уровень звукового давления в помещении, дБ			Средний уровень звукового давления в системе ,дБ	Снижение уровня звукового давления в помещении за счет звукопоглощающих облицовок, дБ			Снижение среднего уровня звукового давления дБ
	источника шума			звукопоглощающих облицовок										
	1	2	3	1	2	3	1	2	3		1	2	3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	*						82.2	61.9	41.6	77.49				
2		*					61.9	82.2	61.9	77.53				
3			*				41.6	61.9	82.2	77.49				
4	*						79.8	59.8	39.5	75.12	2.4	2.1	2.1	2.37
5		*					59.2	82.2	61.9	77.51	2.7	0	0	0.02
6			*				39.2	61.9	82.2	77.49	2.7	0	0	0
7	*						82.2	59.5	39.5	77.47	0	2.1	2.1	0.02
8		*					59.8	79.8	59.8	75.16	2.1	2.4	2.1	2.37
9			*				39.5	59.5	82.2	77.47	2.1	2.4	0	0.02
10	*						82.2	61.9	39.2	77.49	0	0	2.4	0
11		*					61.9	82.2	59.2	77.51	0	0	2.7	0.02
12			*				39.5	59.8	79.8	75.12	2.1	2.1	2.4	2.37

Выполненные расчеты уровней звукового давления в помещениях системы при открытых дверях показали следующее. Наибольшее снижение среднего уровня шума в системе за счет дополнительного звукопоглощения наблюдается в случае, если источник шума находится в помещении со звукопоглощающим потолком. В этом случае в каждом помещении системы произойдет существенное снижение шума (см. строку №4 таблица 2.9). Наименьшее снижение шума наблюдается в том случае, если источник шума и звукопоглощающие конструкции максимально удалены друг от друга (см. строку №6 таблицы 2.9). Наиболее выгодным в рассматриваемой системе является размещение звукопоглощения в среднем помещении №2. В этом случае произойдет снижение шума в максимальном

количестве помещений при расположении источника шума в любом из помещений системы (см. строки 7-9 таблицы 2.9). В квартирах, в частности, к таким помещениям относятся прихожие и коридоры.

Закрытие дверей (см. таблицу 2.10) приводят к незначительному повышению уровней звукового давления в помещениях с источником шума. При этом эффективность звукопоглощения облицовок практически остается прежней, как и при открытых дверях. Рост эффективности звукопоглощения облицовок за счет изменения условий перераспределения звуковой энергии при закрытых дверях составляет всего лишь 0.1-0.3 дБ.

Таким образом, результаты выполненных расчетов показывают, что устройство дополнительного звукопоглощения при среднем звукопоглощении в помещениях системы, равном $\alpha_{\text{ср}}=0.20$, не может являться эффективным средством снижения шума. Его можно использовать как дополнительное средство снижения шума в помещениях с низкими коэффициентами звукопоглощения ограждений и при наличии в них постоянных источников шума. Например, в квартирах, это относится к кухням при $\alpha_{\text{ср}}=0.10$ устройство звукопоглощений облицовки потолка с $\alpha_{\text{пт}}=0.80$ может снизить уровень шума до 4,0 дБ в помещении кухни и в связанных с ней помещениях квартиры.

Как видно из результатов таблиц 2.9 и 2.10, наиболее эффективным средством снижения шума в системе связанных помещений является повышение звукоизоляции дверей. В таблице 2.11 приведены данные об акустической эффективности снижения шума за счет звукоизоляции дверей и дополнительного звукопоглощения. Отрицательные значения эффективности в графах 12-14 таблице 2.11 связаны с повышением уровней давления в помещениях с источником шума после закрытия дверей. Видно, что эффективность звукоизоляции в несколько раз выше эффективности дополнительного звукопоглощения.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что для оценки распределения звуковой энергии в помещениях анфиладных систем и акустической эффективности мер снижения шума можно использовать статистический метод

расчета. Метод позволяет объективно определять границы эффективного снижения шума звукопоглощающими облицовками и звукоизолирующими конструкциями дверей и эффективность их совместного применения для каждой конкретной планировочной ситуации с учетом положения источников шума в системе.

Таблица 2.11 - Суммарная эффективность снижения уровней звукового давления за счет звукопоглощающих облицовок и звукоизоляции дверей

№	Положение в помещениях						Уровень звукового давления в помещении, дБ			Средний уровень звукового давления в системе, дБ	Снижение уровня звукового давления в помещении за счет звукопоглощающих облицовок и звукоизоляции дверей, дБ			Снижение среднего уровня звукового давления, дБ
	источника шума			звукопоглощающих облицовок										
	1	2	3	1	2	3	1	2	3		1	2	3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	*						82.2	61.9	41.6	77.49	-0.3	9.1	18.8	0.01
2		*					61.9	82.2	61.9	77.53	8.1	-0.6	8.1	0
3			*				41.6	61.9	82.2	77.49	18.8	9.1	-0.3	0.01
4	*						79.8	59.8	39.5	75.12	2.1	11.2	20.9	2.38
5		*					59.2	82.2	61.9	77.51	11.8	-0.6	9.1	0.02
6			*				39.2	61.9	82.2	77.49	21.2	8.1	-0.3	0.01
7	*						82.2	59.5	39.5	77.47	-0.3	11.5	20.9	0.03
8		*					59.8	79.8	59.8	75.16	11.2	1.8	11.2	2.37
9			*				39.5	59.5	82.2	77.47	20.9	11.5	-0.3	0.03
10	*						82.2	61.9	39.2	77.49	-0.3	9.1	21.2	0.01
11		*					61.9	82.2	59.2	77.51	9.1	-0.6	11.8	0.02
12			*				39.5	59.8	79.8	75.12	20.9	11.2	2.1	2.38

Выводы по главе 2

1. Расчет энергетических параметров звуковых полей в связанных помещениях зданий ячеистой и анфиладных планировок может выполняться на основе сложных акустических моделей и расчетных методов. Однако соразмерный характер помещений позволяет использовать при расчетах метод диффузного поля в пределах каждого помещения. Акустическая связь между помещениями надежно реализуются коэффициентами связи и системой уравнений, записанной для стационарных и нестационарных условий формирования шумового режима. На

основе этой системы получена достаточно простая система уравнений для зданий с анфиладными планировками.

2. Произведено уточнение существующей расчетной методики за счет учета дополнительных факторов, влияющих на звуковое поле, а именно:

- за счет разделения прямой и отраженной составляющих звука в «шумном» помещении и учета особенностей их проникновения в изолируемое помещение через ограждение или открытый проем;

- за счет учета зависимости уровней звука в изолируемом помещении от положения источника шума;

- за счет учета влияния обратной акустической связи и определения границ этого учета.

3. При проверке статистического метода, уточнении параметров и закономерностей формирования звуковых полей в связанных помещениях в качестве инструмента исследования можно использовать результаты расчета энергетических параметров поля, полученные с помощью интегрального уравнения Куттруфа. В результате таких исследований получено следующее:

- рассчитаны энергетические параметры и построены карты уровней звукового давления, градиентов плотности и плотностей потоков звуковой энергии;

- установлены диапазоны погрешностей метода диффузного поля применительно к связанным помещениям;

- выполнен анализ энергетических потоков и уточнены значения коэффициентов акустической связи между помещениями;

- получено уточненное выражение для представления открытого проема между помещениями в виде звукопоглощающего участка ограждения.

4. Статистический расчетный метод может надежно использоваться для оценки распределения в квартирах звуковой энергии, возникающей при работе внутриквартирных источников шума. Метод позволяет установить необходимые величины звукопоглощения помещений, звукоизоляции дверей и перегородок для каждой конкретной планировочной ситуации с учетом положения и звуковой мощности источников шума в квартире.

5. Метод и программа для его реализации рекомендуются к применению в практике проектирования зданий с ячейковыми и анфиладными системами планировки.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОВЫХ ПОЛЕЙ В ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЯХ С КОРИДОРНЫМИ И ЯЧЕЙКОВО-КОРИДОРНЫМИ СИСТЕМАМИ ПЛАНИРОВКИ

В гражданских зданиях общественного и жилого назначения (административные и жилые здания, гостиницы, учебные заведения и т.д.) широкое распространение имеют коридорные и ячейково-коридорные системы планировки, при которых большая часть помещений связана между собой посредством коридора. Объединяющий помещения коридор при наличии источников шума в коридоре или в отдельных помещениях способствует беспрепятственному распространению звуковой энергии по всем объемам планировки. Для оценки шумового режима и разработки шумозащитных мероприятий необходим метод расчета распределения звуковой энергии в зданиях с такими системами планировки, объективно учитывающий условия распространения шума в системе. В данной главе предложен такой метод расчета. Ниже приводятся принципы его разработки и практической реализации.

3.1 Численный метод расчета шумового режима в зданиях с коридорными и ячейково-коридорными системами планировки

С позиций распространения шума коридорную систему планировки можно рассматривать как систему акустически связанных помещений [10]. Акустическая связь между ними обеспечивается через разделяющие помещения звукоизолирующие преграды в виде стен и дверей. При этом часть дверей может быть закрыта или открыта.

Все помещения, входящие в акустическую систему с коридорными планировками, по условиям формирования в них отраженных шумовых полей делятся на два типа: на соразмерные и длинные помещения. В соразмерных помещениях образуются диффузные звуковые поля с равномерным

распределением звуковой энергии по объему помещений. Расчет их, как показано в главе 2, можно производить на основе статистической теории акустики [58].

В длинных помещениях, к которым в данной системе относятся коридоры, наблюдаются существенные спады отраженной звуковой энергии по мере удаления от источника шума. Такие поля являются квазидиффузными и расчеты их энергетических характеристик возможно производить на основе статистического энергетического подхода [14,53]. При таком подходе предполагается, что в коридоре существует результирующий поток отраженной звуковой энергии, направленный в сторону уменьшения отраженной энергии ε . Связь между градиентом плотности отраженной энергии и плотностью потока отраженной энергии q имеет вид

$$q = -\eta \cdot \text{grad} \varepsilon, \quad (3.1)$$

где $\eta = cl_{cp} / 2$ - коэффициент связи плотности потока и градиента плотности звуковой энергии в квазидиффузных звуковых полях; l_{cp} - средняя длина свободного пробега звуковых волн в помещении.

Так как формирование шумовых полей в разных по форме и размерам помещениях коридорных систем планировки происходит при разных условиях, расчеты суммарного шумового поля целесообразно выполнять численным методом. При его использовании коридор и все, связанные с ним помещения, разделяются на элементарные объемы V_i , в пределах которых плотность отраженной звуковой энергии остается постоянной по всему элементарному объему.

В соразмерных помещениях в качестве такого элементарного объема можно использовать весь объем помещения. В тоже время коридор следует делить на отдельные объемы, в пределах которых допустимо предположение о диффузности отраженного звукового поля в поперечном сечении и о его минимальном изменении в продольном направлении. Для каждого элементарного объема в этом случае можно использовать среднюю величину плотности звуковой ε_i , и средний коэффициент звукопоглощения ограждений α_i для всей площади ограждений S_i .

Величина отраженной звуковой энергии E_i в элементарных объемах V_i может быть определена при рассмотрении баланса поступающей, уходящей и поглощенной в объеме энергий (см. рисунок 3.1).

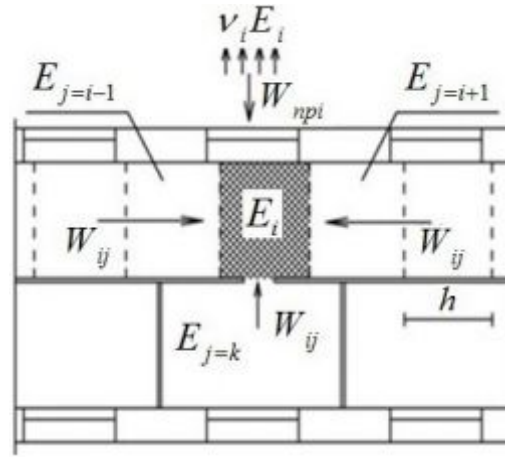


Рисунок 3.1 - Схема к расчету баланса энергии для i -го элементарного объема

$$W_i - v_i E_i + \sum_{j=1}^n W_{ij} = 0 . \quad (3.2)$$

где n - количество j -х объемов, связанных с i -м объемом.

В уравнении (3.2) первая составляющая W_i определяется звуковой энергией, возникающей в i -й элементарном объеме при работе от источника шума.

Вторая составляющая уравнения (3.2) $v_i E_i$ характеризует потери звуковой энергии в пределах i -го объема. Коэффициент потери звуковой энергии v_i i -го объема при условиях квазидиффузного поля находится как

$$v_i = \frac{c \alpha_i S_i}{2(2 - \alpha_i) V_i} . \quad (3.3)$$

Третья составляющая уравнения (3.2) $\sum_{j=1}^n W_{ij}$ определяется поступлением в i -й объем звуковой энергии из смежных j -х элементарных объемов. Величина ее зависит от условий передачи звуковой энергии на границах разделов объемов. Через воздушную границу площадью S_k , разделяющую два смежных элементарных объема коридора, в условиях квазидиффузного поля будет передаваться количество звуковой энергии, определяемое как

$$W_{ij} = q_{ij} S_k = -\frac{cl_{cp}}{2} \cdot \frac{(E_j - E_i) \cdot S_k}{V_i \cdot h} = \frac{cl_{cp}}{2h^2} (E_j - E_i) . \quad (3.4)$$

Здесь принято $V_i = V_j = S_k \cdot h$, где h - шаг разбиения коридора на участки; S_k - площадь поперечного сечения коридора; q_{ij} - плотность потока энергии входящей в i -й объем.

Если границей раздела между элементарными объемами является стена площадью S_{ij} с коэффициентом звукопроницаемости τ_{ij} , то количество поступающей в i -й объем звуковой энергии составит

$$W_{ij} = \frac{E_j c S_{ij} \tau_{ij}}{2(2 - \alpha_j) V_i} . \quad (3.5)$$

Для стены, состоящей из нескольких участков с разными звукоизолирующими характеристиками, величина $S_{ij} \tau_{ij}$ определяется как

$$S_{ij} \tau_{ij} = \sum_m S_{ij}^m \cdot \tau_{ij}^m , \quad (3.6)$$

где m – количество различных участков ограждения (например, двери, кирпичная кладка и т.п.)

Следует отметить, что с целью упрощения записи уравнения (3.2) звуковая энергия, уходящая из i -го объема в смежные j -е объемы через ограждения, учитывается в коэффициенте потерь ν_i путем соответствующего увеличения среднего коэффициента звукопоглощения ограждений α_i .

Таким образом, на основе уравнения (3.2) для каждой схемы планировки может быть сформирована система из N линейных алгебраических уравнений с $i, j \in [1, 2, \dots, k, \dots, N]$, где N – количество элементарных объемов. Для решения системы уравнений можно использовать различные точные и итерационные методы.

На основании результатов решения системы уравнений определяются величины звуковой энергии во всех элементарных объемах планировки E_i и производятся расчеты плотности звуковой энергии

$$\varepsilon_i = E_i / V_i , \quad (3.7)$$

и, соответственно, вычисляются уровни шума

$$L_i = 10 \lg \left(\frac{\varepsilon_i \cdot c}{I_0} \right) , \quad (3.8)$$

где $I_0 = 10^{-12}$ Вт – интенсивность звука на пороге слышимости.

В уравнение (3.2) входит составляющая W_i , которая в i -ом элементарном объеме, с источником шума для соразмерных помещений определяется как и ранее с учетом рекомендаций, полученных в главе 2. В то же время при расположении источника шума в коридоре, что согласно главе 1 происходит в коридорных

системах достаточно часто, величину W_i следует определять с учетом особенностей распределения звуковой энергии в коридорах как несоразмерных помещениях.

Коридор относится к длинным помещениям, в которых формирование шумовых полей имеет две особенности, влияющие на выбор расчетного метода.

В первую очередь это относится к характеру отражения звука от поверхностей. Как установлено многочисленными исследованиями [17,30,48] отражение звука от поверхностей ограждений имеет зеркально-диффузный характер. При таком отражении часть звуковой энергии отражается от ограждений зеркально, а вторая часть рассеивается диффузно. В этом случае отраженная энергия переносится в объем двумя группами лучей: зеркальными и диффузными.

В соразмерных помещениях средние длины пробега зеркальных и диффузных лучей примерно одинаковы. В этой связи в соразмерных помещениях при оценке энергетических характеристик отраженного шума возможно использовать статистическую теорию акустики, основанную на представлениях о диффузном отраженном звуковом поле. Такие представления использованы во второй главе работы.

В несоразмерных длинных и плоских помещениях звуковые лучи, отраженные зеркально и диффузно, существенно различаются между собой по длине пробега и их нельзя оценить средней длиной пробега для всей совокупности лучей. Поэтому в несоразмерных помещениях и в том числе коридорах оценку распространения отраженной звуковой энергии необходимо производить отдельно для зеркальной и диффузной составляющих энергии отраженного шума. При этом необходимо учитывать, что формирование диффузной составляющей во многом определяется распределением зеркально отраженной энергии.

Второй важной особенностью отраженного шумового поля является характер распределения отраженной энергии в объеме коридора. Целенаправленно выполненные в работе [74] экспериментальные исследования показали, что при диффузном отражении звука плотность отраженной звуковой энергии в поперечном сечении коридоров изменяется незначительно в сравнении с её изменениями по длине. Подобное распределение энергии позволяет считать отраженное звуковое поле в них одномерным $\varepsilon^{omp} = f(x)$ и тем самым существенно

упростить методику расчета уровней звукового давления диффузно отраженной энергии.

С учетом указанных особенностей для определения величины звуковой энергии W_i возможно применить принципы, использованные нами при разработке метода расчета шума в газовоздушных каналах систем вентиляции зданий [28].

При разработке метода была использована комбинированная расчетная модель, в которой зеркальная и рассеянная составляющие отраженной энергии определяются отдельно. Зеркально отраженная энергия находится методом прослеживания лучей, а рассеянная энергия статистическим энергетическим методом.

В общем случае звуковая энергия, приходящая в i -й объем коридора при зеркально-диффузном характере отражения, определяется прямой энергией, приходящей от источника шума W_i^{np} , зеркально отраженной энергией W_i^3 и диффузно отраженной энергией $W_i^д$, то есть

$$W_i = W_i^{np} + W_i^3 + W_i^д. \quad (3.9)$$

При расчете энергии прямого звука W_i^{np} и зеркально отраженной энергии W_i^3 методом прослеживания лучей используется подход, при котором принимаются лучи с бесконечно малыми пространственными углами распространения.

Звуковая мощность, переносимая каждым k -м лучом, в этом случае после его прохождения от места излучения до i -ого объема коридора для прямого звука в точках коридора, расположенных в зоне прямой видимости источника, составляет

$$W_{ki}^{np} = \frac{W}{N} \exp(-m_\epsilon R_{ki}) \quad (3.10)$$

и общая энергия от всех k -х лучей прямого звука, пришедших через i -й элементарный объем коридора, равна

$$W_i^{np} = \sum_{k=1}^K W_{ki}^{np} \quad (3.11)$$

Для зеркально отраженного звука мощность, переносимая каждым k -м лучом, определяется как

$$W_{ki}^3 = \frac{W}{N} \exp(-m_\epsilon R_{ki}) \prod_{p=1}^P [(1-\alpha_p)\xi_p]^{D_p} \quad (3.12)$$

Количество зеркально отраженной энергии в i -ом элементарном объеме равно сумме энергий K -х лучей, проходящих через него, то есть

$$W_i^3 = \sum_{k=1}^K W_{ki}^3, \quad (3.13)$$

В выражениях (3.10) - (3.13) принято: W – звуковая мощность источника, Вт ; N – количество лучей, исходящих из источника; m_e – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе, m^{-1} ; R_{ki} – расстояние, проходимое k -м лучом от источника звука до i -го элементарного объема, м; α_p – коэффициент звукопоглощения p -й поверхности ограждения, на которую падал прослеживаемый луч; P – общее число актов отражения k -го луча от всех отражающих поверхностей, встречающихся на его пути в процессе распространения его на расстояние R_{ki} до i -го элементарного объема; D_p – число актов падения k -го луча на p -ю поверхность в процессе распространения его на расстояние R_{ki} ; ξ_p – доля энергии, направляемая по k -му лучу после его отражения от p -ой поверхности ограждения.

Величина W_i^{Δ} определяется суммой энергий прямых и зеркальных лучей, перешедших в отраженную диффузную составляющую при отражении лучей от m -ой поверхности i -го объема, являющейся частью поверхности коридора

$$W_i^{\Delta} = \sum_{m=1}^4 W_m^{\Delta} = \sum_{m=1}^4 (1 - \alpha_m)(1 - \xi_m) \left(\sum_{k=1}^K W_{ki}^3 + \sum_{k=1}^K W_{ki}^{np} \right), \quad (3.14)$$

где K – количество лучей, упавших на m -ю поверхность i -го объема; ξ_m – доля зеркальной энергии, направляемая по лучу после его отражения от m -ой поверхности ограждения коридора; α_m – коэффициент звукопоглощения m -й поверхности.

Для реализации расчетного метода разработана компьютерная программа. При наличии в системе помещений источника шума в программе выполняется расчет величины W_i и затем производится решение системы уравнений (3.2). Программа, позволяет производить расчет распределения энергии при различных планировочных решениях зданий: с линейными коридорами, с кольцевым замкнутым коридором, с коридорами Т-образной формы при одно- или двухсторонним размещении помещений относительно коридора.

Таблица 3.1 - Характеристики соразмерных помещений и уровни шума в них

№ помещения	Объем	Площадь	L, дБ
1	53	30	50,5
2	53	30	40,3
3	144	108	68,3
4	73	42	70,5
5	144	108	66,4
6	198	162	57,1
7	198	162	47,1
8	144	108	45,9
9	73	42	57,9
10	198	162	49,9
11	198	162	33,7
12	144	108	68,3
13	117	81	66,5
14	198	162	58,7
15	81	45	61,5
16	198	162	48,1
17	144	108	45,9
18	198	162	38,8
19	117	81	33,7
20	198	162	33
21	99	63	46,7

3.2 Экспериментальная проверка предложенного расчетного метода при ячейково-коридорной системе планировки квартиры

Методика проведения экспериментальных исследований и сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных приведена в разделе 2.2 работы.

Для проверки точности расчетного метода выполнены экспериментальные исследования и расчеты шума в типовой четырехкомнатной квартире с ячейково – коридорной планировкой. Схема квартиры приведена на рисунке 3.4.

Квартира состоит из 9 помещений, разделенных кирпичными перегородками со звукоизоляцией 41 дБ. Звукоизоляция дверных заполнений 10 дБ. Источник

шума размещался на высоте 1.5 м. Высота помещения 2.7 м. Основные параметры помещений квартиры даны в таблице 3.2. Всего проводилось две серии экспериментов с изменением места положения источника шума при открытых и закрытых дверях квартиры. При экспериментах в качестве источника шума использовался всенаправленный источник звука (додекаэдр) OED-SP-012-600. Измерение уровней звукового давления производилось шумомером ЭКОФИЗИКА-110А.

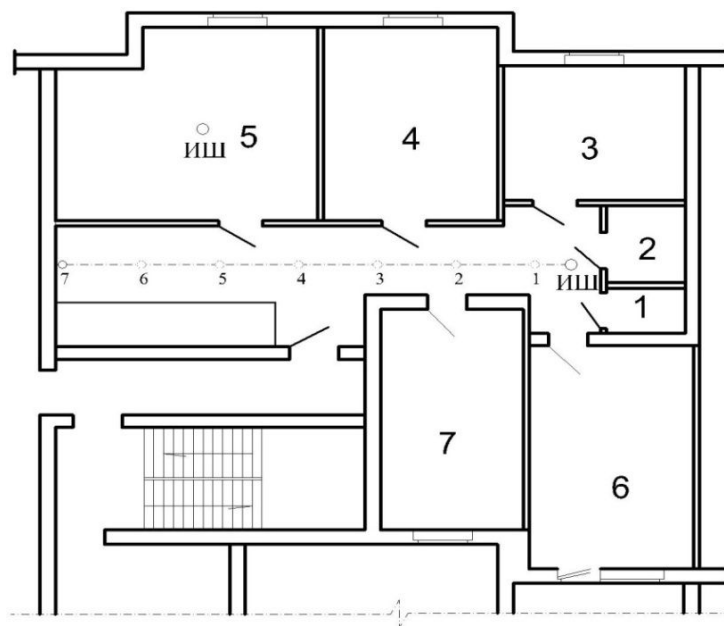


Рисунок 3.4 - Схема квартиры к расчету

Таблица 3.2 - Параметры помещений квартиры

№ пом.	Площадь ограждений, S_i м ²	Объем, V_i м ³	Средний коэффициент звукопоглощения α_i
1	12.9	2.67	0.05
2	21.2	6.40	0.05
3	55.6	27.7	0.1
4	69.0	37.6	0.2
5	90.7	53.2	0.2
6	76.3	42.8	0.2
7	65.6	340	0.2

Результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных приведены на рисунках 3.5-3.12. Видно, что расхождение результатов расчетов и экспериментов не превышают 2-3дБ.

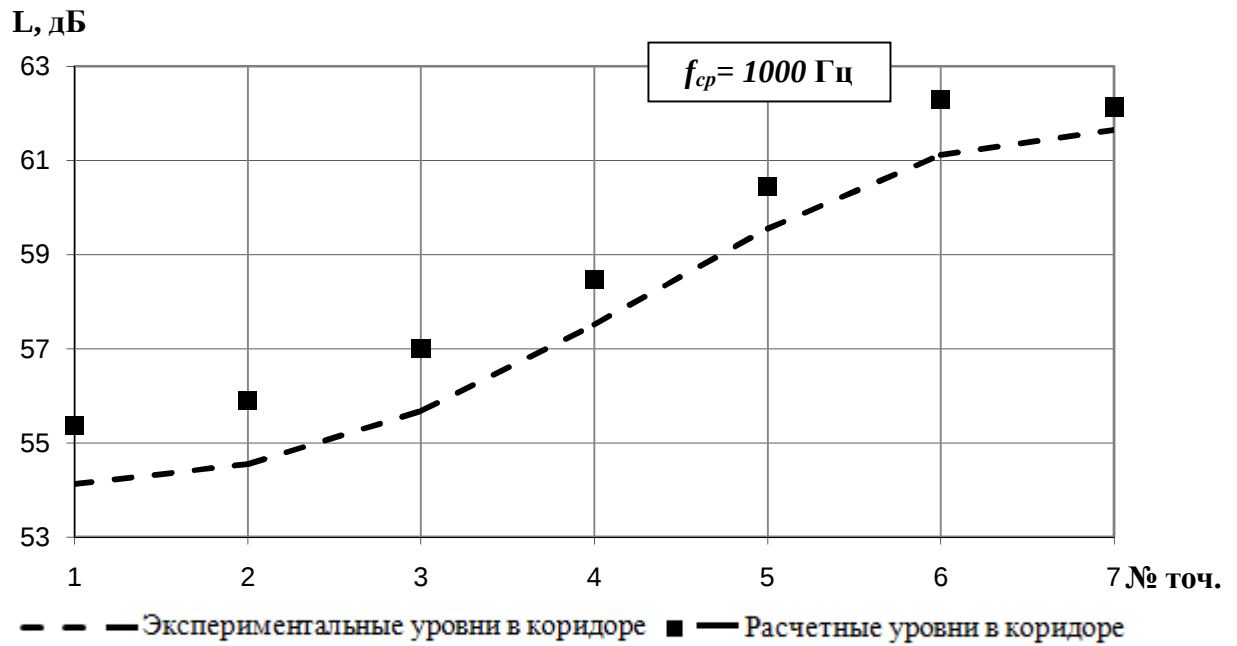


Рисунок 3.5 - Экспериментальные и расчетные уровни шума в коридоре при расположении источника в 5 помещении, при всех закрытых дверях помещений квартиры, в октавной полосе $f_{cp}=1000$ Гц.

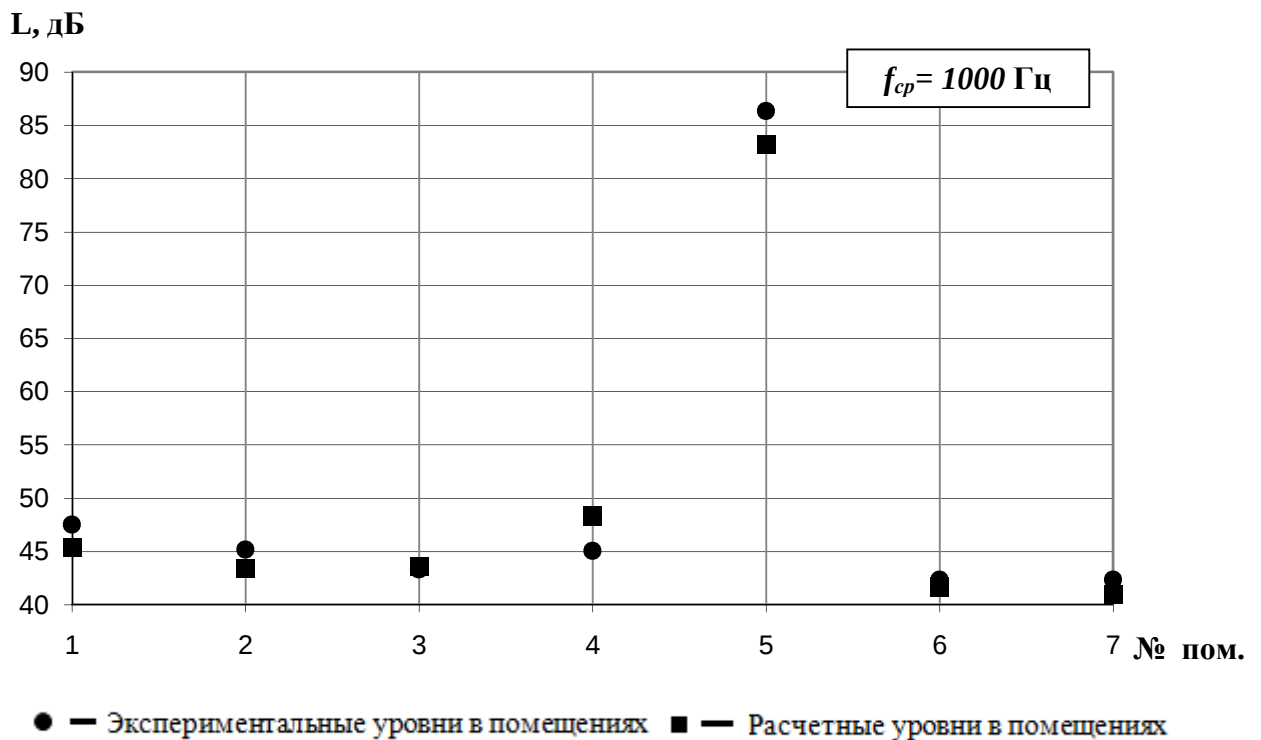


Рисунок 3.6 - Экспериментальные и расчетные уровни шума в помещениях квартиры при расположении источника в 5 помещении, при всех закрытых дверях помещений квартиры, в октавной полосе $f_{cp}=1000$ Гц.

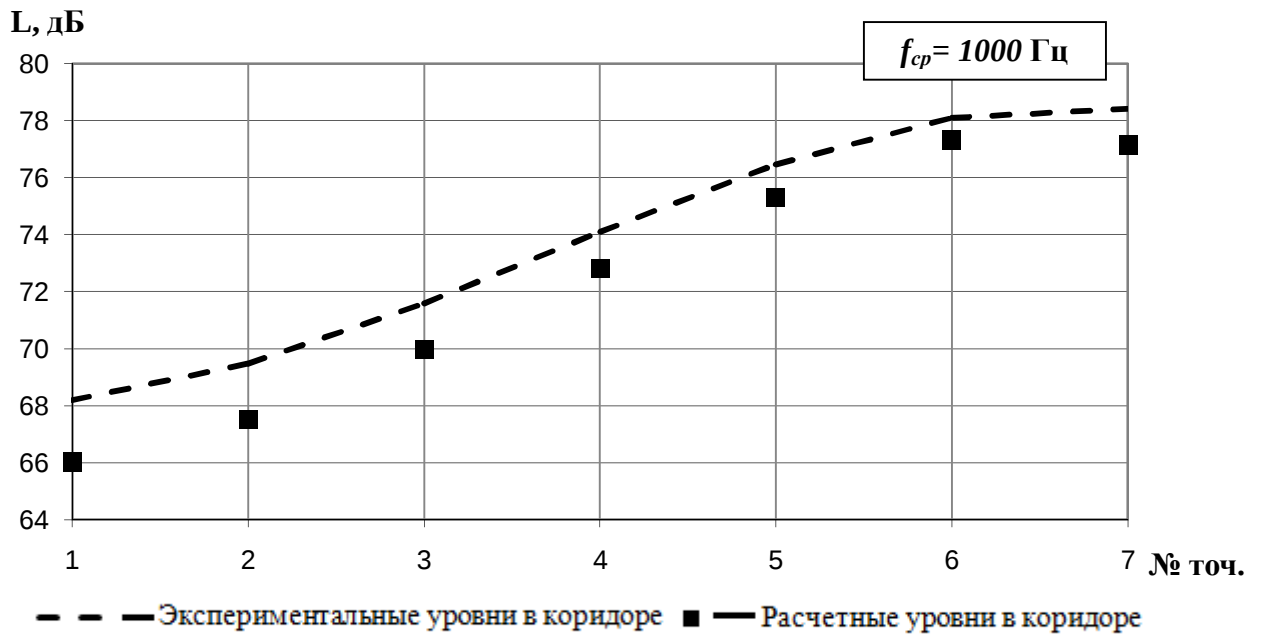


Рисунок 3.7 - Экспериментальные и расчетные уровни шума в коридоре при расположении источника в 5 помещении, при всех открытых дверях помещений квартиры, в октавной полосе $f_{cp}=1000$ Гц.

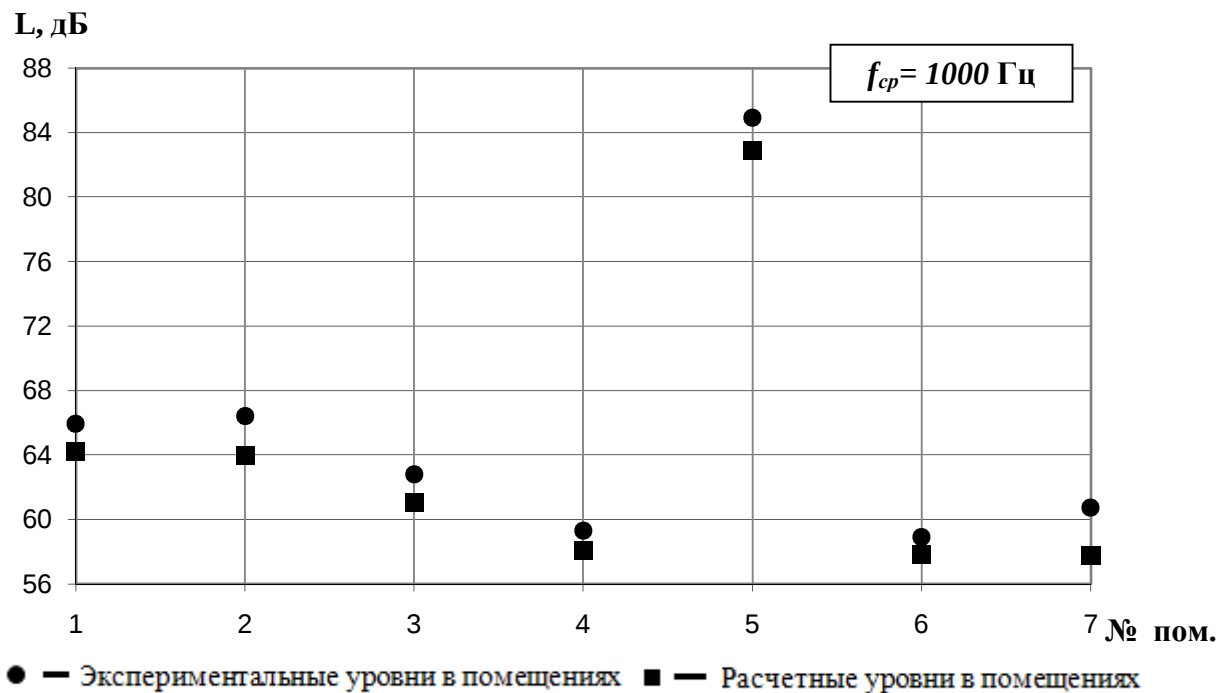


Рисунок 3.8 - Экспериментальные и расчетные уровни шума в помещениях квартиры при расположении источника в 5 помещении, при всех открытых дверях помещений квартиры, в октавной полосе $f_{cp}=1000$ Гц.

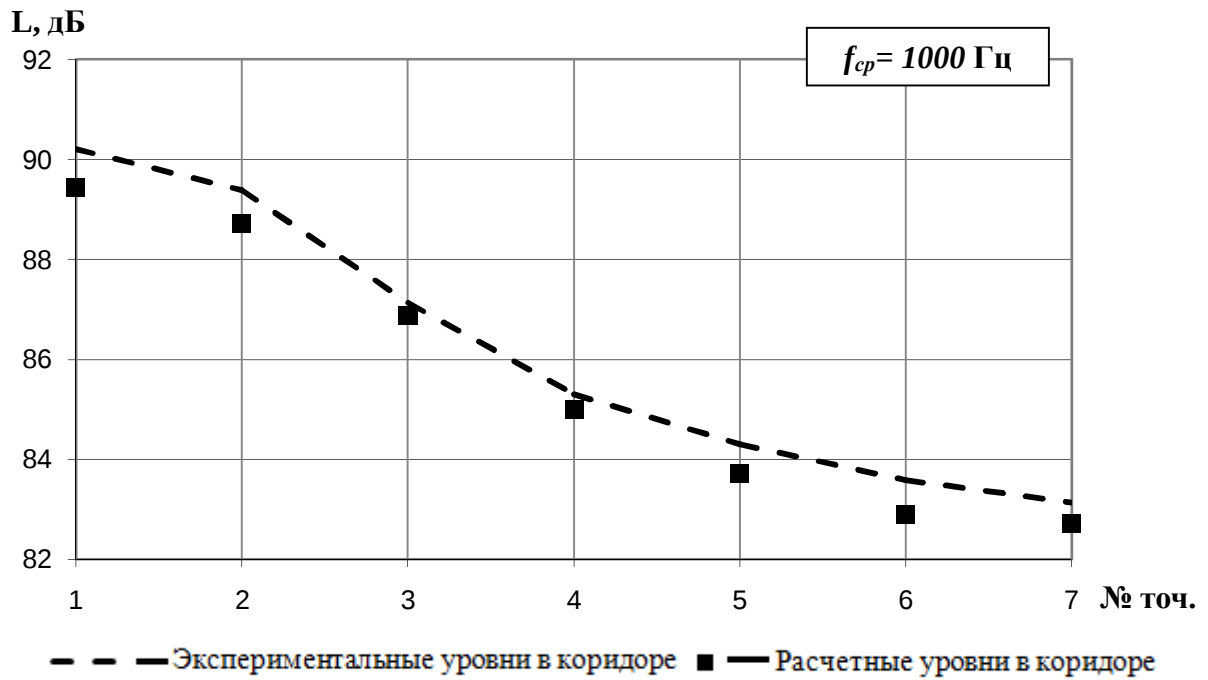


Рисунок 3.9 - Экспериментальные и расчетные уровни шума в коридоре при расположении источника в коридоре, при всех закрытых дверях помещений квартиры, в октавной полосе $f_{cp} = 1000$ Гц.

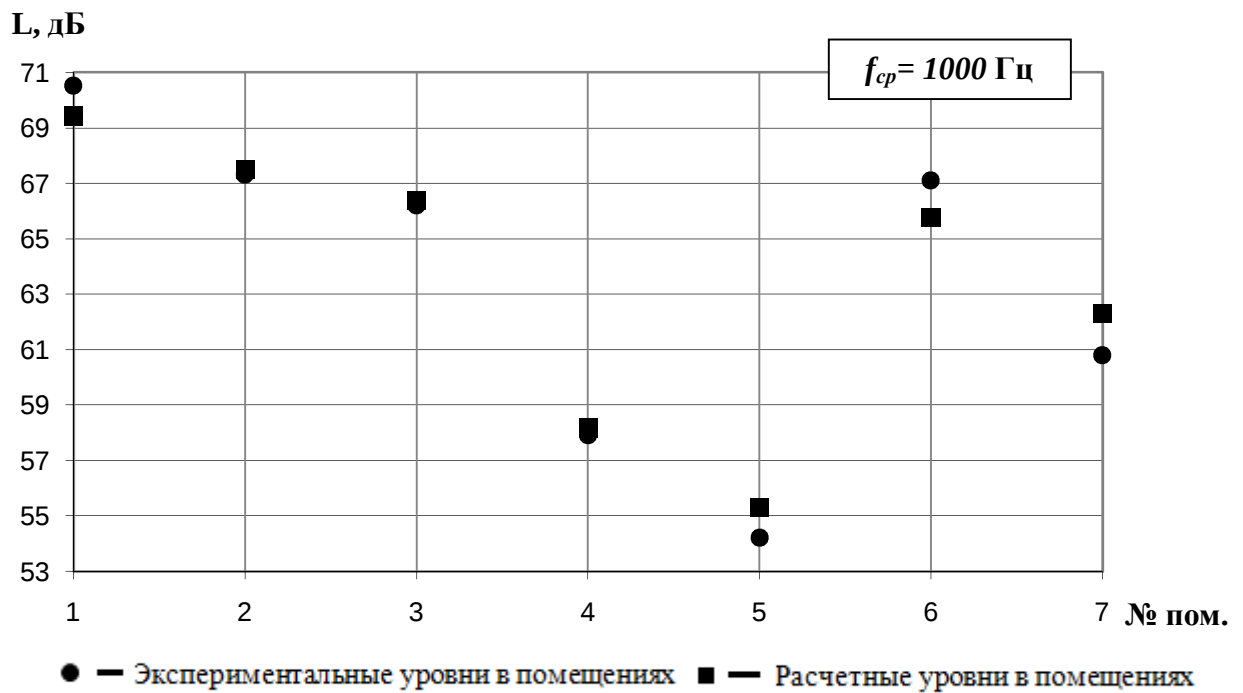


Рисунок 3.10 - Экспериментальные и расчетные уровни шума в помещениях квартиры при расположении источника в коридоре, при всех закрытых дверях помещений квартиры, в октавной полосе $f_{cp} = 1000$ Гц.

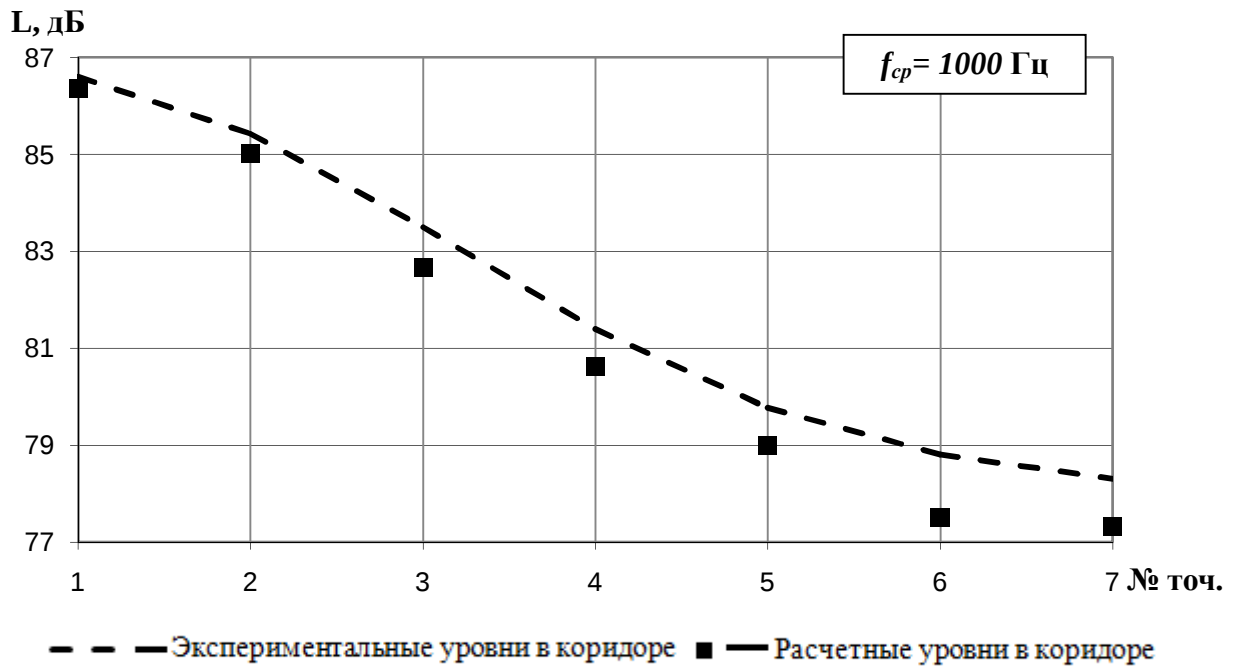


Рисунок 3.11 - Экспериментальные и расчетные уровни шума в коридоре при расположении источника в коридоре, при всех открытых дверях помещений квартиры, в октавной полосе $f_{cp}=1000$ Гц.

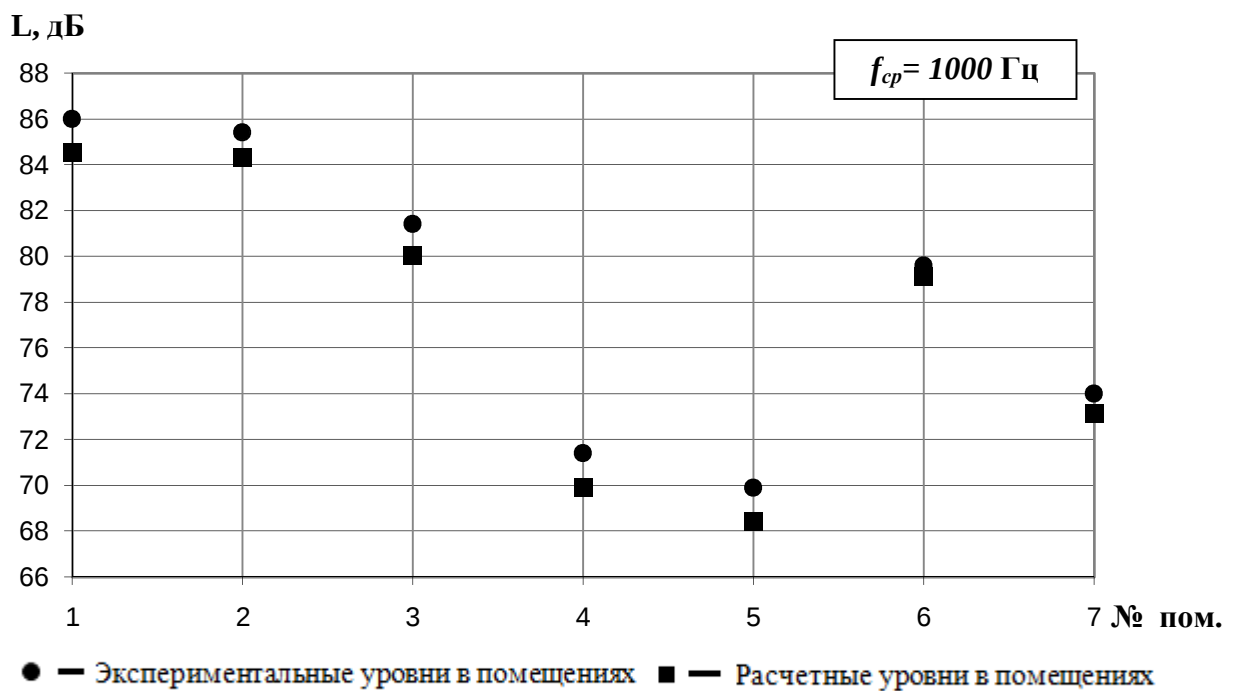


Рисунок 3.12 - Экспериментальные и расчетные уровни шума в помещениях квартиры при расположении источника в коридоре, при всех открытых дверях помещений квартиры, в октавной полосе $f_{cp}=1000$ Гц.

3.3 Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных с целью подтверждения точности предложенного расчетного метода для коридорной системы планировки

Для сравнительного анализа выбран 2 этаж учебного корпуса Тамбовского государственного технического университета, имеющий типичную коридорную планировку общественных зданий учебного назначения. Схема этажа дана на рисунке 3.13. Этаж состоит из 21 помещения, разделенных кирпичными перегородками и стенами. При расчетах передача звука через глухие участки стен и перегородок не учитывалась, так как их звукоизоляция ($60 \div 40$ дБ) значительно превышает звукоизоляцию дверей, равную ($10 \div 13$ дБ) и тем более этот учет не нужен для случая открытых проемов.

Источник шума размещался на высоте 1.5 м. Высота коридора 3.0 м., высота остальных помещений 3.3 м. Остальные параметры помещений даны в таблице 3.3. Всего произведено четыре серии экспериментов при четырех изменениях места положения источника шума в помещениях. При экспериментах в качестве источника шума использовался всенаправленный источник звука (додекаэдр) OED-SP-012-600. Измерение уровней звукового давления производилось шумомером ЭКОФИЗИКА-110А.

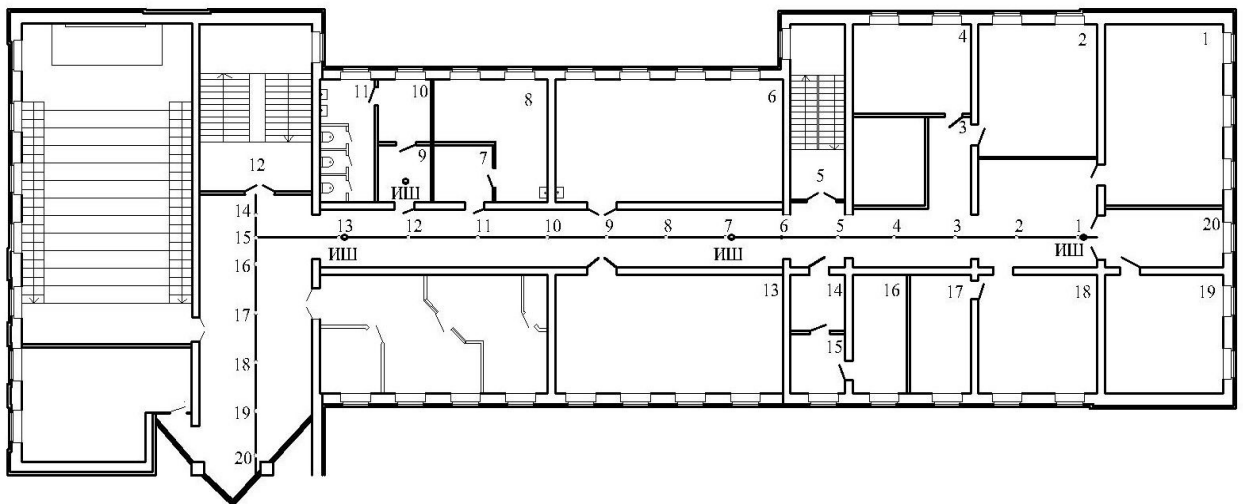


Рисунок 3.13 - Схема этажа учебного здания к расчету и эксперименту

Для определения звукоизоляции дверных заполнений были выполнены отдельные специальные измерения. Источник шума помещался в коридоре на

расстоянии 1.5 м от двери. Уровень шума в помещении измерялся при закрытой и открытой двери. Звукоизоляция двери определялась как $R = L_2' - L_2$, где L_2', L_2 - измеренные уровни шума в помещении при открытой и закрытой двери. Кроме этого звукоизоляция двери рассчитывалась по известной формуле

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg(S_{\text{дв}} / (\alpha_2 S_2)),$$

где L_1 и L_2 - уровни звуковой энергии соответственно в коридоре «шумное» помещение и учебных «тихих» помещениях; $S_{\text{дв}}$ - площадь двери; α_2, S_2 - средний коэффициент звукопоглощения и площадь ограждений помещения. Результаты определения звукоизоляции дверей приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Параметры помещений

№ помещения	Площадь ограждений, S_i м ²	Объем, V_i м ³	Средний коэффициент звукопоглощения помещений α_i в полосе с $f_{cp}=2000$ Гц	Звукоизоляция дверей помещений $R_{\text{дв}}$ в полосе с $f_{cp}=2000$ Гц
1	181	207	0.08	13.2
2	133	163	0.08	13.1
3	29.1	59	0.10	-
5	78.2	122	0.10	13.4
6	227	253	0.08	13.1
7	18.8	44.7	0.10	16.8
8	94.7	135	0.08	13.2
9	24.4	50.8	0.06	-
10	26.7	53.8	0.06	13.1
11	51.1	104.6	0.06	5.3
12	151.6	244.3	0.10	13.4
13	220	248	0.07	12.6
14	25	51.5	0.05	12.8
15	26.4	53.3	0.05	-
16	52.1	105.1	0.06	7.4
17	59.1	94.2	0.07	12.3
18	115	147	0.10	17.1
19	115	147	0.07	8.6
20	56.4	92.6	0.07	17.1

Средние коэффициенты звукопоглощения помещений рассчитаны с использованием уравнения Сэбина на основе измеренных значений времени реверберации T как

$$\bar{\alpha} = 0,163 \cdot V / ST,$$

где V - объем помещения.

Результаты определения коэффициентов α_1 приведены в таблице 3.3.

Измерения и расчеты производились в октавных полосах с f_{cp} от 250 Гц до 8000 Гц. В работе приведены данные сравнительного анализа для октавной полосы с $f_{cp} = 2000$ Гц.

Результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных приведены в приложении на рисунках П.1.1 - П.1.16 и в таблицах П.1.1 - П.1.8

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений уровней звука позволяет сделать следующие выводы.

Расчетные и экспериментальные уровни шума согласуются между собой в коридоре как при открытых, так и закрытых дверях между коридором и помещениями. Расхождения в большинстве случаев не превышают 3 дБ. Учитывая большую неравномерность поля в коридоре (до 40 дБ) при общей длине коридора 43 м, совпадение расчета и эксперимента можно считать хорошим. Значительные расхождения (до 4 дБ) наблюдаются в коридоре в случае размещения источника шума в помещении 9. Расхождения объясняются изменениями условия формирования отраженного звукового поля в коридоре: при выходе из открытого проема помещения в коридор звуковые лучи имеют выраженную направленность, что не в полной мере учитывается расчетным методом.

На точность расчетов в акустически связанных помещениях с закрытыми дверными проемами существенное влияние оказывает точность определения величины звукоизоляции дверных заполнений. Фактическая звукоизоляция двери может отличаться от измеренных значений, так как акустические условия при определении звукоизоляции и при проведении экспериментов не совпадают в полной мере. В некоторых случаях из-за этого погрешности расчетов в помещениях достигает 3.5 - 4.0 дБ. Косвенно это подтверждается тем, что наибольшее расхождение результатов наблюдается в удаленных от источника точках, где в структуре отраженного поля в большей мере присутствуют осевые и

касательные лучи, более скользящие по поверхности ограждений, и прямой звук подает на двери также под меньшими углами.

В случае открытых дверей, как указано выше, в помещениях аудиторий отмечается хорошая сходимость результатов эксперимента и расчетов.

Таким образом, при использовании расчетного метода для проектирования звукоизолирующих конструкций важно иметь надежные сведения о звукоизоляции предлагаемых для применения конструктивных решений дверей. Как показывает практика, фактическая изоляция дверей может существенно отличаться от заявленных в сертификатах характеристик, полученных в условиях диффузного поля.

Выводы по главе 3

1. Представлен новый метод расчета распространения шума в зданиях с ячейково-коридорной и коридорной системами планировки. Новый метод и компьютерная программа его реализации позволяют объективно оценивать шумовой режим в зданиях с коридорами при различном размещении источников шума, при различных объемно-планировочных и конструктивных параметрах и акустических характеристиках помещений, входящих в системы.

2. Результаты теоретических и экспериментальных данных, полученных для систем коридорной планировочной структурой, свидетельствуют о достаточной надежности расчетов уровней шума в помещениях с использованием при расчетах предложенного расчетного метода. Расхождение результатов между экспериментальными и расчетными данными в основном не превышает 3 дБ.

3. Метод и компьютерная программа для его реализации могут быть эффективно использованы при проектировании объемно-планировочных решений с коридорной системой планировки и выборе необходимых звукоизолирующих параметров ограждений и звукопоглощающих характеристик поверхностей ограждений.

ГЛАВА 4. РАСЧЕТЫ ШУМА В СИСТЕМАХ ПОМЕЩЕНИЙ, АКУСТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ЧЕРЕЗ ПРОСТРАНСТВО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОЛКОВ И ЧЕРЕЗ ОБЩЕЕ ВОЗДУШНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Как показано в главе 1, в зданиях общественного назначения в последнее время широкое распространение имеют системы планировок, в которых акустическая связь между помещениями происходит через пространства общих потолков технологического назначения или через общее воздушное пространство, объединяющее отдельные частично выгороженные объемы. Указанные пространства являются несоразмерными объемами и в этой связи для оценки распространения в них отраженной звуковой энергии методы статистической теории акустики, основанные на идеальном представлении о диффузном звуковом поле, не применимы. В этих случаях необходимо использовать расчетные модели, более объективно учитывающие изменение отраженной звуковой энергии в объемах, указанных воздушных пространств. В главе предложены расчетные модели и методики для оценки распространения шума в системах помещений, акустически связанных через пространство общих для всех помещений потолков технологического назначения, и в помещениях с перегородками неполной высоты, объемы которых имеют общее воздушное пространство.

4.1 Расчет шума в системах помещений, связанных через пространство технологического подвешного потока

В практике проектирования и строительства общественных зданий в последнее время широкое распространение имеют каркасные универсальные здания с пространствами, позволяющими выполнять в пределах всего этажа свободную планировку. Свободная планировка в таких зданиях обеспечивается за счет устройства легких, трансформируемых перегородок, которые доходят до

устраиваемого технологического потолка, не пересекая его. Потолок при таких конструктивных решениях способствует легкой перепланировке при изменении функционального процесса на любой части здания. Пространства потолков в таких зданиях имеют конкретное технологическое назначения. В них располагаются различные коммуникации, в том числе и воздуховоды вентиляционных систем. Поэтому их размеры по высоте определяются параметрами размещаемого оборудования систем. Шум от транзитных воздуховодов и от других вентиляционных систем может свободно распространяться в пространстве потолков на большие расстояния и оказывать негативное воздействие на большое количество акустически связанных с ним помещений [3]. Воздушное пространство потолка является также проводником и передатчиком воздушной звуковой энергии, поступающей в его пространство от более шумных помещений с локальными источниками шума. Таким образом, пространства потолка и примыкающих к нему помещений образуют систему акустически связанных объемов, имеющих общее шумовое поле (см. рисунок 4.1)

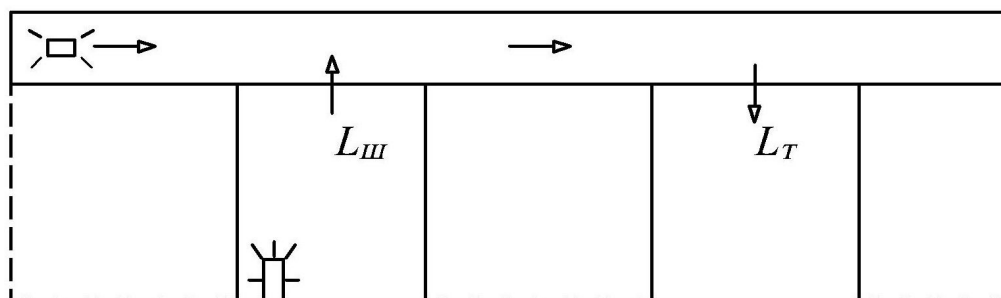


Рисунок 4.1 - Принципиальная схема помещений и технологического потолка, имеющих общее звуковое поле

От источников шума, располагаемых в пространствах потолка, образуются шумовые поля прямого звука и его отраженной составляющей, расчет энергетических характеристик которых имеет свои особенности.

Чаще всего через пространство потолка проходят транзитные воздуховоды круглого или квадратного сечения с высотой, примерно равной высоте потолка. Излучение звуковой энергии от стенок воздуховода происходит по всей его длине. Таким образом, воздуховод можно считать линейным источником прямого звука. Прямая и отраженная энергии проникают через потолок в смежные с ним помещения и создают в них повышенные уровни шума. Для снижения шума в помещениях необходимо использовать строительно-акустические средства,

включая подбор звукоизоляции стенок воздуховода и конструкции потолка. Для определения требуемых величин звукоизоляции необходимо производить последовательные расчеты энергетических характеристик шумовых полей, образующихся в пространстве потолка и в ниже расположенных помещениях.

Общая методика расчетов шума и проектирования шумозащиты заключается в следующем.

1. Производится расчет звуковой энергии, распространяющейся внутри воздуховода.
2. При известных значениях звукоизоляции стенок воздуховода определяется интенсивность, излучаемой поверхностями канала звуковой энергии.
3. Производится расчет уровней прямого звука, образующегося в пространстве потолка от воздуховода как от линейного источника.
4. Производится расчет уровней отраженного шума, образующегося в пространстве потолка от энергии транзитного воздуховода и от энергии, проникающей в пространство потолка из «шумных» помещений системы (при их наличии).
5. Определяются уровни шума в ниже лежащих помещениях, образующегося от звуковой энергии, проникающей в них через конструкцию потолка.
6. Производится оценка соответствия уровней шума в помещениях нормативным требованиям. В случае превышения норм производится расчет требуемой звукоизоляции ограждений воздуховода и потолка и проектирование звукоизолирующих конструкций.

Расчеты шума, распространяющегося в воздуховоде.

Как известно [29], методы расчета распространения шума в воздуховоде зависят от конструкции и его внутренних размеров.

Для воздуховодов малого поперечного сечения для расчета снижения мощности звуковой энергии по длине каналов используются инженерные методы, полученные на основе представлений о воздуховоде как о волноводе. Методика такого расчета приведена в справочном пособии [29].

Для крупных воздушных каналов систем вентиляции зданий нами разработан новый расчетный метод [28]. При разработке расчетного метода учтены особенности формирования и распространения отраженной звуковой энергии в

воздуховоде. Как и в случае коридоров, в воздуховоде отражение звука от его внутренних стенок имеет смешанный зеркально-диффузный характер, при котором часть энергии звуковых лучей отражается от ограждений зеркально, а другая часть диффузно рассеивается.

Поэтому при разработке метода использована комбинированная расчетная модель, в которой зеркальная и рассеянная составляющие отраженной энергии определяются раздельно. Зеркально отраженная энергия находится методом прослеживания лучей, а рассеянная энергия статистическим энергетическим методом. Суммарный уровень звукового давления в воздуховоде вычисляется как:

$$L_i = 10 \lg [c(\varepsilon_i^{\text{пр}} + \varepsilon_i^3 + \varepsilon_i^{\text{д}}) / I_0], \quad (4.1)$$

где $\varepsilon_i^{\text{пр}}$ - плотность прямой звуковой энергии в i -ой точке воздуховода; ε_i^3 и $\varepsilon_i^{\text{д}}$ - плотности, соответственно, зеркальной и рассеянной составляющих отраженной звуковой энергии.

Для определения плотностей прямой и зеркально отраженной энергий, как и в главе 3, использованы принципы лучевого подхода к излучению прямой звуковой энергии поверхностями источника и к распространению зеркально отраженной энергии в пространстве воздуховода.

Также как и в коридорах, распределение отраженной звуковой энергии в поперечном сечении воздуховодов изменяется незначительно в сравнении с её изменениями по длине. Это позволяет считать отраженное звуковое поле в них одномерным $\varepsilon^{\text{отр}} = f(x)$ и тем самым упростить методику расчета уровней звукового давления комбинированным методом.

Такая методика подробно разработана Соломатиным Е.О. в работе [76] и включает в себя следующие основные операции:

- воздуховод разбивается поперечными сечениями на элементарные объемы со сторонами a , b и h и определяются узловые точки одномерной сетки;
- для каждой точки определяются плотность энергии прямого звука $\varepsilon_i^{\text{пр}}$ и плотность зеркально отраженной энергии ε_i^3 ;
- находится величина диффузно отраженной энергии в объемах, вносимая в них лучами, падающими на ограждения канала в пределах элементарного объема, и для всех объемов записываются уравнения балансов диффузной отраженной энергии с учетом граничных условий;

- путем выражения через значения сеточной функции аппроксимируются все члены, входящие в уравнение баланса диффузно отраженной звуковой энергии, и производится решение полученной системы алгебраических уравнений, в результате которого определяются величины ε_i^d ,

- после решения системы уравнений находится суммарная плотность энергии, равная сумме плотностей прямой, лучевой и диффузно отраженной энергий.

Как и ранее в главе 3, при расчете энергии прямого звука и зеркально отраженной энергии методом прослеживания лучей принимаются лучи с бесконечно малыми пространственными углами распространения.

Плотность прямой энергии в элементарном объеме определяется по формуле

$$\varepsilon_i^{np} = \sum_{k=1}^K W_{ki}^{np} / cS_{np}, \quad (4.2)$$

где K – количество лучей прямого звука, прошедших через i -й элементарный объем; S_{np} – приведенная площадь сечения элементарного объема; W_{ki}^{np} – звуковая мощность, переносимая каждым k -м лучом, после его прохождения от места излучения до i -ой расчетной точки воздуховода и определяемая для прямого звука в точках воздуховода, расположенных в зоне прямой видимости источника, по формуле (3.10) как

$$W_{ki}^{np} = \frac{W}{N} \exp(-m_g R_{ki})$$

Для воздуховода, в котором весь объем разбивается на элементарные объемы в виде параллелепипедов, за площадь S_{np} можно принять площадь поперечного сечения сферы, равной по объему элементарному параллелепипеду.

Количество зеркально отраженной энергии в i -ом объеме равно сумме энергий K лучей, проходящих через него, и ее плотность определяется как

$$\varepsilon_i^3 = \sum_{k=1}^K W_{ki}^3 / cS_{np}, \quad (4.3)$$

где W_{ki}^3 – звуковая мощность, переносимая каждым k -м лучом после его излучения, и прохождения до i -ой расчетной точки, определяемая по формуле (3.12) как

$$W_{ki}^3 = \frac{W}{N} \exp(-m_g R_{ki}) \prod_{p=1}^P [(1-\alpha_p)\xi_p]^{D_p}$$

Для оценки распределения плотности диффузно отраженной энергии ε_i^d

используется известный метод энергетических балансов [61]. Суть метода в случае решения данной задачи заключается в составлении уравнений баланса диффузно отраженной энергии для каждого элементарного объема воздуховода. Распределение энергии находится из решения системы уравнений.

Для элементарного объема воздуховода баланс отраженной энергии записывается как

$$(q_{i-1,i} - q_{i,i+1})S_{ij} + \sum_{m=1}^{6-N} W_m^{\text{д}} - \sum_{m=1}^{6-N} q_{(\alpha)_m} S_m - cm_{\varepsilon} \varepsilon_i^{\text{д}} V_i = 0. \quad (4.4)$$

Здесь $(q_{i-1,i} - q_{i,i+1})$ - разность плотностей потоков энергии, входящих в i -й объем и выходящих из него по поперечному сечению $S_i = a \cdot b$; $q_{(\alpha)_m}$ - плотность потока диффузно отраженной энергии, поглощаемой на m -ой поверхности i -го объема, являющейся поверхностью воздуховода с площадью S_m ; $W_m^{\text{д}}$ - диффузная энергия, приходящая в i -й объем после отражения прямых и отраженных лучей от m -ой поверхности воздуховода и перехода части энергии лучей в диффузную энергию; N - количество объемов, контактирующих с i -м объемом; $6-N$ - количество граней i -го объема, являющихся поверхностями ограждений воздуховода; $V_i = a \cdot b \cdot h_i$ - объем i -го элементарного параллелепипеда; a, b - размеры поперечного сечения воздуховода; h_i - шаг разбиения; $\varepsilon_i^{\text{д}}$ - плотность диффузно отраженной энергий в i -м объеме;

Плотности потоков энергии $q_{i-1,i}$ и $q_{i,i+1}$ определяются как

$$q_{i-1,i} = -\eta(\varepsilon_{i-1}^{\text{д}} - \varepsilon_i^{\text{д}})/h_i; \quad q_{i,i+1} = -\eta(\varepsilon_i^{\text{д}} - \varepsilon_{i+1}^{\text{д}})/h_{ij}, \quad (4.5)$$

где $\eta = 0,5cl_{\text{cp}}$ - как и ранее в главе 3, коэффициент связи плотности потока и градиента плотности в квазидиффузном звуковом поле [53].

Величина плотности потоков $q_{(\alpha)_m}$ согласно [53] вычисляется по формуле

$$q_{(\alpha)_m} = \frac{\alpha_m \cdot c \varepsilon_i^{\text{д}}}{2(2 - \alpha_m)}, \quad (4.6)$$

где α_m - коэффициент звукопоглощения m -ой поверхности объема.

Величина $W_m^{\text{д}}$ вычисляется аналогично формуле (3.14) и определяется суммой энергий прямых и зеркальных лучей, перешедших в отраженную диффузную составляющую при отражении лучей от m -ой поверхности i -го объема, являющейся частью поверхности канала,

$$W_m^{\text{д}} = (1 - \alpha_m)(1 - \xi_m) \left(\sum_{k=1}^K W_{ki}^{\text{з}} + \sum_{k=1}^K W_{ki}^{\text{np}} \right), \quad (4.7)$$

где K – количество прямых лучей или зеркально отраженных лучей, упавших на m -ю поверхность i -го объема; ξ_m – доля зеркальной энергии, направляемая по лучу после его отражения от m -ой поверхности воздуховода.

Определение интенсивности звуковой энергии, излучаемой стенками воздуховода в пространство технологических потолков.

На этом этапе для определения звуковой энергии, излучаемой стенками воздуховода вначале производится вычисление падающей на его внутренние стенки энергии. На каждой поверхности i -го объема воздуховода величина интенсивности падающей энергии определяется как:

для прямой энергии

$$I_{\text{пад}i}^{\text{np}} = \left(\sum_{m=1}^M \frac{W}{N} \exp(-m_{\text{г}} R_{mi}) \cos \theta_{mi} \right) / F_i; \quad (4.8)$$

для зеркально отраженной энергии

$$I_{\text{пад}i}^{\text{з}} = \left(\sum_{m=1}^M \frac{W}{N} \exp(-m_{\text{г}} R_{mi}) \prod_{p=1}^P [(1 - \alpha_p) \xi_p]^{D_p} \cos \theta_{mi} \right) / F_i; \quad (4.9)$$

для диффузно отраженной энергии

$$I_{\text{пад}i}^{\text{д}} = \varepsilon_i^{\text{д}} c / 2(2 - \alpha_i). \quad (4.10)$$

В формулах (4.8) - (4.10): M - количество прямых или зеркально отраженных лучей, падающих на поверхность F_i стенки воздуховода i -го элементарного объема; θ_{mi} - угол между падающим на стенку m -м лучом и нормалью к поверхности стенки в i -ом элементарном объеме; α_i - коэффициент звукопоглощения стенки воздуховода i -го объема, $\varepsilon_i^{\text{д}}$ - рассчитанная плотность диффузно отраженной звуковой энергии в i -ом элементарном объеме; W – звуковая мощность источника, N – количество лучей, исходящих из источника; $m_{\text{г}}$ – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе, м^{-1} ; R_{mi} – расстояние, прошедшее m -м лучом от источника звука до i -го элементарного объема, м; α_p – коэффициент звукопоглощения p -й поверхности ограждения, на которую падал m -й прослеживаемый луч; P – общее число актов отражения m -го луча от всех отражающих поверхностей, встречающихся на его пути в процессе

распространения его на расстояние R_{mi} до поверхности i -го элементарного объема; D_p – число актов падения m -го луча на p -ю поверхность в процессе распространения его на расстояние R_{mi} ; ξ_p – доля энергии, направляемая по m -му лучу после его отражения от p -ой поверхности ограждения.

Суммарная падающая интенсивность звуковой энергии определяется как

$$I_{\text{пад}i}^{\text{сум}} = I_{\text{пад}i}^{\text{пр}} + I_{\text{пад}i}^3 + I_{\text{пад}i}^{\text{д}} \quad (4.11)$$

Интенсивность излучаемой с поверхности стенки воздуховода звуковой энергии при известной ее звукоизоляции будет определяться как

$$I_{\text{из}i} = I_{\text{пад}i}^{\text{сум}} \cdot \tau, \quad (4.12)$$

где τ – коэффициент звукопроницаемости стенки воздуховода.

Как видно из формул (4.8) – (4.10) в общем случае звуковая энергия, излучаемая воздуховодом в пространство потолка, не постоянна по его длине. Однако, при практических расчетах можно принимать среднюю величину интенсивности, определяемую как

$$I_{\text{ср из}} = \sum_{i=1}^N I_{\text{из}i} / l_{\text{с}}, \quad (4.13)$$

где N – число элементарных объемов на которые был разбит участок воздуховода, проходящего через потолок; $l_{\text{с}}$ – общая длина воздуховода в пространстве потолка.

Так как воздуховод излучает звуковую энергию в пространство потолка, как правило, одной боковой стенкой, излучаемая им погонная мощность будет равна $P'_{\text{ср}} = I_{\text{ср из}} \cdot a$, Вт/м, где a – высота стенки.

Расчет прямого звука, распространяющегося в пространстве потолка от воздуховода.

Излучение звуковой энергии с поверхности воздуховода в воздушную среду потолка согласно [70] принято соответствующей закону Ламберта.

Ниже приведены расчетные формулы для определения плотности звуковой энергии от участка воздуховода, схема которого приведена на рисунке 4.2. Для упрощения координатная плоскость XOY совмещена с расчетной точкой, когда $z_T = 0$.

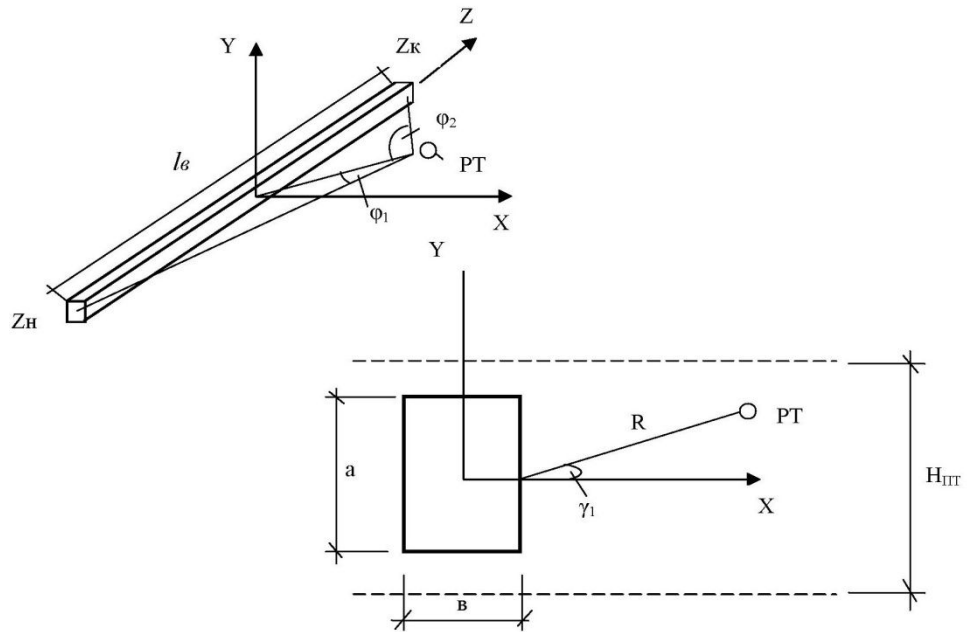


Рисунок 4.2 - Схема к расчету уровней прямого шума от прямоугольного воздуховода: $H_{\text{ПТ}}$ - высота пространства потолка.

В этом случае плотность энергии прямого звука в расчетной точке от участка воздуховода длиной l_e с координатами Z_H и Z_K будет определяться как

$$\varepsilon_{np} = \frac{p'_{cp}}{\pi c R} \cos \gamma_1 (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1), \quad (4.14)$$

Для определения $\sin \varphi$ принято

$$\sin \varphi_1 \approx \frac{Z_H}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2}}; \quad \sin \varphi_2 \approx \frac{Z_K}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2}}$$

где x_T, y_T, z_T - координаты расчетной точки.

В дальнем поле, когда $H_{\text{ПТ}} \ll x_T$ и $H_{\text{ПТ}} \ll y_T$, $R = \sqrt{x_T^2 + y_T^2}$.

Уровень звукового давления в расчетной точке определяется как

$$L_{np} = 10 \lg \frac{p'_{cp}}{\pi R I_0} \cos \gamma_1 (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) \quad (4.15)$$

Расчет отраженного шума, образующегося в пространстве потолка от звуковой энергии, излучаемой воздуховодом и от звуковой энергии, приходящей через потолок из «шумного» помещения.

Как сказано ранее, отраженное шумовое поле в пространстве потолка формируется за счет отражений прямого звука от поверхностей потолка и за счет шума, проникающего из помещения с источником в пространство потолка. Характер отражения звука от всех поверхностей потолка принят диффузным.

Пространство потолка по геометрическим пропорциям относится к плоским помещениям, в которых согласно ранее выполненным исследованиям Леденева В.И. [54], Антонова А.И. [11], Матвеевой И.В. [60] плотность отраженной энергии по высоте пространства остается постоянной, но изменяется в плоскости. Отраженное поле в этом случае является двухмерным. Для него характерны признаки квазидиффузного поля, при котором не обеспечивается равенство отраженной звуковой энергии по пространству потолка, но соблюдается признак диффузности по изотропности прихода отраженной звуковой энергии в расчетные точки со всех возможных направлений.

В этом случае между плотностью потока $\bar{q}$ и градиентом плотности отраженной звуковой энергии существует связь в виде выражения (3.1)

$$\bar{q} = -0.5cl_{cp} \text{grad } \varepsilon$$

и плотность отраженной звуковой энергии при стационарном режиме работы источников шума описывается дифференциальным уравнением

$$0.5cl_{cp} \nabla^2 \varepsilon + cm_{\varepsilon} \varepsilon = 0 \quad (4.16)$$

где ∇^2 - оператор Лапласа.

Для решения уравнения задаются граничные условия. В данном случае на границах потолка задаются плотности потоков звуковой энергии, которые включают плотности потоков, возникающих при оттоке энергии за счет поглощения звука на ограждениях и притоке энергии за счет первых отражений прямого звука от источников шума, расположенных в пространстве потолка, а также энергии, проникающей в пространство потолка из помещений с источниками шума.

Граничные условия над «шумным» помещением имеют вид

$$q|_{ds} = \frac{-c\alpha_n}{2(2-\alpha_n)} \varepsilon \Big|_{ds} + (1-\alpha) I_{np} \Big|_{ds} + \frac{I_0 10^{0.1(L_m - R_{msh})}}{2(2-\alpha_{msh})} \Big|_{ds}, \quad (4.17)$$

где α_n, α_{msh} - коэффициенты звукопоглощения элемента поверхностей потолка сверху и со стороны шумного помещения; I_{np} - интенсивность прямого звука, приходящего от воздухопровода и падающего на элемент ограждения ds ; R_{msh} - звукоизоляция потолка над «шумным» помещением.

В граничных условиях над помещениями без собственных источников шума третий член в правой части формулы (4.17) отсутствует. Интенсивность $I_{\text{пр}}$ находится по рассмотренной выше методике расчета прямого звука от воздуховода с учетом угла падения прямого звука на элемент ограждения ds .

Уравнение (4.16) с граничными условиями (4.17) представляет собой математическую модель распределения в пространстве потолка отраженной звуковой энергии. Для ее реализации удобно применить численный статистический энергетический метод [53]. При его использовании все пространство потолка делится на элементарные параллелепипеды с высотой, равной высоте потолка. Для каждого элементарного объема составляется уравнение баланса отраженной звуковой энергии. В этом случае значения производных плотности заменяются приближенными значениями через разности значений плотности звуковой энергии в соседних параллелепипедах ε_{ij} . Общее распределение плотности отраженной энергии находится из решения системы алгебраических уравнений.

Баланс отраженной энергии для каждого i -го элементарного параллелепипеда в общем виде записывается как

$$\sum_{n=1}^N q_n S_n + \sum_{m=1}^{6-N} q_m S_m - c m_\varepsilon \varepsilon_{ij} V_{ij} = 0 \quad (4.18)$$

Здесь q_n - плотность потоков отраженной энергии между i, j - м объемом и соседними объемами, контактирующими с ним через поверхности S_n , их соединяющие; q_m - плотность потока звуковой энергии на m -ой поверхности объема, являющейся поверхностью ограждения помещения с площадью S_m , рассчитывается по выражению (4.17); N - количество объемов, контактирующих i, j - м объемом; $6-N$ - количество граней i, j -го объема, являющихся поверхностями ограждений; V_{ij} - объем элементарного параллелепипеда; ε_{ij} - плотность отраженной энергии в i, j - м объеме.

Плотность потоков энергии q_n определяются как

$$q_n = -0.5c\bar{l}(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_n)/h_n, \quad (4.19)$$

где индекс $n \in \{i-1, j; i+1, j; i, j-1; i, j+1\}$; h_n - расстояние между центрами i, j - го объема и контактирующих с ним объемов в направлении n .

Алгоритм численного метода реализован в компьютерной программе. Особенностью рассмотренного метода является учет в граничных условиях (4.17) интенсивности поступления энергии в объем через первые отражения прямого звука, а также учет в них интенсивности звуковой энергии, проникающей в пространство потолка из нижних смежных помещений через его конструкцию.

Уровень шума в «шумном» помещении при работе в нем точечного источника шума рассчитывается по формуле

$$L_{ш} = L_w + 10 \lg \left(\frac{\Phi}{\Omega r^2} + \frac{4(1 - \bar{\alpha})}{\bar{\alpha} S} \right), \quad (4.20)$$

L_w - уровень акустической мощности локального источника шума, дБ; r - расстояние от источника до расчетной точки на поверхности потолка; Φ - фактор направленности излучения шума источником; Ω - пространственный угол излучения шума; $\bar{\alpha}$ - средний коэффициент звукопоглощения ограждений помещения; S - площадь ограждений «шумного» помещения.

Расчет уровней шума, проникающего из пространства потолка в ниже лежащие помещения.

После определения энергетических параметров отраженного и прямого шума, образующегося в пространстве потолка, определяется суммарная звуковая энергия в каждой расчетной точке пространства. Эти сведения позволяют определить величину шума, проникающего через потолок в любое помещение системы.

Средний уровень звукового давления в таких соразмерных помещениях можно рассчитать по формулам диффузного поля. При этом уровень акустической мощности шума, поступающего через потолок, следует определять по формуле

$$L_{wп} = 10 \lg \left(\frac{1}{W_0} \sum_{k=1}^K \frac{\varepsilon_k c 10^{-0.1 R_{пк}}}{2(2 - \alpha_{п})} \Delta S_k \right), \quad (4.21)$$

где K - количество участков технологического потолка, через которые передается шум; ΔS_k - площадь k -го элементарного участка потолка, m^2 ; $R_{пк}$ - звукоизоляция k -го участка потолка, дБ; ε_k - суммарная рассчитанная плотность звуковой энергии перед k -м участком потолка, $Дж/м^3$; $W_0 = 10^{-12}$ Вт - пороговое значение акустической мощности; $\alpha_{п}$ - коэффициент звукопоглощения k -ой поверхности потолка.

В приведенной методике не учитывается обратная акустическая связь таких помещений с пространством потолка. Связано это с тем, что, как показано в главе 2, влияние на шумовой режим возвращения звуковой энергии из «тихого» помещения обратно в «шумное» помещение минимально и им без существенных погрешностей можно пренебречь.

Таким образом, произведя расчеты для всех октавных полос частот, можно определить уровни шума в помещениях для всего нормируемого диапазона частот, установить соответствие уровней допустимым значениям и, в случае их превышения, произвести изменения в звукоизоляции конструкции потолка и / или стенок воздуховода.

Разработанная компьютерная программа используется в настоящее время в НТЦС ТГТУ и в НИИ строительной физики РААСН при решении задач по проектированию шумозащитных мероприятий снижения шума в зданиях с потолками технологического назначения.

Ниже в качестве примера приведены результаты практической реализации предложенной в работе методики. По заданию Научно-технического центра по проблемам строительства Тамбовского государственного технического университета (НТЦС ТГТУ) произведены расчеты шума в выгораживаемой части офисного помещения, имеющего общий технологический потолок, в котором размещен транзитный воздуховод. Шум в пространство потолка попадает также из шумного технического помещения офиса. Схема офисного помещения в уровне технологического потолка приведена на рисунке 4.3.

Общие размеры офисного помещения 36х24х3 м. На схеме рисунка 4.3 показана привязка только необходимых для расчета помещений, то есть помещения, из которого в технологический потолок при работе технологического оборудования излучается звуковая энергия и проектируемого защищаемого от шума помещения Т1. На схеме также дана привязка «тихого» офисного помещения Т2, расположенного рядом с «шумным» помещением. Высота пространства технологического потолка согласно заданию равна 0.7 м. Транзитный воздуховод, выполненный из стали толщиной 1мм, имеет квадратное сечение 300х300 мм.

Ниже приведены расчеты для октавной полосы с $f_{cp}=1000$ Гц.

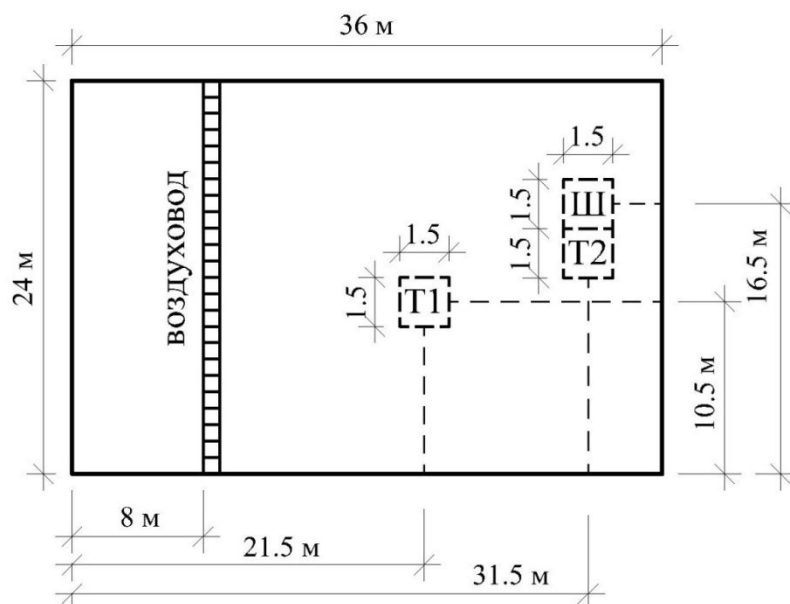


Рисунок 4.3 – Схема офисного помещения в уровне технологического потолка с привязкой воздуховода, «шумного» Ш и выгораживаемого «тихого» Т1 помещений и существующего «тихого» Т2 помещения.

Звукоизоляция стенки воздуховода в октавной полосе с $f_{cp} = 1000$ Гц составляет 29 дБ. Средние коэффициенты звукопоглощения помещений в этой полосе частот равны $\alpha = 0.14$, а средний коэффициент ограждений внутри потолка $\alpha_n = 0.10$. Акустическая мощность в воздуховоде на входе в пространство потолка офиса в исследуемой полосе частот составляет 85.6 дБ, а общий уровень акустической мощности излучаемой воздуховодом в пространство потолка равен 75.6 дБ. При расчетах учтено, что согласно [29] затухание акустической мощности в воздуховоде составляет 0.2 дБ/м. Акустическая мощность источника, работающего в «шумном» помещении, равна 80.5 дБ. Нормативный уровень в защищаемом помещении в полосе частот с $f_{cp} = 1000$ Гц равен 45 дБ. Исходная звукоизоляция конструкций потолка при расчетах принята равной 5 дБ.

Расчеты выполнены при совместном действии двух источников шума, а также по отдельности от шума воздуховода и от шума локального источника, размещенного в «шумном» помещении.

В таблице 4.1 приведены результаты расчетов шума в проектируемом «тихом» помещении Т1 и в «тихом» помещении Т2, расположенном рядом с «шумным» помещением. Расчеты произведены для различных вариантов высоты пространства потолка при разном звукопоглощении ограждений потолка и при разной звукоизоляции потолка над «шумным» помещением.

Таблица 4.1 - Результаты расчета шума в проектируемом «тихом» помещении Т1 и «тихом» помещении Т2

Расчетная ситуация			Уровни шума в «тихих» помещениях Т1 и Т2, дБ		
$H_{пт}$, м	$\alpha_{пт}$	$R_{пш}$	от воздуховода	от «шумного» помещения	от общего воздействия воздуховода и «шумного» помещения
«Тихое» помещение Т1					
0.5	0.10	5.0	38.6	45.7	46.5
0.7	0.10	5.0	43.2	49.7	50.6
0.7	0.20	5.0	38.9	45.3	46.2
0.7	0.10	10.0	43.2	44.7	47.0
0.7	0.10	15.0	43.2	39.7	44.8
1.0	0.10	5.0	46.7	52.4	53.5
«Тихое» помещение Т2					
0.7	0.10	5.0	32.5	64.2	64.2
0.7	0.20	5.0	28.8	62.7	62.7
0.7	0.10	10.0	32.5	59.2	59.2
0.7	0.10	15.0	32.5	54.2	54.2
0.7	0.20	15.0	28.8	52.7	52.7
1.0	0.10	5.0	37.9	63.3	63.3
1.0	0.10	15.0	37.9	53.3	53.4

Как видно из таблицы 4.1, для обеспечения нормативных требований в проектируемом помещении необходимо, чтобы звукоизоляция потолка над «шумным» помещением была не ниже 15 дБ. Следует отметить, что такой звукоизоляции будет недостаточно для защиты «тихого» помещения Т2, расположенного рядом с «шумным» помещением. В этом случае необходимо также повысить звукоизоляцию потолка над «тихим» помещением Т2 как минимум до 12 дБ.

Карты шумового поля для случая, когда звукоизоляция потолка над «шумным» помещением равна 15 дБ приведены на рисунке 4.4.

Таким образом, из данного практического примера видно, что предложенная методика обеспечивает возможность проектировать защиту от шума, распространяющегося через пространства потолка, путем изменения высоты

пространства, его акустических характеристик и звукоизоляции конструкции потолка.

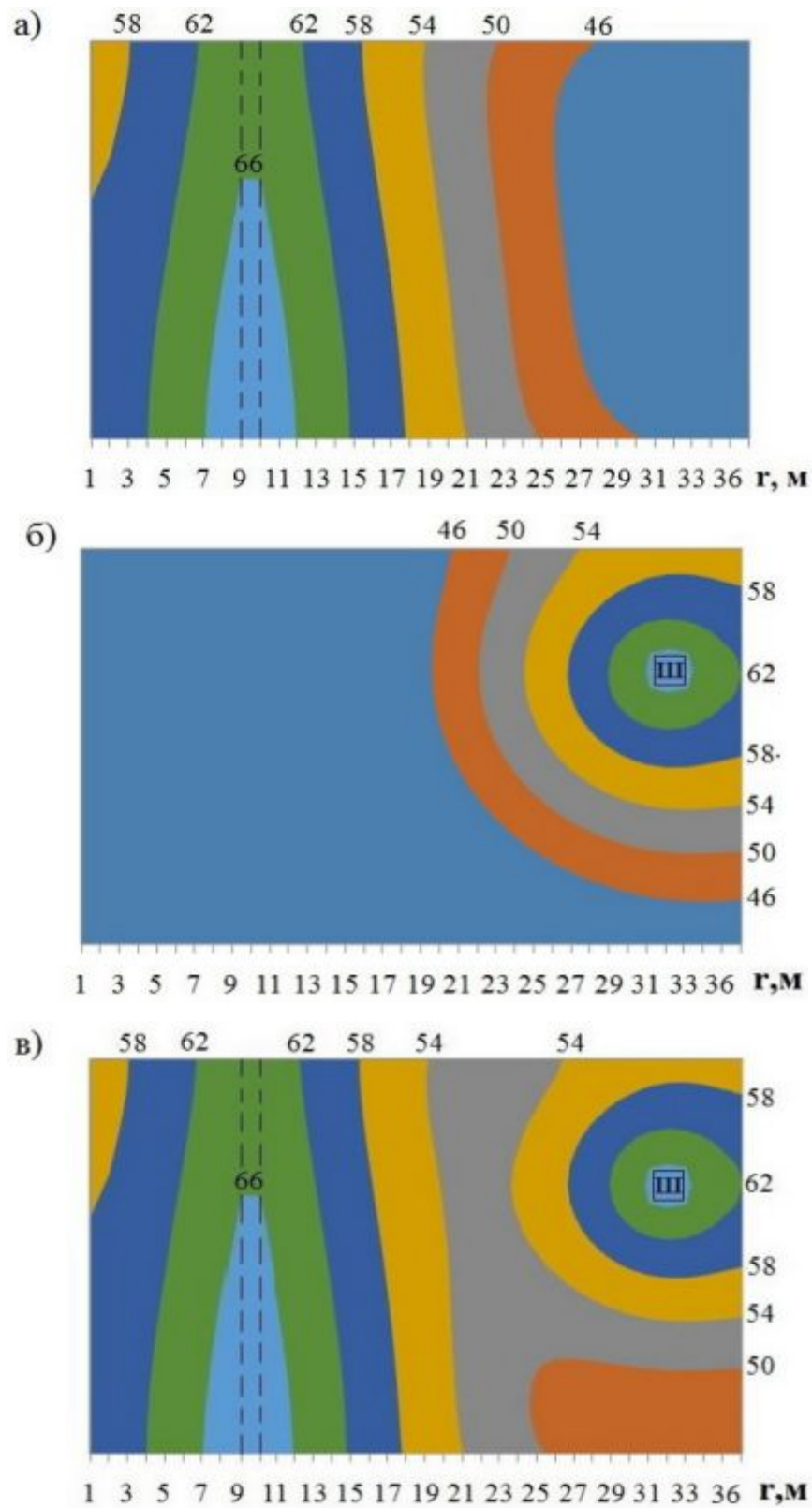


Рисунок 4.4 – Шумовые карты в пространстве технологического потолка в октавной полосе с $f_{cp} = 1000$ Гц: а) от воздуховода; б) от «шумного» помещения; в) от совместного действия двух источников шума.

4.2 Расчет шума в системах помещений с перегородками неполной высоты, связанных через общее воздушное пространство

4.2.1 Выбор расчетной модели для оценки распространения шума в помещениях с перегородками неполной высоты

В современных офисных помещениях широкое распространение находят планировки, при которых общее пространство разделяется на отдельные объемы, как правило, небольших размеров. Отдельные объемы выделяются перегородками неполной высоты, которые в процессе эксплуатации при изменении планировок могут легко трансформироваться. Такие планировочные решения присущи, например, юридическим и банковским офисам, многофункциональным центрам по обслуживанию населения, торговым учреждениям с бутиками различного назначения и т.д. Подобные планировки имеют также квартиры-студии.

Так как отдельные объемы разделяются ограждениями неполной высоты, над ними имеется общее воздушное пространство. С точки зрения распространения воздушного шума такие планировочные решения относятся к системам акустически связанных помещений, связь в которых осуществляется в основном за счет распространения звуковой энергии в общем над выгороженными объемами пространстве. В этом случае возникающая в одном из отдельных объемов звуковая энергия может распространяться на достаточно большие расстояния через общее воздушное пространство и создавать неблагоприятный шумовой режим в ниже лежащих объемах.

При таких условиях распространения звуковой энергии в отдельных объемах образуется шумовой фон, который может иметь как отрицательное, так и положительное значение. В случае высоких уровней шумового фона ухудшается разборчивость речи, увеличивается утомляемость работающих, снижается их работоспособность, возрастает количество ошибок, например, при наборе текста на компьютере, проведении банковских операций и т.п. В тоже время, в офисах, где требуется высокий уровень конфиденциальности, например, при разговорах с

клиентами в юридических и банковских офисах, необходимо иметь определенный уровень общего шумового фона, обеспечивающий требуемую степень конфиденциальности.

Обеспечение требуемого шумового режима при таких планировочных решениях возможно: за счет изменения объемно-планировочных параметров выгороженных объемов, например, путем изменения высоты перегородок; за счет повышения звукоизоляции перегородок; за счет изменения звукопоглощающих характеристик выгородок и ограждений над общим воздушным пространством.

Выбор перечисленных мероприятий должен производиться на основе акустических расчетов, оценивающих распространение звуковой энергии в общем воздушном пространстве над перегородками и формирование шумового режима в выгораживаемых объемах. Для этого необходим метод расчета, разработанный на основе расчетной модели, наиболее полно учитывающей факторы, влияющие на формирование прямой и отраженной звуковой энергии в таких геометрически и акустически сложных системах планировок.

Выполненный в первой главе анализ расчетных моделей с точки зрения возможности их применения для разработки методов, пригодных для расчетов шума в таких системах, показал, что наиболее приемлемыми в этом случае являются модели, в которых при оценке отраженной звуковой энергии используются геометрические и статистические представления о формировании отраженных звуковых полей помещений. При выборе модели в каждом конкретном случае, как правило, исходят из геометрических пропорций помещений и характера отражения звука от ограждений.

В случае зеркального характера отражения звука в независимости от сложности общей геометрической формы акустически связанных помещений может быть использован метод прослеживания лучей [87,89,122]. Метод может также использоваться и при диффузном отражении от ограждений [88,95]. Метод имеет высокую эффективность при выполнении исследовательских задач [63,121,128]. В тоже время ему присущи два существенных недостатка, ограничивающих его применение при решении практических задач, а именно, высокая трудоемкость и нестабильность полученных результатов при повторных расчетах, и особенно, в случае диффузного отражения звука. Недостатки

исключены в расчетной модели, основанной на статистическом энергетическом подходе [52]. Численный расчетный метод, разработанный для реализации данной модели, позволяет при диффузном отражении звука от ограждений и любой сложной форме связанных помещений производить расчеты распределения отраженной звуковой энергии [50,51]. Недостатком метода является невозможность использования его при зеркальном отражении звука от ограждений.

При многочисленных исследованиях [17,20,30,57,59,76] установлено, что для большинства реальных ситуаций отражение звука от ограждений имеет смешанный зеркально-диффузный характер. С использованием зеркально-диффузной модели отражения звука разработаны эффективные методы расчета шума в производственных помещениях при постоянном и непостоянном шумовых режимах [20,34,57,76]. Модель зеркально-диффузного отражения использована нами при разработке метода расчета распространения звуковой энергии в воздушных каналах системы вентиляции зданий [28]. В настоящей работе эта модель использована при разработке метода расчета шума в помещениях с коридорной и ячейково-коридорной системами планировки, а также при разработке методики расчета шума в пространстве технологического потолка. Учитывая положительный опыт ее использования, она может быть применена и при разработке методики расчета шума в системах планировки с общим воздушным пространством.

В данном случае должна быть использована комбинированная расчетная модель, в которой, учитывая сложную геометрическую форму планировки систем помещений с общим воздушным пространством оценка распределения зеркальной отраженной энергии производится методом прослеживания лучей, а диффузно рассеянной энергии численным статистическим энергетическим методом.

Выполненные ранее исследования точности рассмотренных выше методов [11] показали, что для соразмерных помещений правильной формы результаты расчетов, выполненных геометрическими методами при зеркальной модели отражения, хорошо согласуются с результатами расчетов, полученных статистическими методами. Это объясняется тем, что средние длины пробега лучей и в том и другом случае близки между собой, и следовательно, процессы реверберации, в результате которых образуются отраженные звуковые поля,

удовлетворительно оцениваются в обоих случаях. Так как системы планировок с перегородками неполной высоты имеют в основном соразмерные объемы, следует ожидать, что расчеты указанными выше методами будут совпадать между собой и с расчетами, полученными комбинированным методом при зеркально-диффузном отражении звука. При наличии в системах несоразмерных помещений целесообразно использовать комбинированную расчетную модель, которая может также быть использована и при зеркальной и диффузной моделях отражения.

4.2.2 Расчетная модель шумового поля, образующегося в системе акустически связанных помещений с перегородками неполной высоты и численные методы ее реализации при зеркальной, диффузной и зеркально-диффузной моделях отражения звука от ограждений

Уровень звукового давления в любой i -ой точке отдельного объема системы с источником шума определяется прямой и отраженной составляющими звуковой энергии, имеющейся в этом объеме. В других объемах системы без источников уровни определяются только отраженной составляющей звуковой энергии.

Расчет плотности прямой звуковой энергии $\mathcal{E}_i^{\text{пр}}$, в случае источников небольших размеров (точечных источников), как правило, не представляет собой трудностей. Расчет прямого звука от линейных, плоских и объемных источников более сложен. Для этого можно использовать предложенные в работах [12,15,16] методы, учитывающие форму источников и характер излучения ими звуковой энергии.

Распределение отраженной звуковой энергии определяется более сложными пространственными закономерностями. Как показано выше, для расчета шума в системах помещений, имеющих общее воздушное пространство, наиболее приемлемо использование комбинированной расчетной модели, дающей возможность производить расчеты не только при зеркально-диффузном характере отражения звука, но и выполнять их отдельно при зеркальной и диффузной моделях отражения. Такой подход удобен для разработки универсальной

компьютерной программы, позволяющей производить расчеты в одном вычислительном пространстве при разных моделях отражения звука.

В наиболее общем случае при зеркально-диффузном отражении звука суммарная плотность отраженной звуковой энергии в любой i -ой точке помещения определяется плотностями зеркально ε_i^3 и диффузно отраженной энергии ε_i^d и, соответственно, суммарный уровень звукового давления вычисляется как

$$L_i = 10 \lg [c(\varepsilon_i^{\text{пр}} + \varepsilon_i^3 + \varepsilon_i^d) / I_0] \quad (4.22)$$

Суть предлагаемой для этой цели модели заключается в следующем.

Все отдельные объемы и общее воздушное пространство системы помещений с перегородками неполной высоты делятся на элементарные объемы (см. рисунок 4.5). При разделении учитывается положение и размеры перегородок, между отдельными объемами и размеры общего воздушного пространства.

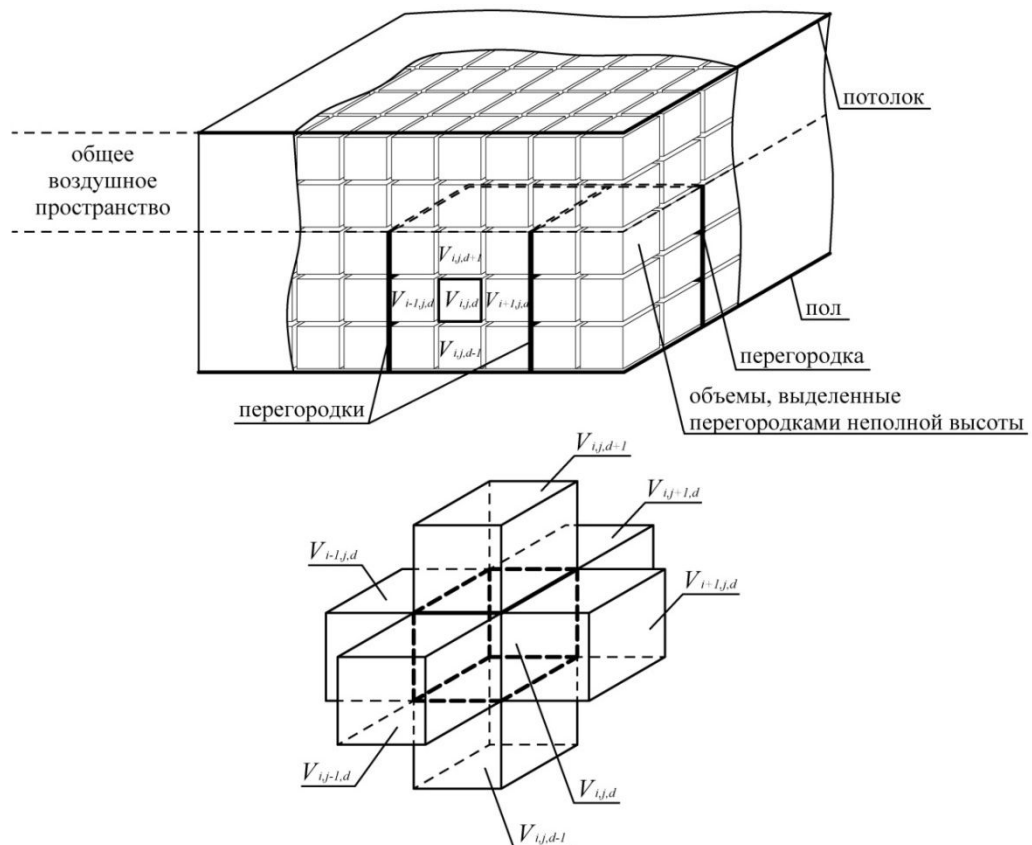


Рисунок 4.5 - Схема разбиения системы на элементарные объемы

Далее принимается, что из источника звука в соответствии с его диаграммой направленности вероятностным образом излучается определенное количество лучей, каждый из которых несет часть звуковой энергии источника. Энергия всех лучей равна общей энергии, излучаемой источником. Каждый луч прослеживается

до встречи с поверхностью ограждения. При отражении от поверхности одна часть сохранившейся после поглощения энергии отражается по зеркальному закону, а другая часть отражается диффузно по закону Ламберта. Отразившаяся зеркально энергия прослеживается до следующего акта отражения, при котором после отражения опять происходит переход части зеркальной энергии в диффузную. Каждый луч прослеживается до тех пор, пока полностью потеряет энергию за счет поглощения на поверхностях, затухания в воздухе и перехода части зеркальной энергии в диффузную.

Таким образом, прослеживаются все исходящие из источника лучи. После этого производится суммирование зеркально отраженной энергии всех лучей, прошедших через расчетную точку. Распределение энергии лучей, перешедшей в диффузно отраженную энергию, оценивается численным методом, основанным на статистическом энергетическом подходе.

Ниже рассмотрены основные принципы построения расчетных методов, входящих в комбинированную модель, и методики их использования при оценке шума в связанных помещениях с перегородками неполной высоты.

Для оценки плотности прямой звуковой энергии $\mathcal{E}_i^{\text{пр}}$ и плотности зеркально отраженной звуковой энергии $\mathcal{E}_i^3$ в расчетной модели используется метод прослеживания звуковых лучей (ray tracing). Метод дает возможность моделировать процессы распространения звуковой энергии, исходящей из источника в виде звуковых лучей. В модели используется метод прослеживания лучей, в котором рассматриваются лучи, имеющие бесконечно малые пространственные углы распространения. В этом случае звуковая мощность, переносимая прямым звуком от всех k -х лучей, прошедших через i,j,d -й элементарный объем, находящийся в прямой видимости источника шума, определяется как

$$W_{i,j,d}^{\text{пр}} = \sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp(-m_g R_{ki,j,d}) \quad (4.23)$$

где W - общая мощность источника; N - количество лучей, исходящих из источника; K - общее количество лучей, прошедших через i,j,d -й источник; $R_{ki,j,d}$ - расстояние, прошедшее k -м прямым лучом до i,j,d -го объема.

Плотность энергии прямого звука в i,j,d -м объеме в этом случае определяется как

$$\varepsilon_{i,j,d}^{\text{пр}} = W_{i,j,d}^{\text{пр}} / cS_{\text{пр}}, \quad (4.24)$$

где $S_{\text{пр}}$ - приведенная площадь сечения i,j,d -го объема, принимаемая при равной площади поперечного сечения сферы, одинаковой по объему с i,j,d -м объемом.

Для зеркально-отраженной энергии звуковая мощность, переносимая звуковыми лучами, прошедшими через i,j,d -й объем, определяется как

$$W_{i,j,d}^3 = \sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp(-m_{\varepsilon} R_{ki,j,d}) \prod_{p=1}^P [(1 - \alpha_p) \xi_p]^{D_{kp}} \quad (4.25)$$

где $R_{ki,j,d}$ - расстояние прохождения k -го зеркально отраженного луча от первого отражения до прохода в расчетный i,j,d -й элементарный объем; P - общее число актов отражения k -го луча от всех отражающих поверхностей, встречающихся на его пути в процессе распространения на $R_{ki,j,d}$ до i,j,d -го элементарного объема; α_p - коэффициент звукопоглощения p -й поверхности, на которую падает прослеживаемый луч; D_{kp} - число актов падения k -го луча на p -ю поверхность в процессе его распространения на расстояние $R_{ki,j,d}$; ξ_p - доля энергии, направляемая по k -му лучу после его отражения от p -й поверхности ограждения.

Количество зеркально-отраженной энергии в i,j,d -м объеме равно сумме энергий лучей K , проходящих через него. Плотность ее определяется как

$$\varepsilon_{i,j,d}^3 = \sum_{k=1}^K W_{i,j,d}^3 / cS_{\text{пр}} \quad (4.26)$$

Расчет диффузно отраженной энергии выполняется численным статистическим энергетическим методом.

Уравнение распределения диффузно отраженной энергии для имеет вид

$$\eta \nabla^2 \varepsilon^d + c m_{\varepsilon} \varepsilon^d = 0 \quad (4.27)$$

На границах всего объема системы акустически связанных общим воздушным пространством помещений происходит отток диффузно отраженной энергии за счет поглощения ее ограждениями и приток энергии за счет ее поступления при переходе части энергии в диффузную при отражении прямого звука и зеркально отраженного звука от ограждений. Граничные условия для решения уравнения (4.27) в этом случае имеет вид

$$q|_{ds} = -\frac{c\alpha_s}{2(2-\alpha_s)}\varepsilon\Big|_{ds} + (1-\alpha_s)I^{\text{пр}}\Big|_{ds} + (1-\alpha)I^3\Big|_{ds} \quad (4.28)$$

Величины $I^{\text{пр}}$, I^3 определяются с учетом выражений (4.23) и (4.25) и угла падения лучей прямого звука и зеркально отраженных лучей на элемент ограждения ds .

При численном решении уравнения (4.27) с граничными условиями (4.28) для каждого объема составляется уравнение баланса отраженной звуковой энергии. Общее распределение плотности отраженной энергии находится из решения полученной системы алгебраических уравнений.

Баланс отраженной энергии для каждого i,j,k -го элементарного объема с учетом поглощения звука в воздухе в общем виде записывается как

$$\sum_{d=1}^n q_n S_n + \sum_{m=1}^{6-N} W_m^{\text{д}} - \sum_{m=1}^{6-N} q_{(\alpha)_m} S_m - cm_{\varepsilon} \varepsilon_{i,j,d}^{\text{д}} V_{i,j,d} = 0. \quad (4.29)$$

Здесь q_n - плотности потоков энергии между i,j,d -м объемом и соседними контактирующими с ним объемами через поверхности S_n ; $W_m^{\text{д}}$ - диффузная энергия, приходящая в i,j,d -й объем после отражения лучей от m -ой поверхности i,j,d -го объема площадью S_m , являющейся поверхностью помещения; $q_{(\alpha)_m}$ - плотность потока диффузной энергии, поглощаемый на m -ой поверхности i,j,d -го объема, являющейся поверхностью ограждения S_m ; N - количество объемов, контактирующих с i,j,d -м объемом; $6-N$ - количество граней i,j,d -го объема, являющихся поверхностями ограждений; $V_{i,j,d}$ - объем i,j,d -го элементарного параллелепипеда; $\varepsilon_{i,j,d}^{\text{д}}$ - плотность диффузно отраженной энергий в i,j,d -м объеме.

Для внутренних объемов, не соприкасающихся с ограждениями, баланс отраженной энергии записывается как

$$\sum_{n=1}^6 q_n S_n - cm_{\varepsilon} \varepsilon_{i,j,d}^{\text{д}} V_{i,j,d} = 0. \quad (4.30)$$

Последние члены в уравнениях (4.29) и (4.30) показывают потери энергии в i,j,d -м объеме за счет поглощения ее в воздухе.

Плотности потоков энергии q_n определяются как

$$q_n = -\eta(\varepsilon_{i,j,d}^{\text{д}} - \varepsilon_n^{\text{д}})/h_n, \quad (4.31)$$

где $\varepsilon_n = \{\varepsilon_{i-1,j,d}; \varepsilon_{i+1,j,d}; \varepsilon_{i,j-1,d}; \varepsilon_{i,j+1,d}; \varepsilon_{i,j,d-1}; \varepsilon_{i,j,d+1}\}$; h_n – размер граней i,j,d -го объема в направлении контактирующих с ним n -х объемов.

Величина плотности потоков $Q_{(\alpha)_m}$ вычисляется по формуле

$$Q_{(\alpha)_m} = \frac{\alpha_m \cdot c \varepsilon_{i,j,d}^{\text{л}}}{2(2 - \alpha_m)}, \quad (4.32)$$

где α_m – коэффициент звукопоглощения m -ой поверхности i,j,d -го объема.

Величина $W_m^{\text{л}}$ определяется суммой энергий лучей, перешедших в отраженную диффузную составляющую при отражении лучей от m -ой поверхности i,j,d -го объема, являющейся частью поверхности ограждения,

$$W_m^{\text{л}} = (1 - \alpha_m)(1 - \xi_m) \left[\sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp(-m R_{ki,j,d}) \cos \theta_{mi,j,d} + \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp(-m R_{ki,j,d}) \cos \theta_{mi,j,d} \right], \quad (4.33)$$

где K – количество прямых лучей или зеркально отраженных лучей, упавших на m -ю поверхность i,j,d -го объема, являющейся поверхностью ограждения; ξ_m – доля зеркальной энергии, направляемая по k -му лучу после его отражения от m -ой поверхности ограждения в i,j,d -ом объеме.

При наличии между соседними элементарными объемами перегородки, разделяющей отдельные объемы системы, например, между объемами $V_{i,j,d}$ и $V_{i+1,j,d}$, плотности потоков определяются между ними как

$$q = (\eta_{i,j,d} \varepsilon_{i,j,d} - \eta_{i+1,j,d} \varepsilon_{i+1,j,d}) \tau_{i,j,d} / h_{i,j,d}, \quad (4.34)$$

где $\eta_{i,j,d} = 0.5 c l_{cp i,j,d}$; $\eta_{i+1,j,d} = 0.5 c l_{cp i+1,j,d}$; $l_{cp i,j,d}$, $l_{cp i+1,j,d}$ – средние длины пробегов лучей в помещениях, к которым принадлежат смежные объемы $V_{i,j,d}$ и $V_{i+1,j,d}$, $\tau_{i,j,d}$ – коэффициент звукопроницаемости перегородки, разделяющей помещения.

Для реализации предложенной расчетной модели разработана компьютерная программа, основанная на ниже следующей методике.

1. Все помещения системы разбивается на отдельные элементарные объемы в виде кубов или параллелепипедов со сторонами $h_{i,j,d}$ (см. рисунок 4.5). Границы объемов устанавливаются по общим границам помещений и по границам перегородок между отдельными объемами системы.

2. Определяются узловые точки объемной сетки. Каждому элементарному объему соответствует одна точка сетки

3. Производится расчет плотности энергии прямого звука для каждой точки сетки. Расчет прямого звука от источников выполняется по формулам, учитывающим вид источника, его форму, габаритные размеры, другие параметры, влияющие на распространение прямого звука.

4. Для каждой расчетной точки определяются плотности прямой энергии, пришедшей в элементарный объем. В программе расчет плотности прямой энергии производится методом прослеживания лучей по формулам (4.23) и (4.24). Имеется также возможность расчета с использованием аналитических формул.

5. Методом прослеживания для каждой расчетной точки определяются величины зеркально отраженной энергии лучей, проходящих через элементарный объем. Расчет плотности зеркально отраженной энергии производится по формулам (4.25) и (4.26).

6. Для элементарных объемов, располагающихся у границ помещений системы, находятся величины диффузной энергии, появляющейся в них при зеркально-диффузном характере отражения лучей от поверхностей ограждений. Расчет производится по формуле (4.33)

7. Для всех элементарных объемов в соответствии с формулами (4.29) и (4.30) составляются уравнения балансов диффузной энергии.

8. Через значения сеточной функции аппроксимируются члены уравнений баланса отраженной энергии для каждого объема. При этом получается система алгебраических уравнений, реализация которой позволяет получить разностное решение.

9. Для каждого элементарного объема находится суммарная плотность звуковой энергии, равная сумме плотностей прямой, зеркально отраженной и рассеянной энергий, и производится вычисление уровней звукового давления по формуле (4.22).

При использовании изложенной методики и компьютерной программы для ее реализации возможно производить оценку распределения звуковой энергии в любых по сложности системах объемов, объединенных общим воздушным пространством, и выполнять проектирование строительно-акустических средств,

необходимых для обеспечения требуемых параметров шумового режима. Программа позволяет также производить расчеты при зеркальной или диффузной моделях отражения звука.

В случае зеркальной модели отражения звука расчеты плотностей прямого звука и зеркально отраженного звука производятся, когда в формуле (4.25) значение ξ_p принято равным $\xi_p = 1$. При диффузной модели отражения звука производятся расчеты плотностей прямого звука и диффузно отраженного звука. В этом случае граничные условия (4.28) имеют вид

$$q|_{ds} = -\frac{c\alpha_s}{2(2-\alpha_s)}\varepsilon\Big|_{ds} + (1-\alpha_s)I^{\text{np}}\Big|_{ds}, \quad (4.35)$$

а величина $W_m^{\text{д}}$ определяется как

$$W_m^{\text{д}} = (1-\alpha_m)\left[\sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp(-m_e R_{ki,j,d}) \cos \theta_{mi,j,d}\right]. \quad (4.36)$$

4.3 Экспериментальные и расчетные исследования шума в системе акустически связанных помещений с перегородками неполной высоты

Для подтверждения возможности использования для расчетов шума в системах акустически связанных помещений общим воздушным пространством предложенной методики в работе выполнены экспериментальные исследования и произведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных. Экспериментальные исследования выполнены на физических моделях помещений с перегородками неполной высоты и в системе реальных помещений. Такой выбор объясняется необходимостью обеспечения при экспериментах выполнения противоречивых требований. С одной стороны необходимо обеспечить соответствие результатов измерений реальным условиям, с другой стороны требуется исследовать формирование шумовых полей при широком диапазоне изменения геометрических и акустических характеристик помещений. В этом случае исследования на моделях помещений позволяют выявить закономерности изменения энергетических характеристик полей при изменениях параметров

помещений и их акустических характеристик. Однако, полученные результаты измерений будут в известной степени отличаться от экспериментальных данных, полученных в реальных помещениях. При моделировании невозможно полностью создать условия реальных помещений с учетом сложности формы помещения, наличия мебели и оборудования, разнообразия материалов с различными звукопоглощающими и отражающими звук свойствами и т.д.

Ниже приведены результаты сравнительного анализа исследований в модельных и натурных условиях.

4.3.1 Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных в физической модели помещения с перегородками неполной высоты

Исследования звуковых полей в помещениях с перегородками неполной высоты выполнены на модели с габаритными размерами 195×77 см. Высота помещения переменная и при исследованиях принимала значения 25, 35, 45 и 55 см. Две перегородки постоянной высоты 18 см делят помещение на три равных части (см. рисунок 4.6). Пол и потолок модели выполнены из цементно-стружечных плит, вертикальные ограждения выполнены из органического стекла и цементно-стружечных плит. Для моделирования звукопоглощающей облицовки потолка использовались плиты с наклеенным пенополиуретаном толщиной 15 мм. Средний коэффициент звукопоглощения необлицованных ограждений модели в октавной полосе частот с $f_{cp}=4000$ Гц равен $\alpha_{cp}=0.06$, коэффициент звукопоглощения панелей с пенополиуретаном $\alpha_3=0.31$. Нижние расчетные точки размещались в уровне середины высоты перегородок на высоте 9 см. Уровень верхнего ряда точек принят по середине открытого пространства над перегородками.

Создание шумового режима в модели обеспечивалось шариковым источником шума, разработанным в НИИСФе и широко использованным при измерениях в модельных помещениях [46,47]. Измерение уровней звукового давления производилось шумомером ЭКОФИЗИКА-110А. Анализ результатов выполнялся с использованием специального программного обеспечения.

Сравнительный анализ выполнялся в октавной полосе с $f_{cp}=4000$ Гц, в которой длина волн меньше геометрических параметров модели и перегородок.

Исследования на моделях подобного вида в связанных помещениях выполнял в работе [109] Е. Kruzinst.

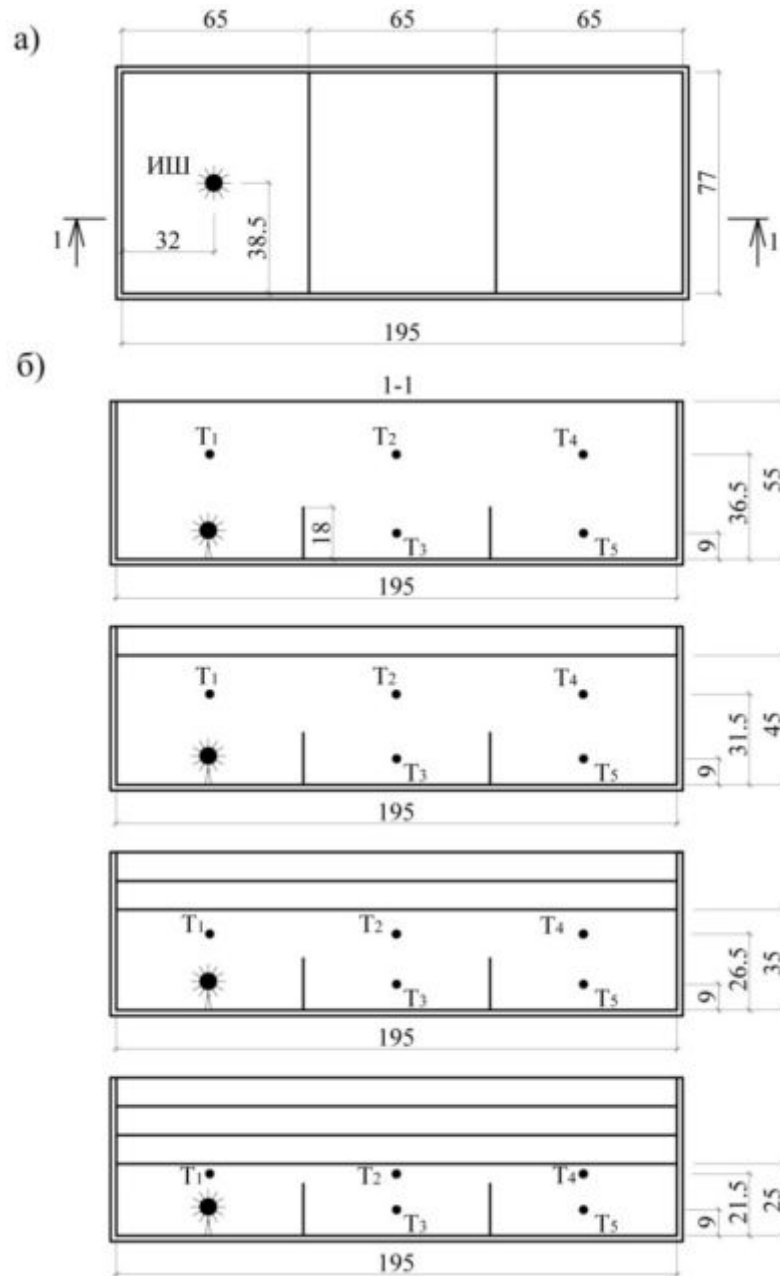


Рисунок 4.6 - Схема модели помещения с указанием положения перегородок и расчетных точек: а) - план модели; б) - сечение 1-1.

Всего произведено 8 серий экспериментов при четырех значениях высоты помещения с потолком, облицованным звукопоглощающим материалом, и без облицовки. Для оценки влияния перегородок выполнены также измерения в модели без перегородок. Все результаты измерений приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты экспериментальных исследований в физической модели помещения

Высота помещения, см	Звукопоглощение потолка	Уровни звукового давления, дБ в точках				
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Помещение без перегородок						
25	нет	110.60	108.20	107.60	107.41	107.20
	есть	106.92	105.20	104.60	104.41	104.20
35	нет	109.10	108.32	108.00	107.16	106.89
	есть	106.10	105.50	104.90	104.81	104.72
45	нет	108.40	107.89	107.80	107.69	107.60
	есть	105.40	104.89	104.80	104.70	104.76
55	нет	107.68	107.73	107.70	107.54	107.30
	есть	104.90	104.71	104.68	104.42	104.52
Помещение с перегородками						
25	нет	112.58	106.09	106.77	104.33	104.45
	есть	109.42	99.45	99.15	91.20	92.00
35	нет	110.42	106.50	107.32	104.82	104.81
	есть	107.86	102.82	102.15	98.49	97.32
45	нет	110.04	106.69	106.61	105.61	105.36
	есть	105.41	101.87	102.42	101.25	100.05
55	нет	109.56	106.78	106.80	105.78	105.09
	есть	106.87	103.32	102.15	101.01	100.02

Результаты измерений и выполненных расчетов по отдельным вариантам даны в таблицах 4.3-4.6 и на рисунках 4.7-4.10.

Расчеты производились в компьютерной программе с использованием методики, изложенной в разделе 4.2, при различных значениях величины ξ : $\xi=0$ - диффузное отражение; $\xi=1$ - зеркальное отражение; $\xi=0.1 \div 0.4$ - смешанное зеркально-диффузное отражение. В таблицах приведены результаты расчетов при зеркально-диффузном отражении с $\xi=0.2$.

Выполненный сравнительный анализ результатов показал следующее.

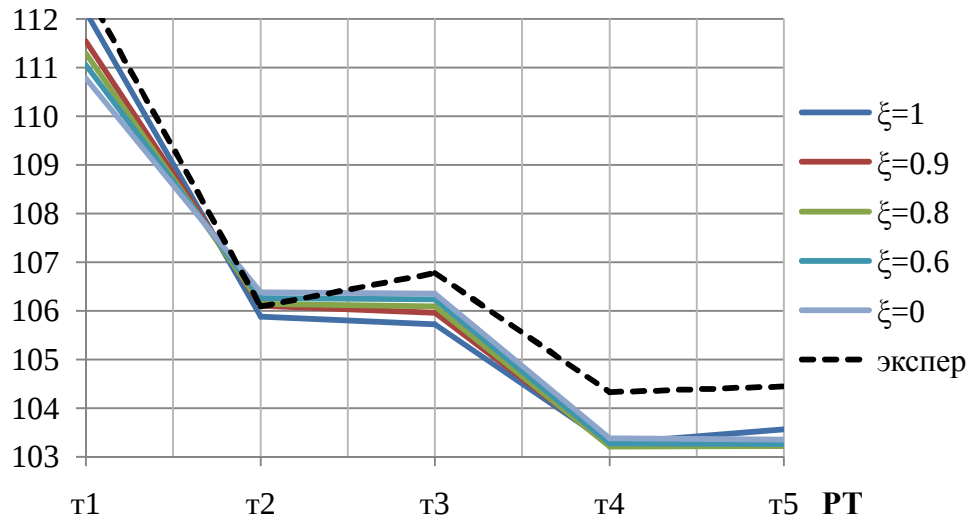
Ближняя к источнику перегородка в определенной мере выполняет роль акустического экрана для прямого звука. Перегородки располагаются на всю ширину модели и их можно рассматривать как экраны бесконечной длины. Внутри помещений экраны обычно используют для снижения прямого звука, который достаточно высок в непосредственной близости к источнику шума. По мере удаления от источника возрастает доля отраженной звуковой энергии, экранирующая роль перегородок резко снижается и, следовательно, уменьшение уровней шума и акустическая эффективность перегородок неполной высоты определяется в основном снижением ими отраженной энергии.

Таблица 4.3 - Результаты сравнения измеренных и рассчитанных уровней звукового давления в модели высотой 25 см при коэффициенте $\xi=0.8$

Характеристика		Уровни звукового давления, дБ, в точках				
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Потолок без облицовки	Измеренные уровни	112.58	106.09	106.77	104.33	104.45
	Рассчитанные уровни	111.29	106.15	106.08	103.21	103.23
Потолок с облицовкой	Измеренные уровни	109.42	99.45	99.15	91.20	92.00
	Рассчитанные уровни	107.85	99.42	99.46	93.98	93.99

а)

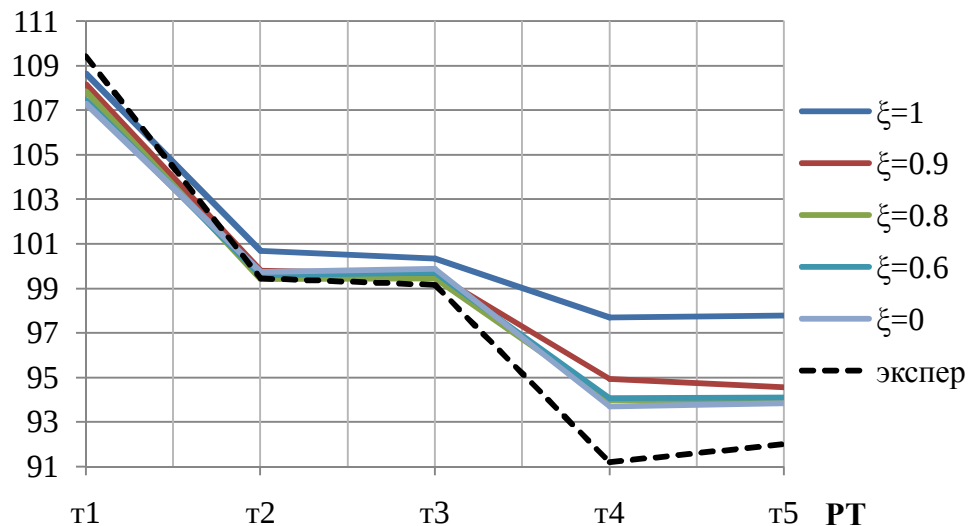
L, дБ



ξ	ΔL_{KB}
1	0.34
0.9	0.46
0.8	0.46
0.6	0.59
0	0.70

б)

L, дБ



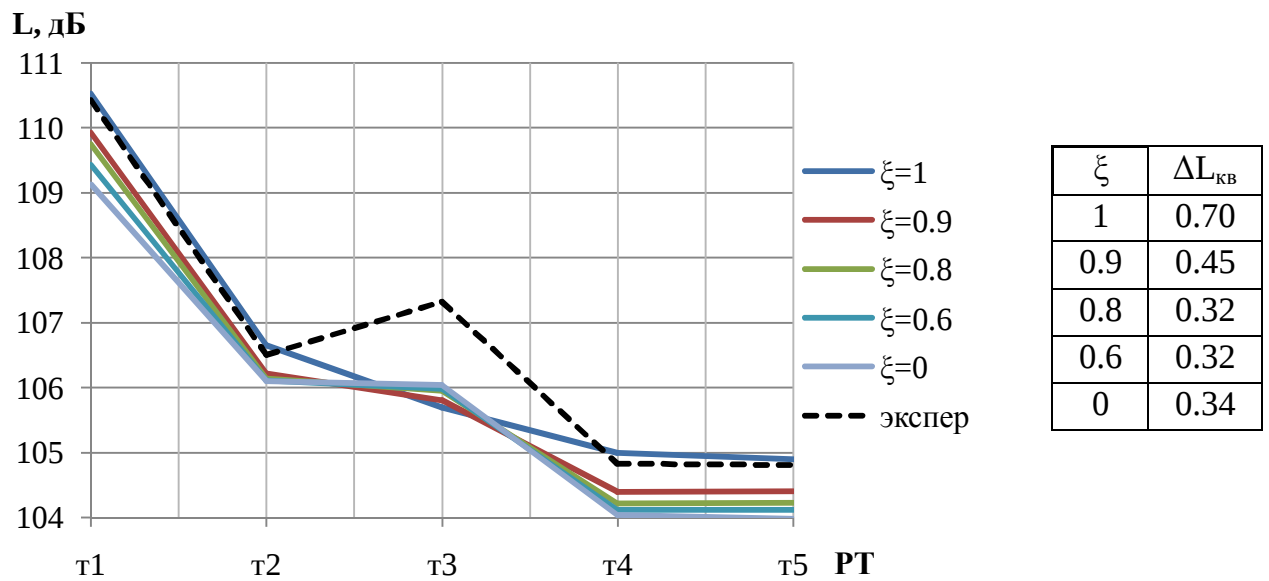
ξ	ΔL_{KB}
1	2.83
0.9	1.76
0.8	1.54
0.6	1.68
0	1.59

Рисунок 4.7 - Графики уровней звукового давления в модели высотой 25 см при различных значениях коэффициента ξ : а) – в модели без звукопоглощающей облицовки потолка; б) - в модели со звукопоглощающей облицовкой потолка

Таблица 4.4 - Результаты сравнения измеренных и рассчитанных уровней звукового давления в модели высотой 35 см при коэффициенте $\xi=0.8$

Характеристика		Уровни звукового давления, дБ, в точках				
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Потолок без облицовки	Измеренные уровни	110.42	106.50	107.32	104.82	104.81
	Рассчитанные уровни	109.74	106.13	105.94	104.21	104.22
Потолок с облицовкой	Измеренные уровни	107.86	102.82	102.15	98.49	97.32
	Рассчитанные уровни	107.42	101.75	101.22	98.44	98.31

а)



б)

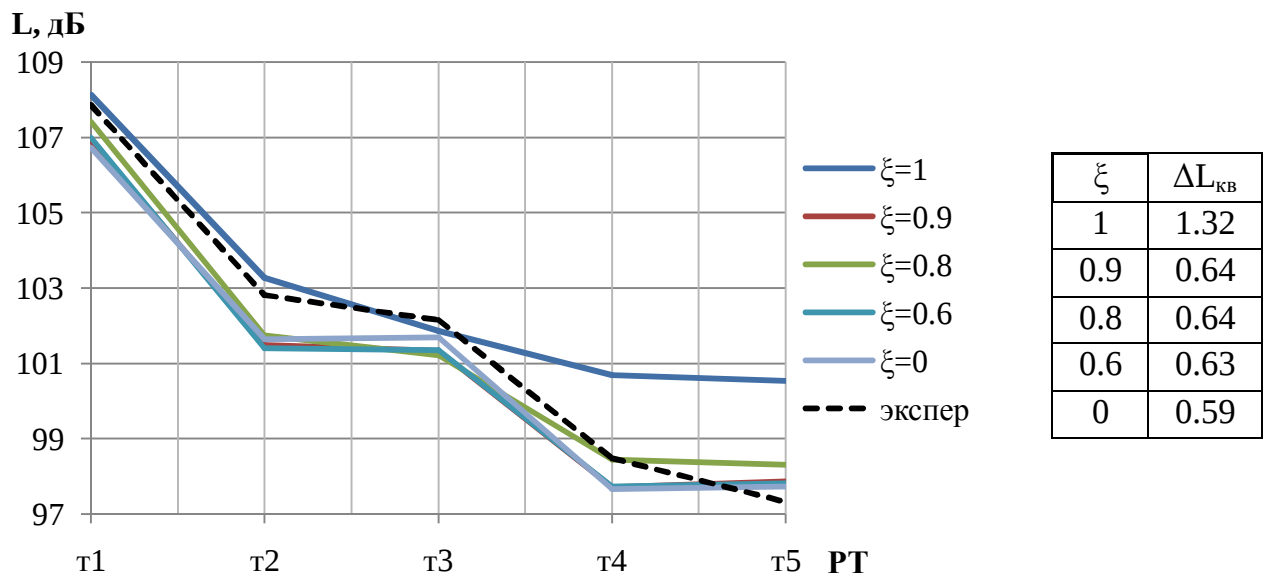
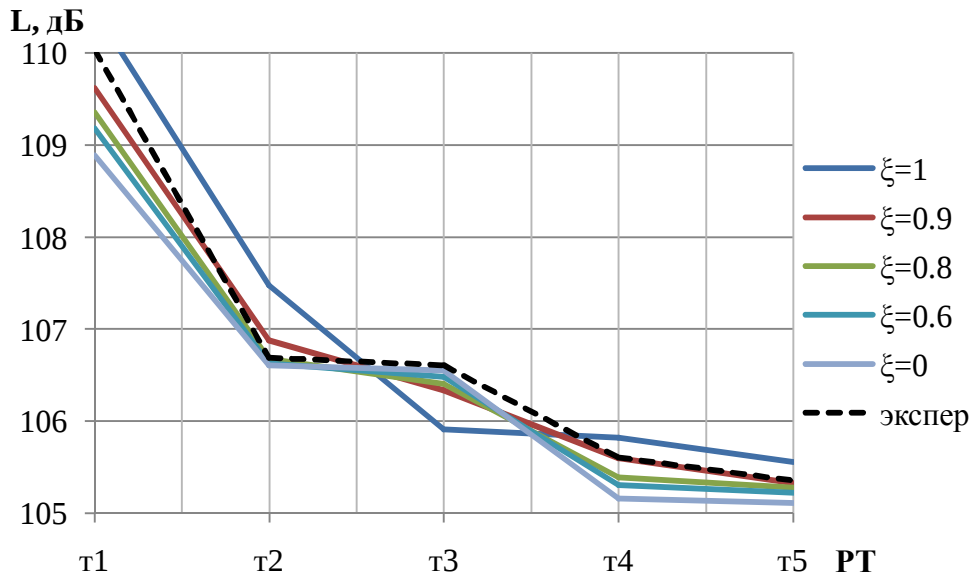


Рисунок 4.8 - Графики уровней звукового давления в модели высотой 35 см при различных значениях коэффициента ξ : а) – в модели без звукопоглощающей облицовки потолка; б) - в модели со звукопоглощающей облицовкой потолка

Таблица 4.5 - Результаты сравнения измеренных и рассчитанных уровней звукового давления в модели высотой 45 см при коэффициенте $\xi=0.8$

Характеристика		Уровни звукового давления, дБ в точках				
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Потолок без облицовки	Измеренные уровни	110.04	106.69	106.61	105.61	105.36
	Рассчитанные уровни	109.35	106.68	106.41	105.39	105.28
Потолок с облицовкой	Измеренные уровни	105.41	101.87	102.42	101.25	100.05
	Рассчитанные уровни	105.89	101.75	101.14	99.47	99.27

а)



б)

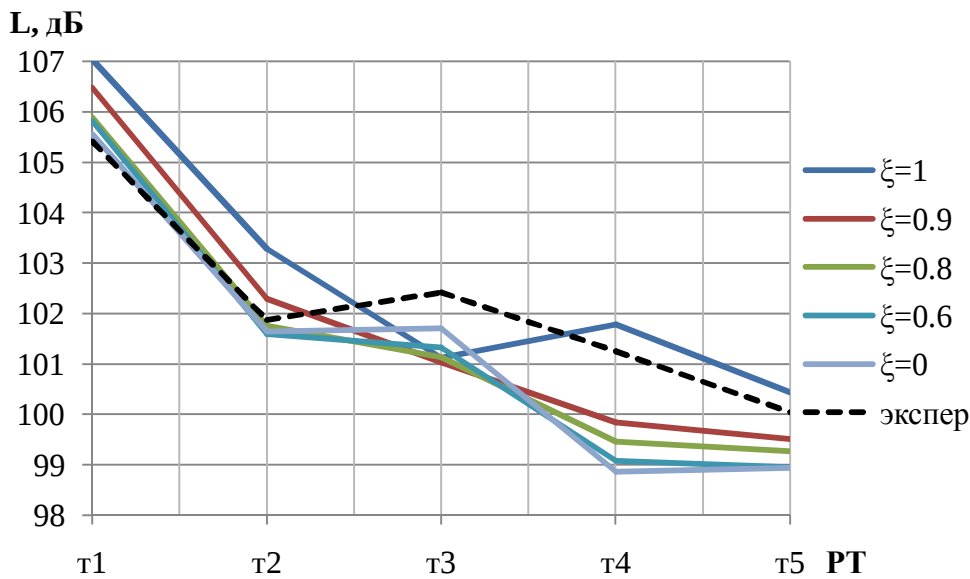
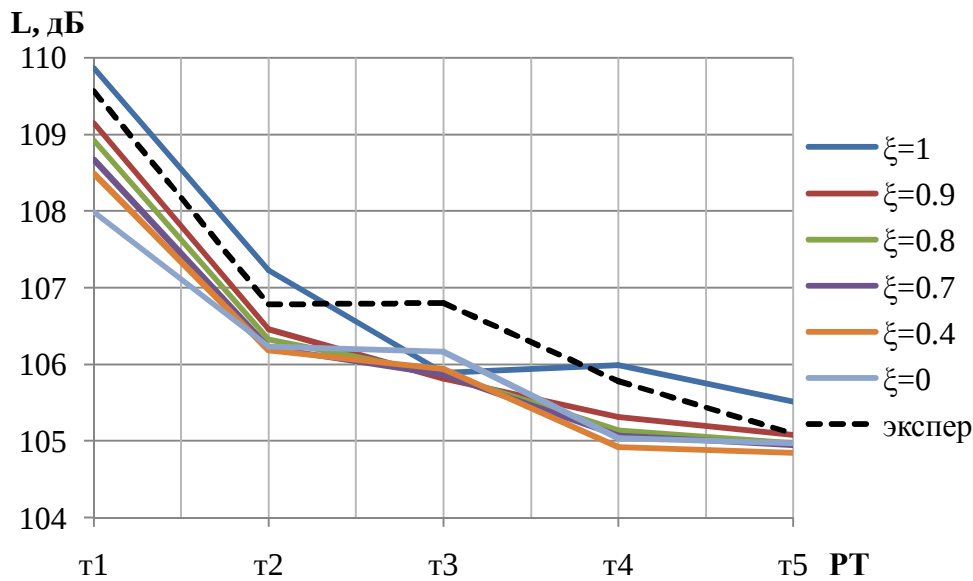


Рисунок 4.9 - Графики уровней звукового давления в модели высотой 45 см при различных значениях коэффициента ξ : а) – в модели без звукопоглощающей облицовки потолка; б) - в модели со звукопоглощающей облицовкой потолка

Таблица 4.6 - Результаты сравнения измеренных и рассчитанных уровней звукового давления в модели высотой 55 см при коэффициенте $\xi=0.8$

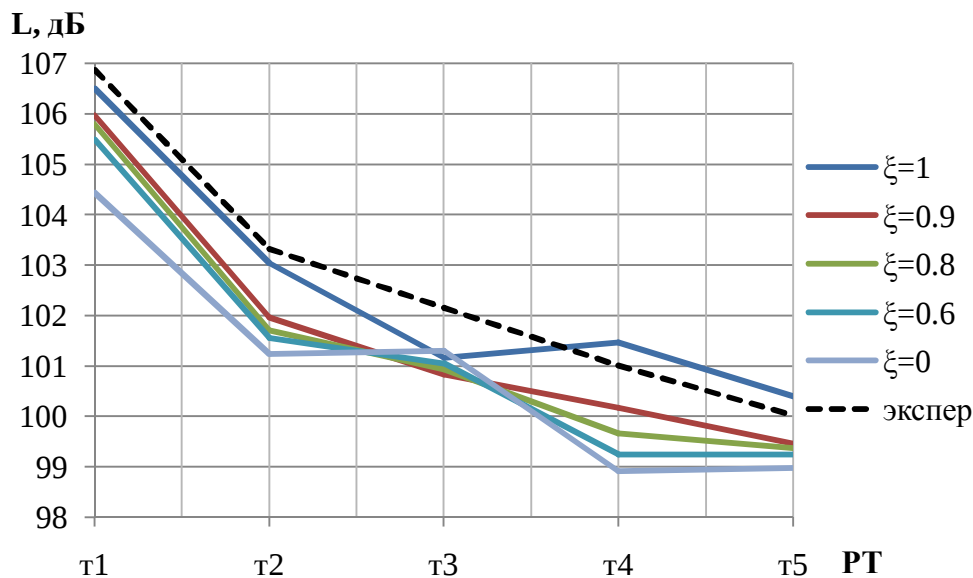
Характеристика		Уровни звукового давления, дБ, в точках				
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Потолок без облицовки	Измеренные уровни	109.56	106.78	106.80	105.78	105.09
	Рассчитанные уровни	108.92	106.32	105.87	105.14	104.97
Потолок с облицовкой	Измеренные уровни	106.87	103.32	102.15	101.01	100.02
	Рассчитанные уровни	105.80	101.71	100.94	99.66	99.37

а)



ξ	ΔL_{KB}
1	0.51
0.9	0.31
0.8	0.27
0.7	0.29
0.4	0.30
0	0.48

б)



ξ	ΔL_{KB}
1	0.53
0.9	0.32
0.8	0.31
0.6	0.38
0	0.63

Рисунок 4.10 - Графики уровней звукового давления в модели высотой 55 см при различных значениях коэффициента ξ : а) – в модели без звукопоглощающей облицовки потолка; б) - в модели со звукопоглощающей облицовкой потолка.

Из экспериментов видно, что практически при всех высотах помещений в расчетной точке T_3 измеренные уровни выше расчетных уровней на 0.5-1.5 дБ при всех моделях отражения звука от ограждений. Это объясняется неучетом в расчетной модели дифракции прямого звука за перегородки.

За перегородками, не находящимися в прямой видимости, и в общем воздушном пространстве над ними формирование шумового поля определяется зеркальными и диффузными отражениями. Расчеты показали, что наиболее близкие результаты к эксперименту дают расчеты при зеркально-диффузном отражении, когда $\xi=0.8$. Данное условие сохраняется для всех высот модели.

Выполнено сравнение результатов экспериментов в моделях без перегородок (см. таблицу 4.2) с данными, полученными в модели с перегородками. Установлено, что эффективность перегородок в моделях без звукопоглощения составляет величину в точке T_3 1-2 дБ, а в дальней зоне в точке T_5 2.5-3.5 дБ. Эффективность существенно возрастает при звукопоглощающем потолке. В точке T_3 эффективность составляет 2.0-5.5 дБ в зависимости от соотношений высоты перегородки и помещения. Еще более существенен рост эффективности в дальней от источника зоне. В точке T_5 снижение уровней звукового давления достигает 4.0-12.5 дБ.

Таким образом, результаты сравнительного анализа показали, что предложенная расчетная модель для оценки энергетических характеристик шумовых полей в системах помещений, связанных общим воздушным пространством, адекватно реагирует на изменение геометрических и акустических параметров в таких системах и может эффективно использоваться при оценке шумового режима и выборе строительно-акустических средств снижения шума. С использованием расчетной модели можно производить подбор акустических характеристик звукопоглощающих потолков, при которых будет обеспечиваться требуемый шумовой режим в помещениях офисов, выражаемых перегородками неполной высоты. Сравнение расчетов и эксперимента показало, что при расчетах в этом случае следует использовать зеркально-диффузную модель отражения с коэффициентом $\xi=0.80$. Величина расхождений в уровнях при этом не будет превышать 2 дБ.

4.3.2 Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных в крупногабаритной модели помещения с перегородками неполной высоты

Для оценки степени адекватности расчетной модели распространения шума в помещениях с условиями, максимально приближенными к реальным условиям, выполнены экспериментальные исследования в помещении, пространство которого разделено перегородками неполной высоты на 8 объемов с разными планировочными параметрами. Схема помещения приведена на рисунке 4.11. Габаритные размеры помещения и его отдельных объемов указаны на схемах рисунка 4.11. На схемах показаны положения источника, нижних и верхних точек измерения. Стены, пол и потолок в помещении бетонные, перегородки из гипсокартонных плит.

Шумовой режим в помещении создавался источником звука OED-SP-012-600. Измерения шума производились шумомером ЭКОФИЗИКА-110А. Средние коэффициенты звукопоглощения рассчитаны на основании измеренных значений времени реверберации.

Ниже приведены результаты сравнительного анализа для октавной полосы частот с $f_{cp} = 2000$ Гц. Средний коэффициент звукопоглощения для этой октавной полосы частот по данным измерений времени реверберации равен $\bar{\alpha} = 0.11$.

В таблицах 4.7-4.10 приведены результаты экспериментов и выполненных расчетов при зеркальной, диффузной и комбинированной моделях отражения звука от ограждений. Данные также приведены на рисунках 4.12-4.15.

В результате анализа установлено, что уровни шума существенно различаются в отдельных объемах разделенных перегородками. В то же время спад отраженной энергии в верхней части объема соответствует характерным спадам для плоских помещений. При выполнении серий расчетов установлено, что при использовании комбинированной расчетной модели величину коэффициента следует принимать равной $\xi = 0.8$.

При экспериментах исследовано также влияние на распространение звуковой энергии устройства звукопоглощения на потолке. Данные эксперимента и расчетов для этого случая приведены в приложении 2. Установлено, что при

размещении звукопоглощения над участком с источником шума происходит примерно равное снижение шума за счет звукопоглощения на всех остальных участках. В случае размещения источников шума не под этим участком снижение шума звукопоглощением носит локальный характер. Поэтому место размещения звукопоглощения должно в каждой ситуации определяться конкретно. Его эффективность может быть определена расчетом по предложенной в работе методике с использованием разработанной компьютерной программы.

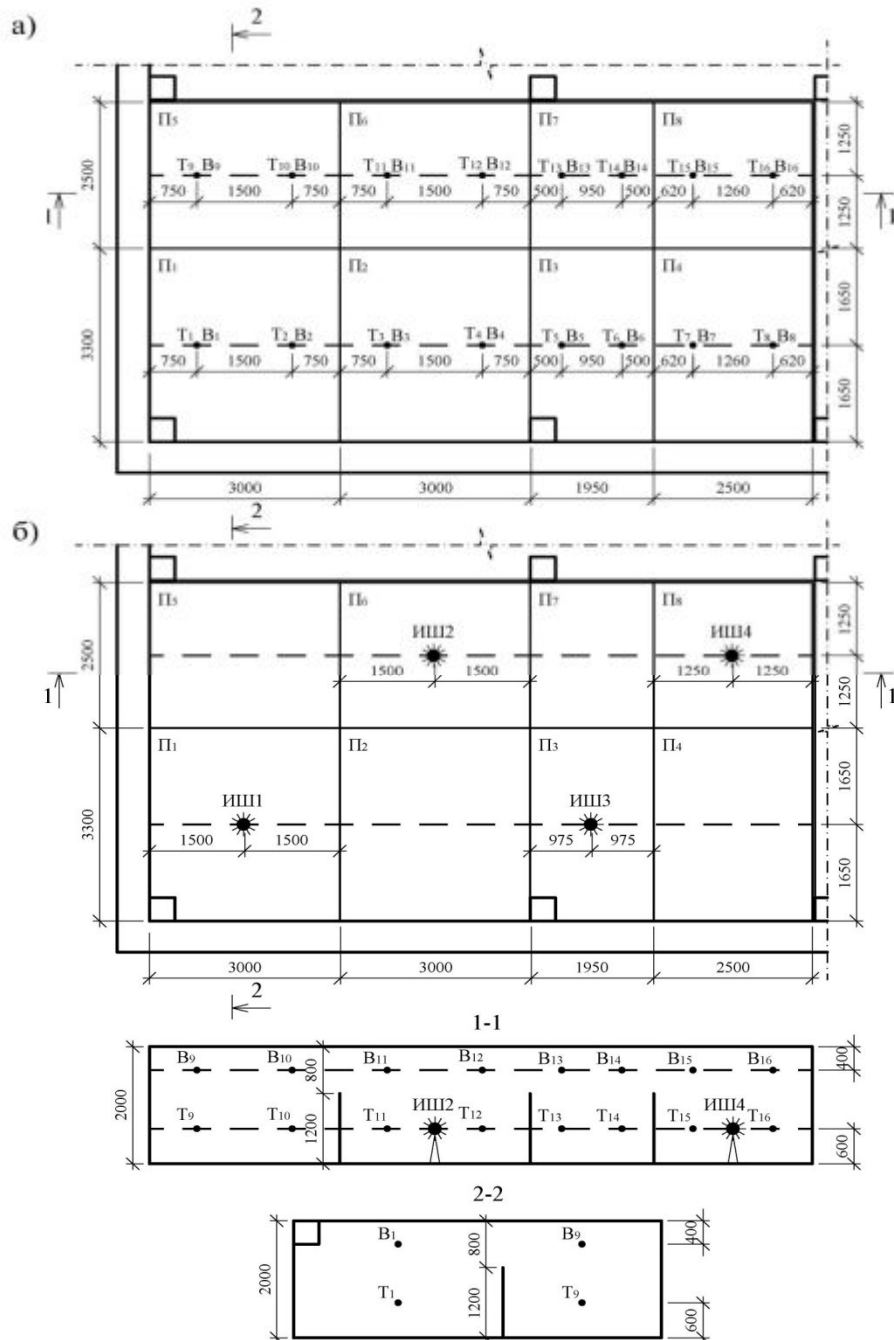


Рисунок 4.11 - Схема помещения с перегородками неполной высоты с указанием положения расчетных точек (а) и положений источника шума (б).

Таблица 4.7 - Экспериментальные и расчетные уровни в помещении при расположении источника в ИШ1, для октавной полосы с $f_{cp}=2000$ Гц.

№ точки	Экспериментальный уровень, $L_{экс_i}$ дБ	Расчетные уровни при диффузной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ		Расчетные уровни при зеркальной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ		Расчетные уровни при комбинированной модели отражения $\xi=0.8$ $L_{расч_i}$ дБ	
		$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$	$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$	$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$
T1	89.98	88.39	1.59	88.99	0.99	88.57	1.41
T2	89.65	87.93	1.72	88.89	0.76	88.22	1.43
T3	85.63	84.88	0.75	83.86	1.77	84.57	1.06
T4	86.37	83.62	2.75	84.00	2.37	83.74	2.63
T5	80.82	81.23	-0.41	80.48	0.34	81.00	-0.18
T6	81.65	80.77	0.88	80.88	0.77	80.80	0.85
T7	77.84	79.18	-1.34	78.88	-0.84	79.03	-1.19
T8	78.05	78.78	-0.73	79.24	-1.19	78.91	-0.86
T9	85.76	85.28	0.48	84.57	1.19	85.07	0.69
T10	84.70	84.99	-0.29	84.95	-0.25	84.98	-0.28
T11	82.79	83.41	-0.62	81.61	1.18	82.87	-0.08
T12	83.27	82.55	0.72	82.71	0.56	82.59	0.68
T13	79.51	80.59	-1.08	79.33	0.18	80.21	-0.70
T14	79.84	80.20	-0.36	79.93	-0.09	80.12	-0.28
T15	75.59	78.81	-3.22	78.05	-2.46	78.58	-2.99
T16	76.16	78.45	-2.29	78.33	-2.17	78.41	-2.25
B1	90.15	88.13	2.02	88.52	1.63	88.25	1.90
B2	89.04	87.45	1.59	88.05	0.99	87.63	1.41
B3	87.07	85.20	1.87	84.94	2.13	85.12	1.95
B4	85.30	83.44	1.86	84.10	1.20	83.64	1.66
B5	82.94	81.73	1.21	82.23	0.71	81.88	1.06
B6	81.05	80.59	0.46	80.65	0.40	80.61	0.44
B7	80.10	79.37	0.73	80.00	0.10	79.56	0.54
B8	78.52	78.73	-0.21	79.29	-0.77	78.90	-0.38
B9	86.03	85.38	0.65	85.25	0.78	85.34	0.69
B10	83.74	84.96	-1.22	85.33	-1.59	85.07	-1.33
B11	83.44	83.65	-0.21	82.99	0.45	83.46	-0.02
B12	81.76	82.44	-0.68	82.11	-0.35	82.34	-0.58
B13	79.54	81.04	-1.50	80.48	-0.94	80.87	-1.33
B14	79.04	80.07	-1.03	79.57	-0.53	79.92	-0.88
B15	77.56	79.00	-1.44	78.43	-0.87	78.83	-1.27
B16	77.09	78.43	1.34	78.45	1.36	78.44	-1.35

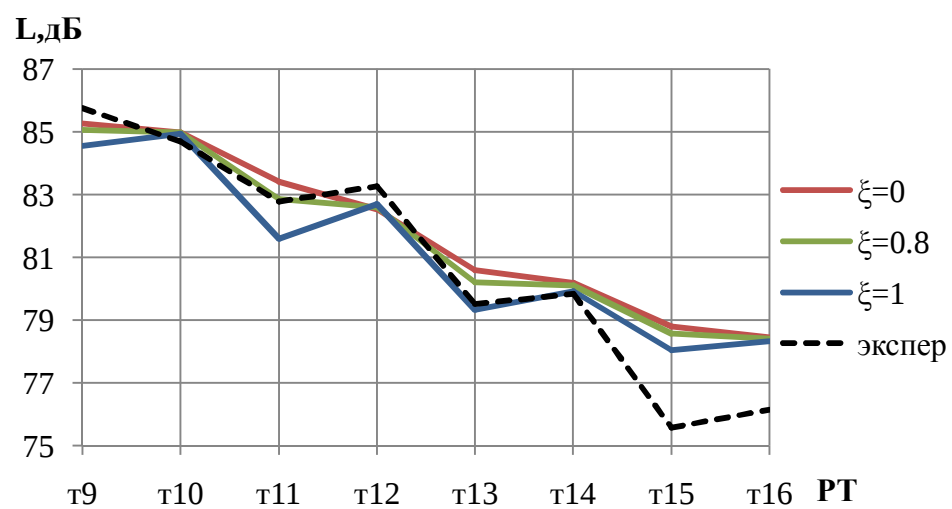
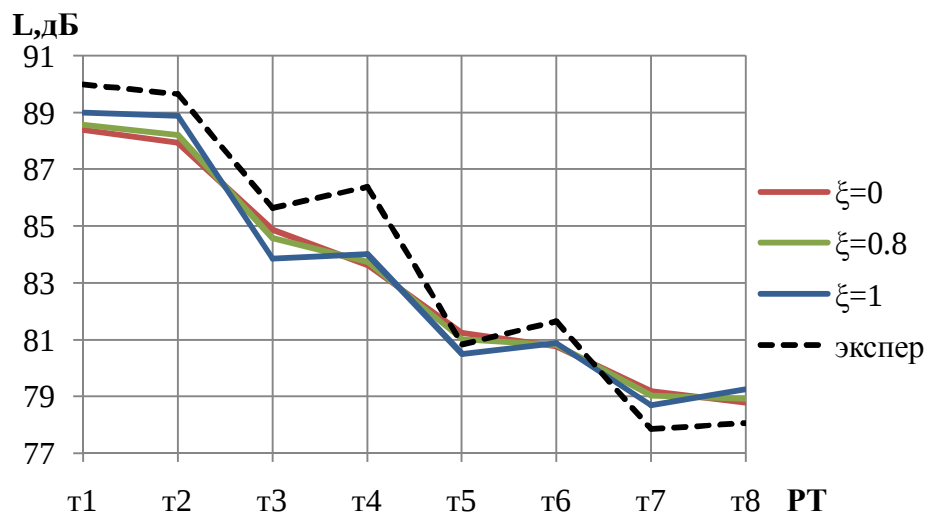
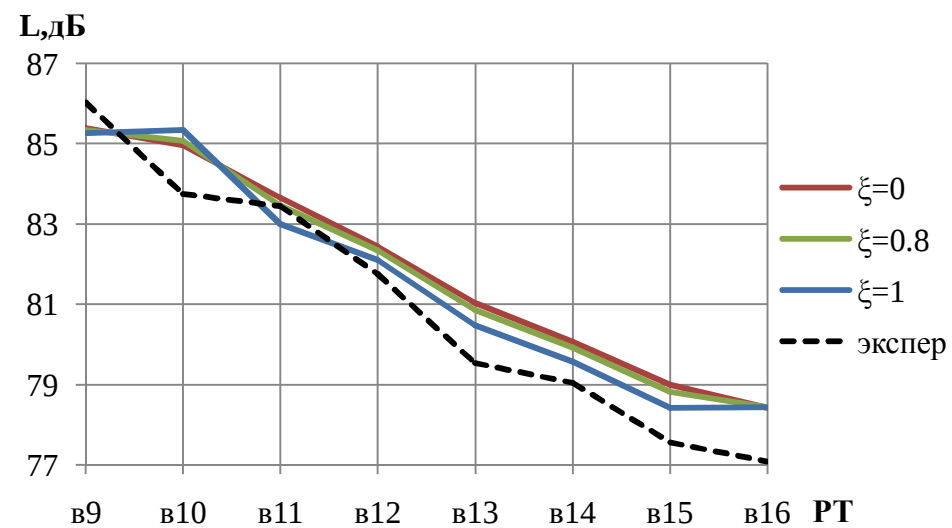
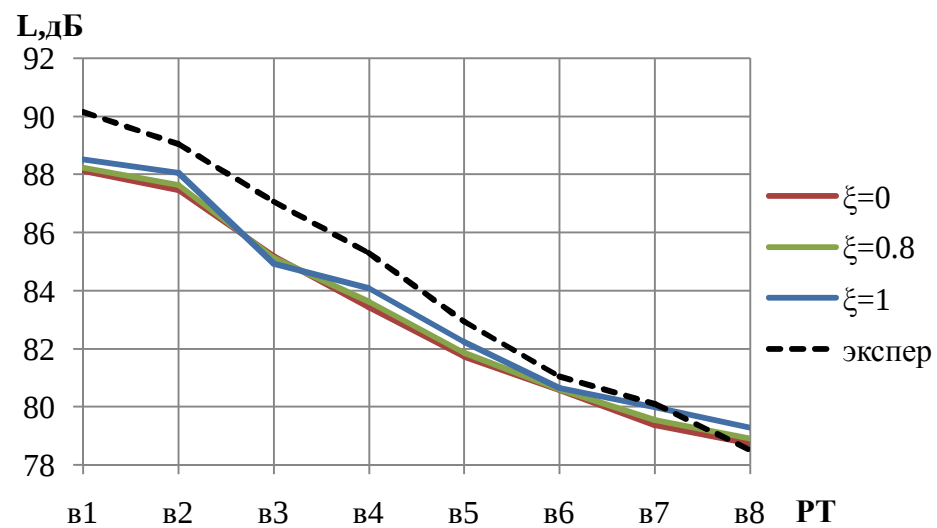


Рисунок 4.12 - Графики измеренных и рассчитанных уровней звукового давления при различных значениях коэффициента рассеивания ограждений. Источник в точке ИШ1

Таблица 4.8 - Экспериментальные и расчетные уровни в помещении при расположении источника в ИШ2, для октавной полосы с $f_{cp}=2000$ Гц.

№ точки	Экспериментальный уровень, $L_{экс}$, дБ	Расчетные уровни при диффузной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ		Расчетные уровни при зеркальной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ		Расчетные уровни при комбинированной модели отражения $\xi=0.8$ $L_{расч_i}$ дБ	
		$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч_i}$	$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч_i}$	$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч_i}$
T1	83.17	82.86	0.31	82.30	0.87	82.69	0.48
T2	82.70	83.12	-0.42	81.72	0.98	82.70	0.00
T3	83.88	83.76	0.12	83.77	0.11	83.76	0.12
T4	84.30	83.69	0.61	83.68	0.62	83.69	0.61
T5	81.15	82.61	-1.46	81.11	0.04	82.16	-1.01
T6	81.29	82.35	-1.06	84.54	-0.25	82.10	-0.81
T7	77.76	81.27	-3.51	79.86	-2.10	80.84	-3.08
T8	79.34	80.97	-1.63	80.80	-1.46	80.92	-1.58
T9	83.55	84.12	-0.57	84.07	-0.52	84.11	-0.56
T10	84.42	84.86	-0.44	84.14	0.28	84.64	-0.22
T11	90.20	87.72	2.48	88.88	1.32	88.07	2.13
T12	90.10	87.63	2.47	88.80	1.30	87.98	2.12
T13	82.57	84.65	-2.08	83.77	-1.20	84.38	-1.81
T14	83.68	84.06	-0.38	83.71	-0.03	83.96	-0.28
T15	78.58	82.11	-3.53	81.26	-2.68	81.85	-3.27
T16	79.65	81.62	-1.97	81.60	-1.95	81.62	-1.97
B1	83.00	82.93	0.07	82.62	0.38	82.84	0.16
B2	83.50	83.30	0.20	82.75	0.75	83.14	0.36
B3	84.85	83.81	1.04	84.02	0.83	83.88	0.97
B4	83.94	83.72	0.22	83.69	0.25	83.71	0.23
B5	82.71	82.97	-0.26	82.46	0.25	82.82	-0.11
B6	82.30	82.32	-0.02	82.21	0.09	82.29	0.01
B7	80.57	81.50	-0.93	80.78	-0.21	81.29	-0.72
B8	79.23	81.05	-1.82	79.57	-0.34	80.60	-1.37
B9	84.86	84.15	0.71	84.20	0.66	84.16	0.70
B10	85.38	85.20	0.18	85.04	0.34	85.15	0.23
B11	89.70	87.16	2.54	87.86	1.84	87.37	2.33
B12	89.49	87.13	2.36	87.95	1.54	87.37	2.12
B13	85.96	85.35	0.61	85.23	0.73	85.31	0.65
B14	83.61	83.94	-0.33	84.26	-0.65	84.04	-0.43
B15	81.51	82.45	-0.4	81.98	-0.47	82.31	-0.80
B16	79.33	81.68	-2.35	81.11	-1.78	81.51	-2.18

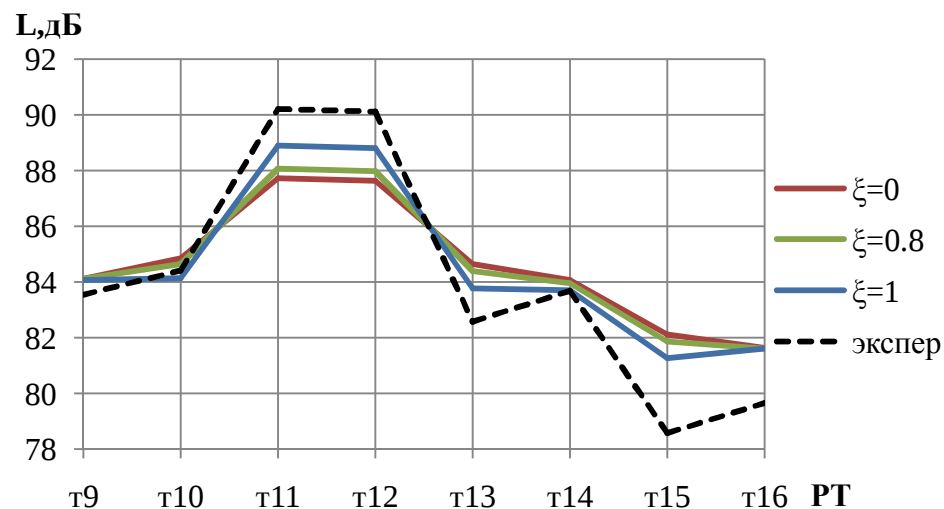
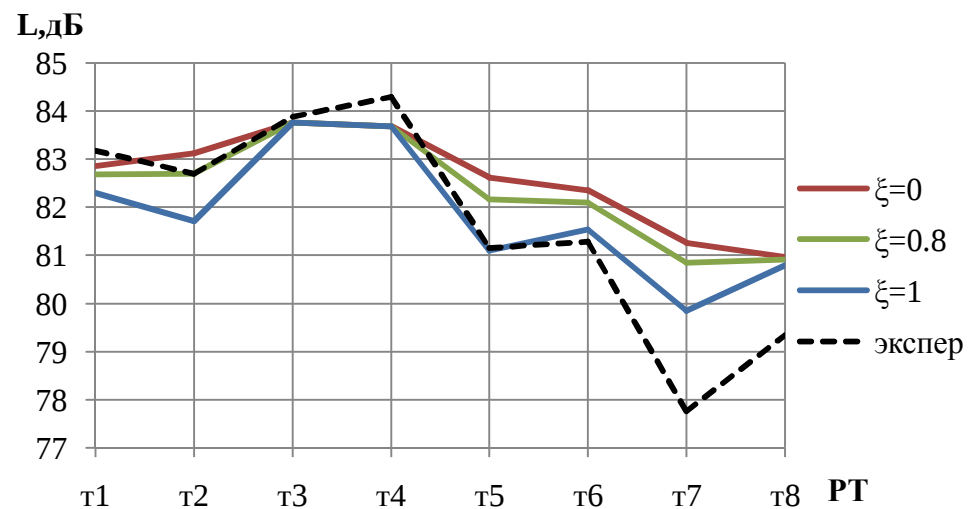
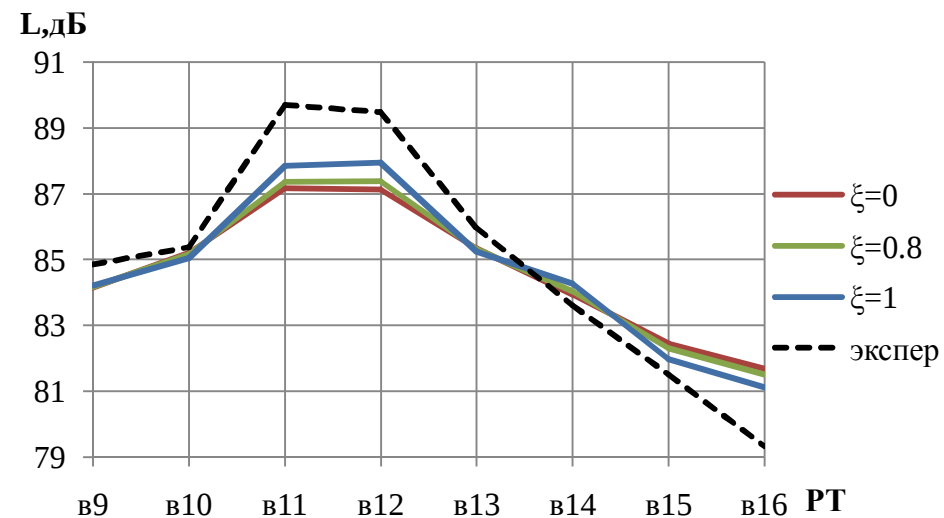
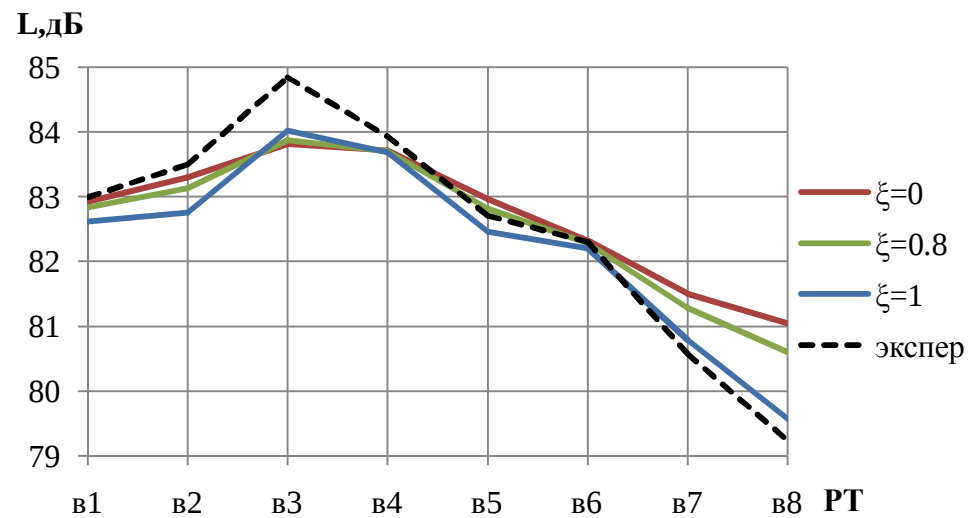


Рисунок 4.13 - Графики измеренных и рассчитанных уровней звукового давления при различных значения коэффициента рассеивания ограждений. Источник в точке ИШ2

Таблица 4.9 - Экспериментальные и расчетные уровни в помещении при расположении источника в ИШЗ, для октавной полосы с $f_{cp}=2000$ Гц.

№ точки	Экспериментальный уровень, $L_{экс}$, дБ	Расчетные уровни при диффузной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ		Расчетные уровни при зеркальной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ		Расчетные уровни при комбинированной модели отражения $\xi=0.8$ $L_{расч_i}$ дБ	
		$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч_i}$	$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч_i}$	$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч_i}$
T1	81.45	80.50	0.95	79.94	1.51	80.33	1.12
T2	80.63	81.09	-0.46	80.37	0.26	80.87	-0.24
T3	83.90	83.34	0.56	83.43	0.477	83.37	0.53
T4	83.91	84.60	-0.69	83.36	0.55	84.23	-0.32
T5	90.75	88.13	2.62	89.45	1.30	88.53	2.22
T6	91.27	88.10	3.17	89.60	1.67	88.55	2.72
T7	84.18	85.44	-1.26	84.56	-0.38	85.18	-1.00
T8	83.95	84.93	-0.98	84.33	-0.38	84.75	-0.80
T9	79.68	79.93	-0.25	79.34	0.34	79.76	-0.08
T10	80.14	80.39	-0.25	79.39	0.75	80.09	0.05
T11	81.88	82.00	-0.12	82.26	-0.38	82.08	-0.20
T12	81.46	82.73	-1.27	81.40	0.06	82.33	-0.87
T13	82.96	83.78	-0.82	84.24	-1.28	83.91	-0.95
T14	83.48	83.85	-0.37	84.14	-0.66	83.94	-0.46
T15	81.09	83.61	-2.52	82.68	-1.29	83.33	-2.24
T16	80.45	83.45	-3.00	82.49	-2.04	83.16	-2.71
B1	81.05	80.54	0.51	80.94	0.11	80.66	0.39
B2	82.16	81.40	0.76	81.30	0.86	81.37	0.79
B3	84.07	83.22	0.85	83.72	0.35	83.37	0.70
B4	85.45	84.94	0.51	85.11	0.34	84.99	0.46
B5	88.99	86.97	2.02	88.17	0.82	87.33	1.66
B6	88.25	87.12	1.13	88.20	0.05	87.44	0.81
B7	87.34	85.76	1.58	85.45	1.89	85.67	1.67
B8	84.86	84.98	-0.12	84.96	-0.10	84.97	-0.11
B9	79.07	80.01	-0.94	79.66	-0.59	79.91	-0.84
B10	79.97	80.67	-0.70	80.20	-0.23	80.53	-0.56
B11	81.06	81.99	-0.93	81.80	-0.74	81.93	-0.87
B12	83.06	83.00	0.06	82.43	0.63	82.83	0.23
B13	83.95	83.83	0.12	84.17	-0.22	83.93	0.02
B14	84.64	84.02	0.62	84.34	0.30	84.11	0.53
B15	82.34	83.81	-1.47	83.10	-0.76	83.6	-1.26
B16	81.75	83.57	-1.82	83.01	-1.26	83.40	-1.65

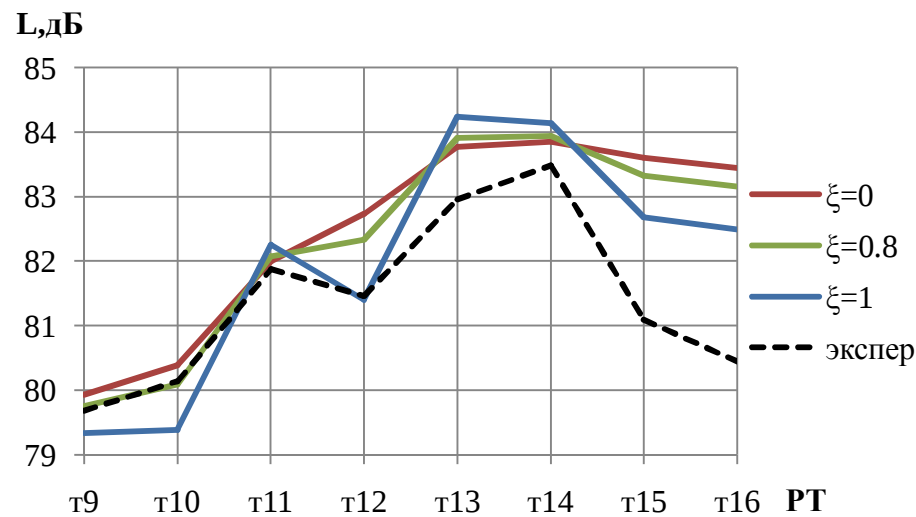
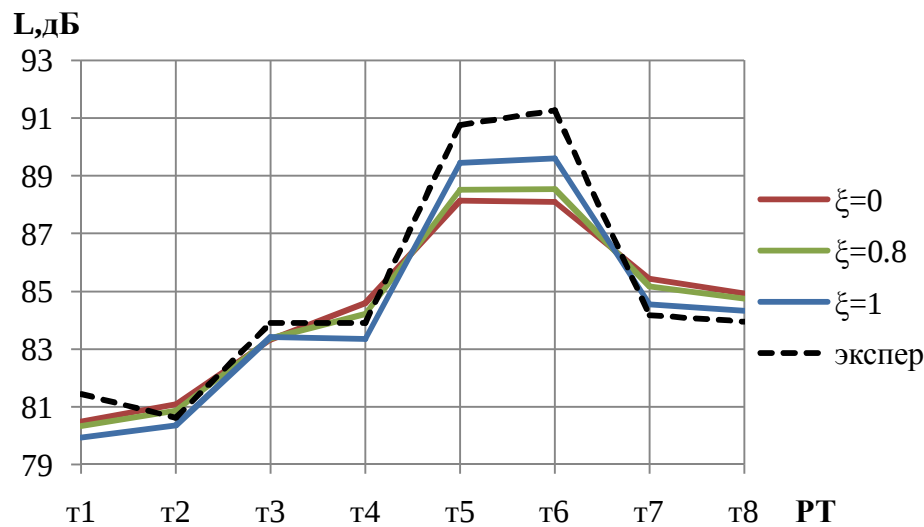
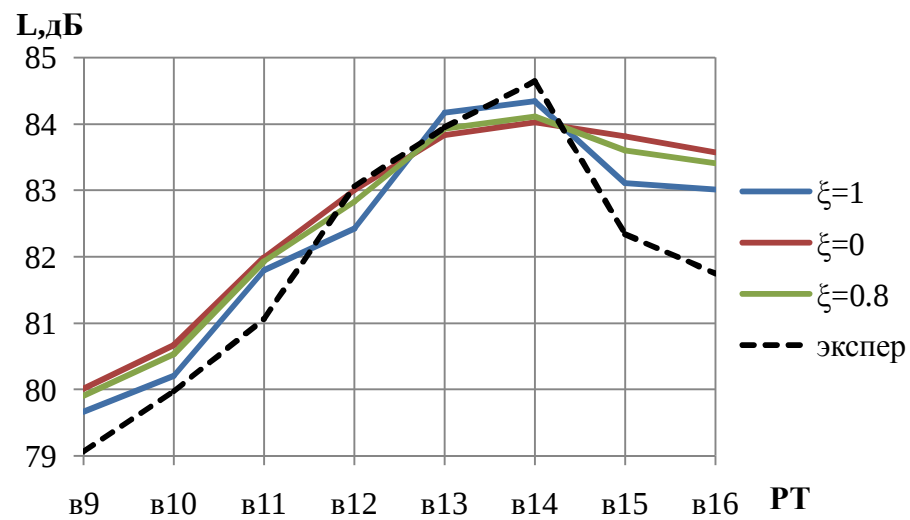
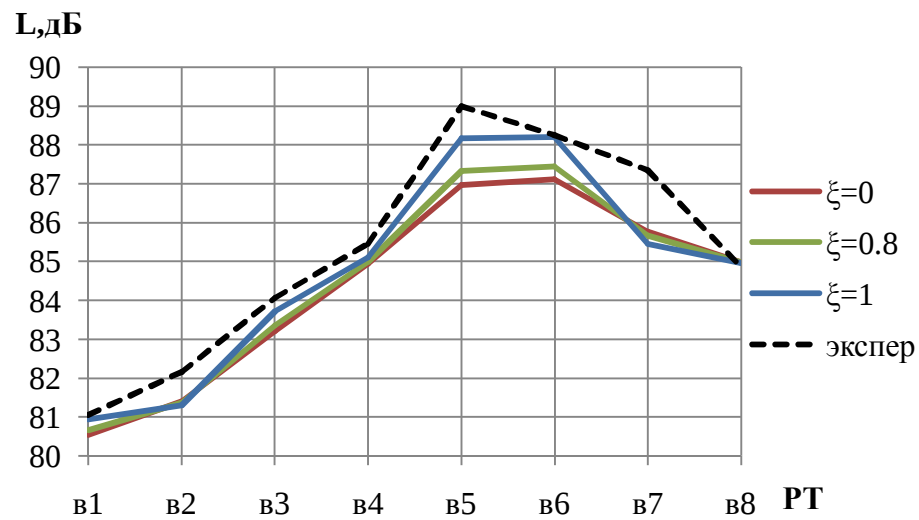


Рисунок 4.14 - Графики измеренных и рассчитанных уровней звукового давления при различных значениях коэффициента рассеивания ограждений. Источник в точке ИШЗ

Таблица 4.10 - Экспериментальные и расчетные уровни в помещении при расположении источника в ИШ4, для октавной полосы с $f_{cp}=2000$ Гц.

№ точки	Экспериментальный уровень, $L_{экс_i}$ дБ	Расчетные уровни при диффузной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ		Расчетные уровни при зеркальной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ		Расчетные уровни при комбинированной модели отражения $\xi=0.8$ $L_{расч_i}$ дБ	
		$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$	$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$	$L_{расч_i}$	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$
T1	76.06	78.41	-2.35	77.70	-0.64	78.20	-2.14
T2	75.91	78.90	-2.99	77.29	-0.38	78.42	-2.51
T3	79.25	80.71	-1.46	80.50	-0.25	80.65	-1.40
T4	77.50	81.63	-4.13	79.50	-2.00	80.99	-3.49
T5	82.56	83.49	-0.93	83.12	-0.56	83.38	-0.82
T6	81.40	83.86	-2.46	82.70	-1.30	83.51	-2.11
T7	82.70	85.19	-2.49	85.04	-2.34	85.15	-2.45
T8	82.25	85.41	-3.16	84.98	-2.73	85.28	-3.03
T9	76.72	78.53	-1.81	78.60	-1.88	78.55	-1.83
T10	76.14	79.10	-2.96	79.07	-2.93	79.09	-2.95
T11	80.61	81.29	-0.68	81.38	-0.77	81.32	-0.71
T12	79.59	82.51	-2.92	81.17	-1.58	82.11	-2.52
T13	83.84	85.26	-1.42	85.01	-1.17	85.19	-1.35
T14	84.00	85.93	-1.93	84.47	-0.47	85.49	-1.49
T15	87.65	89.02	-1.37	90.09	-2.44	89.34	-1.69
T16	88.37	89.41	-1.04	90.16	-1.79	89.63	-1.26
B1	75.76	78.42	-2.66	78.23	-2.47	78.36	-2.60
B2	77.00	79.13	-2.13	78.52	-1.52	78.95	-1.95
B3	78.18	80.59	-2.41	80.19	-2.01	80.47	-2.29
B4	78.96	81.86	-2.90	80.95	-1.99	81.58	-2.62
B5	81.80	83.29	-1.49	83.00	-1.20	83.20	-1.40
B6	81.96	84.19	-2.23	83.32	-1.36	83.93	-1.97
B7	82.49	85.13	-2.64	85.23	-2.74	85.16	-2.67
B8	83.58	85.47	-1.89	85.50	-1.92	85.48	-1.90
B9	76.45	78.54	-2.09	78.87	-2.42	78.64	-2.19
B10	76.79	79.37	-2.58	78.99	-2.20	79.26	-2.47
B11	79.59	81.14	-1.55	81.54	-1.95	81.26	-1.67
B12	80.63	82.82	-2.19	82.61	-1.98	82.76	-2.13
B13	83.43	84.96	-1.53	85.31	-1.88	85.07	-1.64
B14	85.32	86.55	-1.23	86.52	-1.20	86.54	-1.22
B15	89.39	88.42	0.97	89.21	0.18	88.66	0.73
B16	87.81	89.04	-1.23	89.61	-1.80	89.21	-1.40

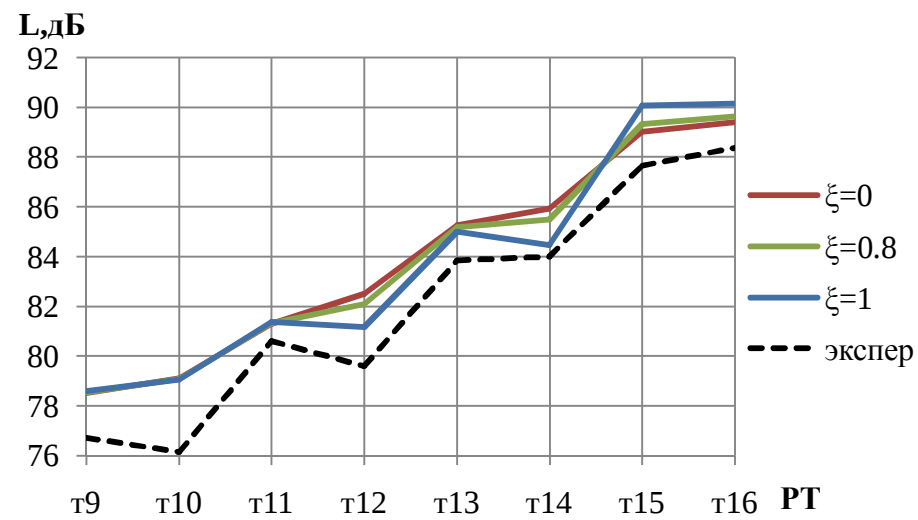
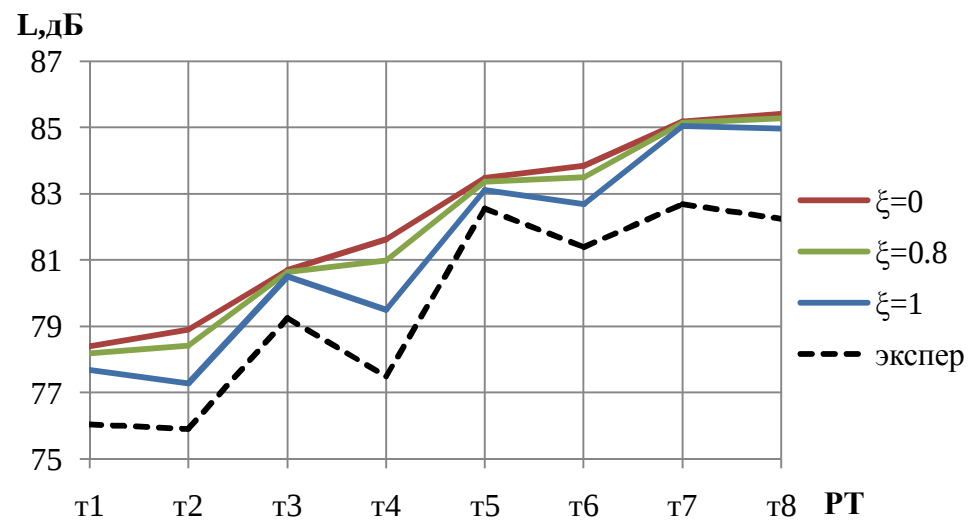
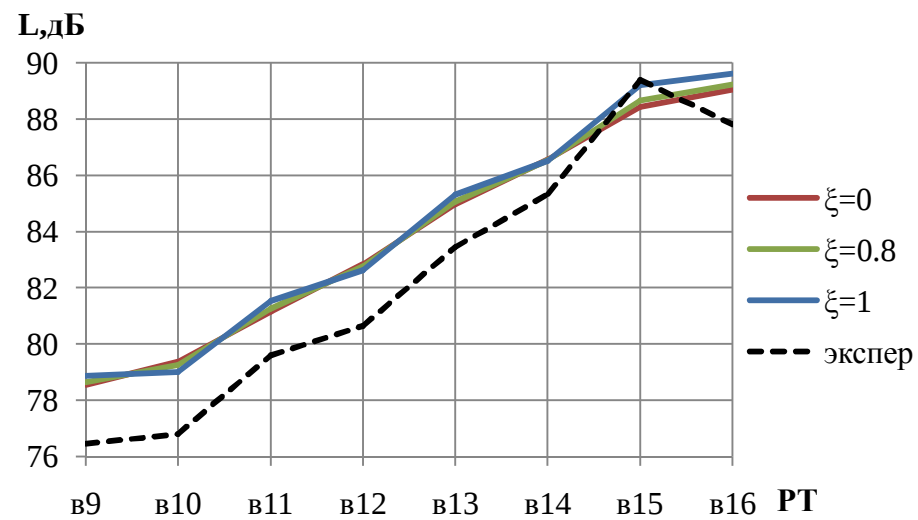
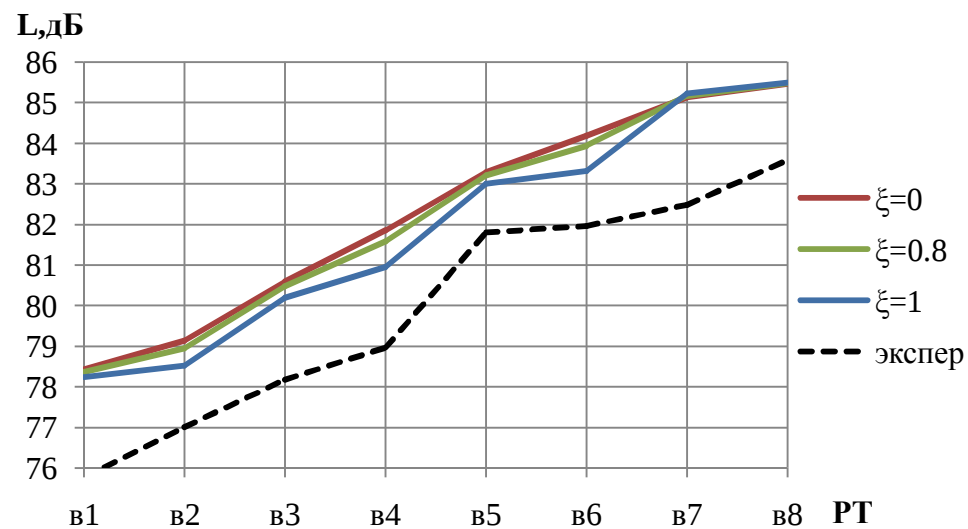


Рисунок 4.15 - Графики измеренных и рассчитанных уровней звукового давления при различных значениях коэффициента рассеивания ограждений. Источник в точке ИШ4

4.3.3 Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных в административном помещении с перегородками неполной высоты

Экспериментальные измерения выполнены в административном помещении корпуса Л ТГТУ. Помещение с размерами 11.32·8.42·4.6(h) м разгорожено остекленными перегородками высотой 2.5 м из ПВХ профилей. Схема помещения с обозначением положений источника шума и точек измерений показана на рисунке 4.16. Измерения выполнялись на расстоянии 1.5 м от пола (точки $T_1 - T_8$) и в пространстве над перегородками на уровне 3.75 м (точки $B_1 - B_8$). При экспериментах в качестве источника шума использовался всенаправленный источник звука (додекаэдр) OED-SP-012-600. Положение и привязка источников шума показаны на рисунке 4.16. Измерение уровней звукового давления производилось шумомером ЭКОФИЗИКА-110А.

Покрытие пола из линолеума, стены окрашены водоэмульсионной краской. Потолок подвесной из плит типа «Акмигран». Помещение предназначено для работы методистов и имеет высокую плотность расстановки офисной мебели, оргтехники, деревянных и металлических шкафов, сейфов и т.п.

Ниже приведены результаты сравнительного анализа для октавной полосы частот с $f_{cp}=2000$ Гц. Средний коэффициент звукопоглощения помещения в этой полосе частот по данным измерений времени реверберации равен $\bar{\alpha}=0.18$.

В таблицах 4.11-4.14 приведены результаты выполненных расчетов и эксперимента. Данные также представлены на рисунках 4.17-4.20 для всех положений источника шума.

Сравнения расчетных и экспериментальных данных показали, что как и ранее комбинированная зеркально-диффузная модель отражения звука от ограждений обеспечивает лучшее совпадение результатов по сравнению с идеальными зеркальной и диффузной моделями отражения. Наилучшее совпадение результатов наблюдается при коэффициентах $\xi=0.8-0.6$. Такое изменение коэффициента ξ объясняется близостью результатов расчета при незначительных изменениях коэффициента. Об этом также свидетельствует изменение среднего квадратичного отклонения ΔL_{KB} .

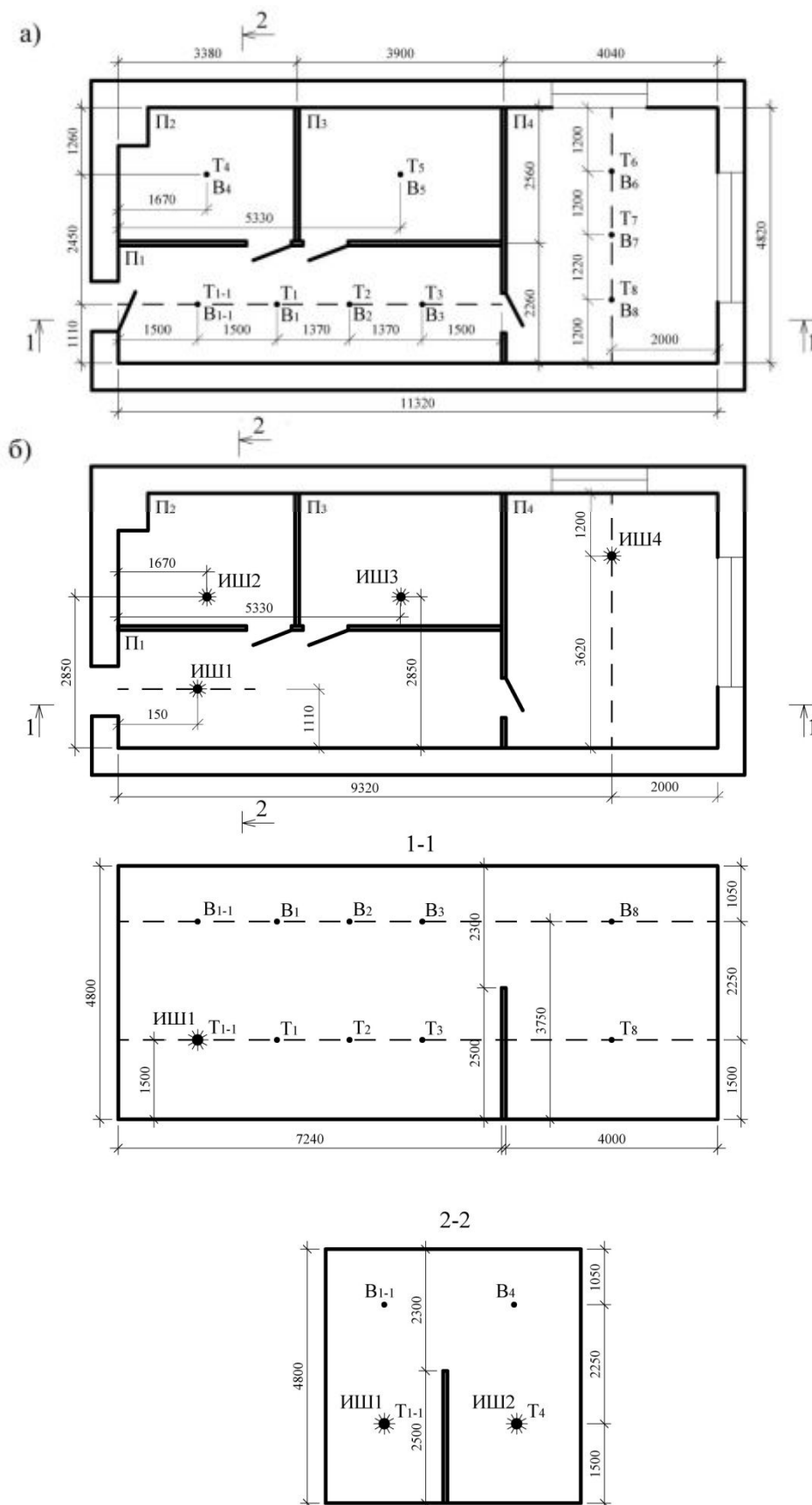


Рисунок 4.16 - Схема офисного помещения с указанием положения расчетных точек (а) и положения источника шума (б)

Таблица 4.11 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных в помещении офиса. Источник в точке ИШ1, коэффициент $\xi=0.6$

Уровни звукового давления, дБ					
На высоте 1.5 м			На высоте 3.75м		
Точки	Измерение	Расчет	Точки	Измерение	Расчет
T1	86.61	85.21	B1	82.74	83.15
T2	83.95	85.21	B2	82.07	82.05
T3	84.29	81.99	B3	81.66	80.90
T4	81.04	79.65	B4	81.85	81.07
T5	78.31	78.10	B5	80.76	79.36
T6	76.16	76.17	B6	78.20	76.97
T7	76.40	76.33	B7	77.75	77.27
T8	76.05	76.33	B8	79.10	77.42

L, дБ

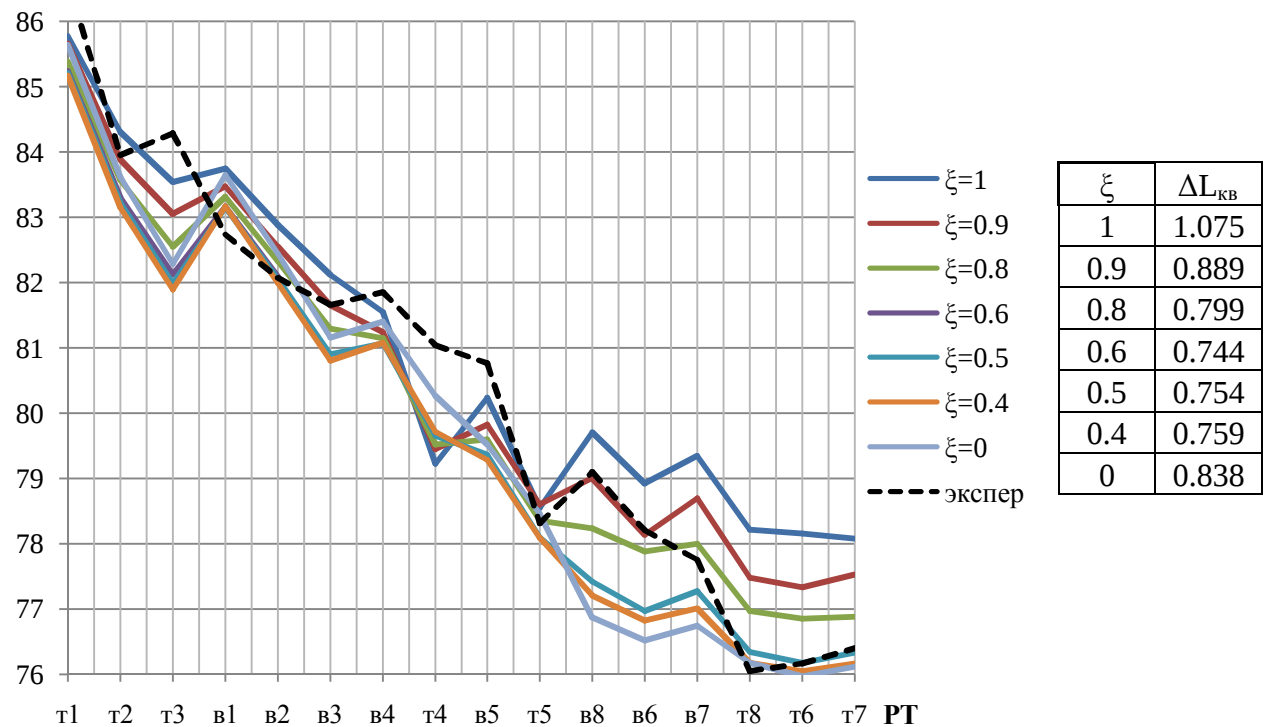


Рисунок 4.17 - Графики измеренных и рассчитанных уровней звукового давления при различных значениях коэффициента рассеивания ограждений. Источник в точке ИШ1

Таблица 4.12 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных в помещении деканата. Источник в точке ИШ2, коэффициент $\xi=0.6$

Уровни звукового давления, дБ					
На высоте 1.5 м			На высоте 3.75м		
Точки	Измерение	Расчет	Точки	Измерение	Расчет
T1-1	80.69	81.88	B1-1	82.65	82.09
T1	81.15	81.21	B1	81.81	81.58
T2	79.47	80.25	B2	81.41	80.61
T3	78.88	79.38	B3	79.45	79.41
T4	89.78	88.57	B4	84.12	84.45
T5	79.76	78.75	B5	81.00	80.05
T6	74.28	75.48	B6	75.18	76.02
T7	74.73	75.61	B7	76.54	76.03
T8	73.94	75.57	B8	76.41	75.87

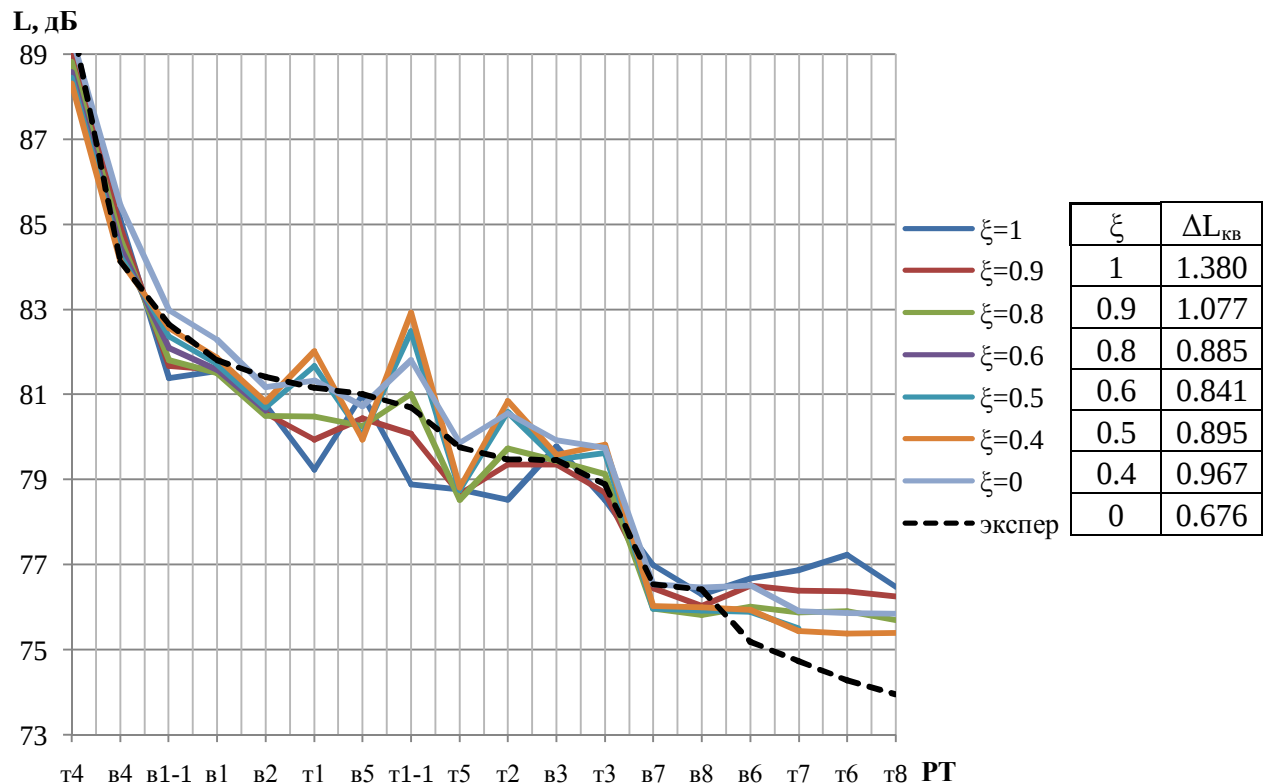


Рисунок 4.18 - Графики измеренных и рассчитанных уровней звукового давления при различных значениях коэффициента рассеивания ограждений. Источник в точке ИШ2

Таблица 4.13 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных в помещении деканата. Источник в точке ИШЗ, коэффициент $\xi=0.8$

Уровни звукового давления, дБ					
На высоте 1.5 м.			На высоте 3.75м		
Точки	Измерение	Расчет	Точки	Измерение	Расчет
T1-1	78.27	78.58	B1-1	80.84	79.83
T1	79.15	79.17	B1	81.76	80.37
T2	78.28	79.47	B2	81.73	80.47
T3	78.23	79.34	B3	81.15	80.59
T4	78.26	79.34	B4	81.64	80.95
T5	88.21	88.43	B5	82.21	83.79
T6	77.61	78.46	B6	78.88	80.30
T7	76.82	78.51	B7	78.69	79.64
T8	76.74	78.31	B8	79.05	79.40

L, дБ

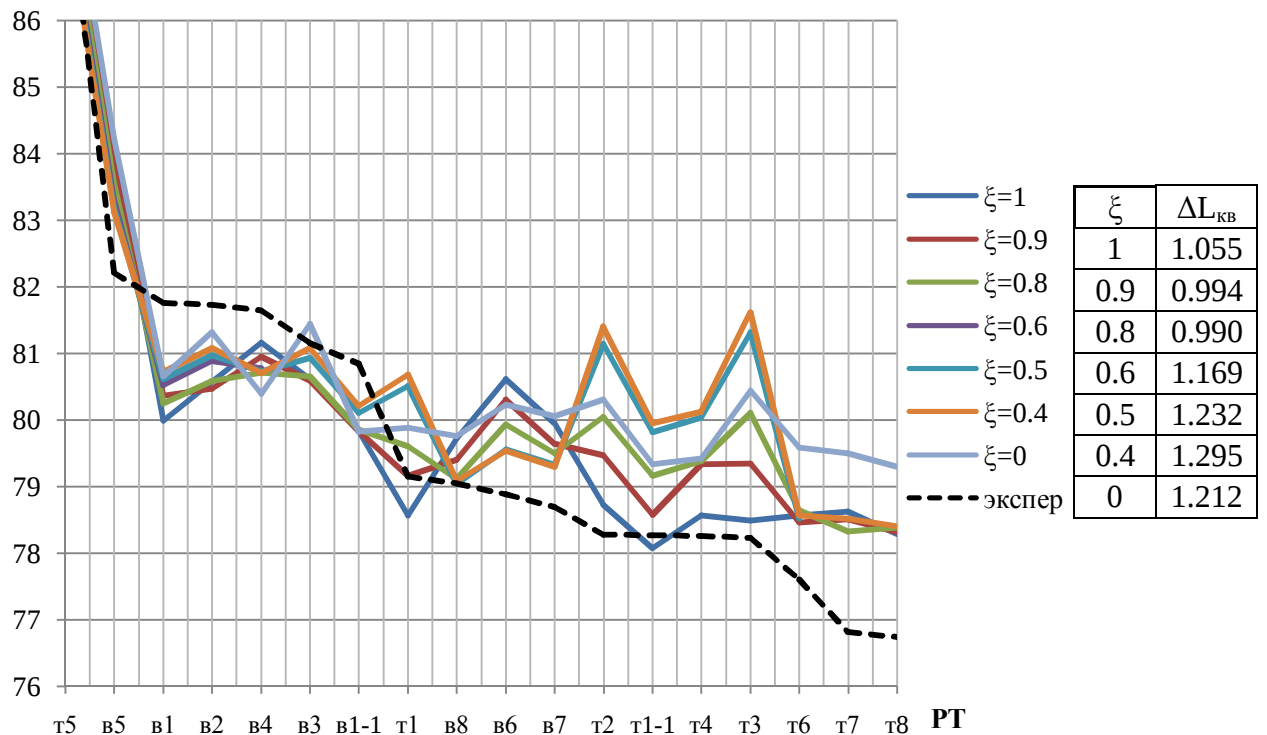


Рисунок 4.19 - Графики измеренных и рассчитанных уровней звукового давления при различных значениях коэффициента рассеивания ограждений. Источник в точке ИШЗ

Таблица 4.14 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных в помещении деканата. Источник в точке ИШ4, коэффициент $\xi=0.8$

Уровни звукового давления, дБ					
На высоте 1.5 м.			На высоте 3.75м		
Точки	Измерение	Расчет	Точки	Измерение	Расчет
T1-1	75.29	76.38	B1-1	76.59	76.74
T1	76.22	76.77	B1	78.35	77.41
T2	77.59	76.83	B2	78.27	77.74
T3	77.45	77.67	B3	79.23	79.29
T4	75.27	75.26	B4	76.46	76.50
T5	77.10	77.60	B5	78.38	79.02
T7	84.65	84.89	B7	82.61	82.87
T8	82.24	83.26	B8	81.57	82.44

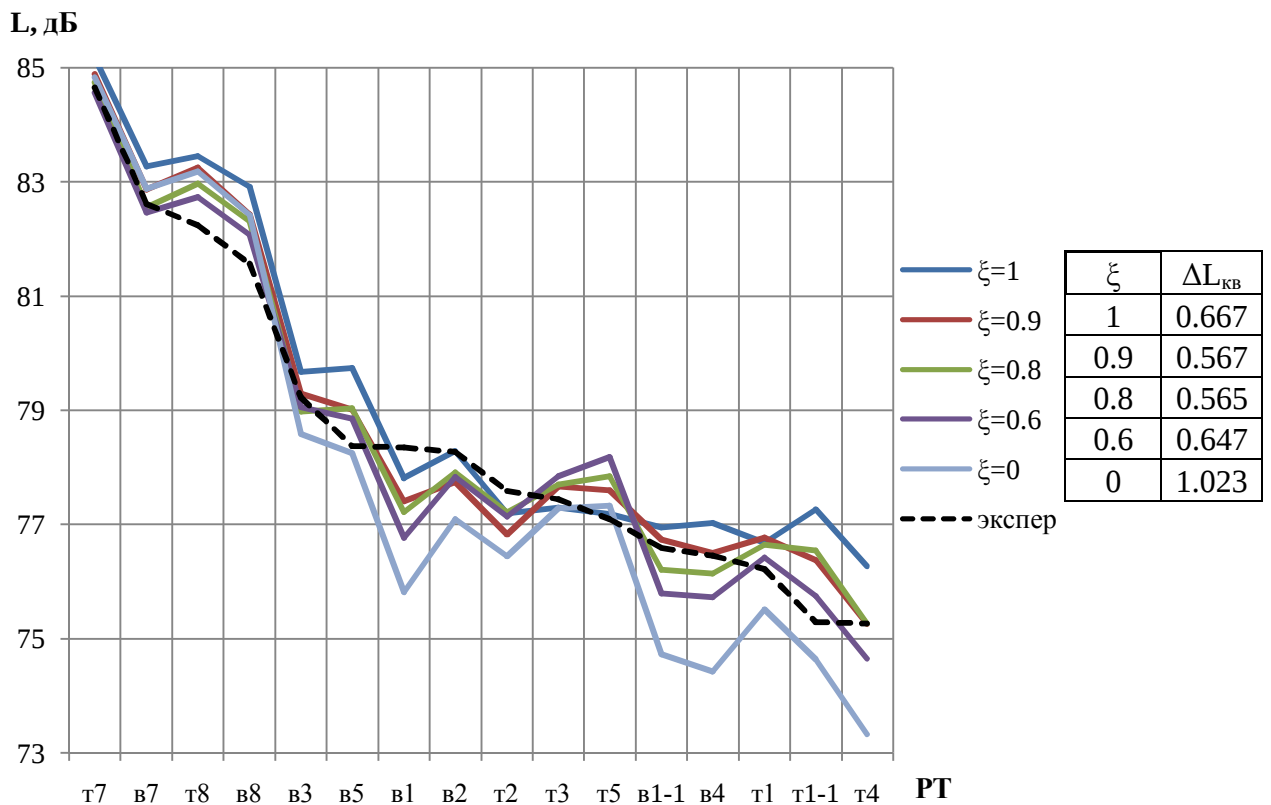


Рисунок 4.20 - Графики измеренных и рассчитанных уровней звукового давления при различных значениях коэффициента рассеивания ограждений. Источник в точке ИШ4

Таким образом, по результатам расчетов и эксперимента установлено, что в помещениях офисов с перегородками неполной высоты и с большим количеством офисного оборудования средний по помещениям коэффициент доли зеркально отраженной энергии можно принимать равным $\xi=0.7$.

Более низкая величина коэффициента ξ по сравнению с результатами экспериментов в п.4.31 и п.4.32 объясняется большим количеством в офисах рассеивающего звук оборудования. Подобные результаты увеличения рассеяния звуковой энергии на мебели и оборудовании были также получены Макаровым А.М. в работе [57]. Расхождение результатов расчетов при $\xi=0.7$ и эксперимента не превышает 2-3 дБ.

Выводы по главе 4

1. Разработана методика расчета шума в системах помещений, имеющих связь через общее пространство технологических потолков. Методика позволяет производить проектирование средств шумозащиты в помещениях с учетом распространения шума в пространстве потолков, возникающего внутри пространства от воздуховодов и проникающего в него из шумных помещений. В комплексе мер по шумозащите используется возможное изменение высоты пространства, акустических характеристик поверхностей пространства и звукоизоляции конструкций потолка.

2. Разработана методика расчета шума в системах помещений с перегородками неполной высоты, связанных через общее воздушное пространство. При разработке использована комбинированная зеркально-диффузная модель распространения отраженного шума в помещениях. Модель адаптирована для решения задач по оценке распространения шума в системах связанных помещений, объединенных общим воздушным пространством.

3. Для разработанных в главе методик выполнены компьютерные программы, обеспечивающие возможность оценки шумового режима в таких

системах акустически связанных помещений и акустической эффективности проектируемых строительно-акустических средств защиты от шума.

4. Экспериментальная проверка, предложенной методики расчета шума в системах связанных общим пространством помещений показала ее достаточную точность и надежность. Расхождение экспериментальных и расчетных данных в наиболее сложных случаях не превышает 3 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы позволяют представить ее следующие итоги:

1. При исследовании звуковых полей в системах акустически связанных соразмерных помещений с использованием статистического метода акустики и интегрального уравнения Куттруфа получены новые данные о влиянии параметров помещений, источника шума и акустических связей на распределение звуковой энергии в этих системах. На основе этих данных произведено совершенствование статистического метода расчета шума. Показано эффективное использование метода и компьютерной программы для проектирования строительно-акустических средств защиты в ячейковых и анфиладных системах планировок.

2. Разработаны метод расчета шума и компьютерная программа для его реализации в помещениях с коридорными и ячейково-коридорными планировками. При разработке метода учтен зеркально-диффузный характер отражения звука от ограждений коридора и особенности распространения звуковой энергии в нем. Метод объективно реагирует на изменение звукоизоляции ограждений и может эффективно использоваться при проектировании строительно-акустических средств защиты в зданиях с такими планировками.

3. Разработана методика расчета шума в системах помещений, имеющих связь через общее пространство технологических потолков. Методика и компьютерная программа для ее реализации позволяет производить проектирование средств шумозащиты в помещениях системы с учетом распространения шума в пространстве потолков, возникающего внутри пространства от воздуховодов и проникающего в него из шумных помещений. В комплексе мер по шумозащите могут использоваться возможные изменения высоты пространства, акустических характеристик поверхностей пространства и звукоизоляции конструкций потолка.

4. Разработаны методика расчета шума в системах помещений с перегородками неполной высоты, связанных через общее воздушное пространство, и компьютерная программа для ее реализации. При разработке использована комбинированная зеркально-диффузная модель распространения отраженного

шума в помещениях. Модель адаптирована для решения задач по оценке распространения шума в системах связанных помещений, объединенных общим воздушным пространством. Методика и программа позволяют эффективно проектировать строительно-акустические средства защиты в сложных системах планировок.

5. Выполнены экспериментальные исследования процессов формирования шума в различных системах связанных помещений. На основе сравнения расчетных и экспериментальных данных установлено, что предложенные методы и методики обеспечивают требуемую точность расчетов и адекватно реагируют на изменение планировочных параметров помещений, их акустических характеристик и акустических связей в системе.

Рекомендации по использованию результатов диссертации:

- разработанные методы и методики расчета шума в системах акустически связанных помещений следует использовать в практике проектирования строительно-акустических средств защиты от шума в гражданских зданиях;

- методы и методики расчета шума могут использоваться при разработке новых объемно-планировочных и конструктивных решений в современных зданиях со свободными системами планировок.

Перспективы разработки темы исследований. На основе предложенных методов необходимо проведение исследований влияния характеристик звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций на шумовой режим помещений с целью уточнения нормативных требований к звукоизоляции внутренних ограждений, исходя из звуковой мощности современных источников шума в гражданских зданиях и в первую очередь, в жилых зданиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов, А.И. Влияние звукоизоляции ограждений на распространение внутриквартирного шума / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев, И.Л. Шубин // Проблемы экологической безопасности и энергосбережения в строительстве и ЖКХ: Материалы Международ. науч.-практ. конф. М. -Ковала, 2014. С. 253-258.

2. Антонов, А.И. Влияние звукопоглощения помещений и звукоизоляции дверей на шумовой режим в квартирах жилых зданий / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев, И.Л. Шубин // Жилищное строительство. - 2014.- № 6. - С. 45-48.

3. Антонов, А.И. Инженерный метод расчета шума в технических помещениях гражданских зданий / О.А. Жоголева, Т.С. Яровая // Устойчивое развитие региона: Архитектура, строительство, транспорт: Материалы 2-й Международ. науч.-практ. конф. Тамбов, 2015. С. 50-54.

4. Антонов, А.И. Исследования длины свободного пробега звуковых лучей в производственных помещениях с оборудованием / А.И. Антонов, В.И. Леденев, А.М. Макаров // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2007. -№4. – С.115-121.

5. Антонов, А.И. Комбинированный метод расчета шумового режима в производственных зданиях теплоэлектроцентралей / А.И. Антонов, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2011. - № 2. - С. 16-24.

6. Антонов, А.И. Метод оценки акустической эффективности архитектурно-планировочных и строительно-акустических мер снижения шума в квартирах от внутренних источников. / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев // Вестник Центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. Материалы академических научных чтений «Проблемы развития регионов в свете концепции безопасности и живучести урбанизационных территорий» Вып. 12 - Курск - Воронеж: РААСН, ЮЗГУ. - 2013. - С87-92.

7. Антонов, А.И. Метод оценки шумового режима в общественных зданиях с анфиладными системами планировки / А.И. Антонов, А.В. Головкин, О.А. Жоголева, В.И. Леденев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. - 2014. - № 4 (54). - С. 139-144.

8. Антонов, А.И. Метод расчета шума в зданиях с анфиладной планировкой как системах акустически связанных помещений / А.И. Антонов, А.В. Головкин, Д.Г. Графский, О.А. Жоголева // Сборник научных статей Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства». г.Пенза. - 2013. - С.13-17.

9. Антонов, А.И. Метод расчета шума в квартирах с ячейковыми системами планировки / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев, И.Л. Шубин // Жилищное строительство. - 2013. - № 7. - С. 33-35

10. Антонов, А.И. Метод расчета шумового режима в зданиях с коридорными системами планировки / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев // Строительство и реконструкция. - 2013. - № 3 (47). - С. 28-32.

11. Антонов, А.И. Методы автоматизированного проектирования ограждающих конструкций производственных зданий по условиям защиты от шума: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.И. Антонов. – М., 1989. – 23 с.

12. Антонов, А.И. Методы расчета уровней прямого звука, излучаемого плоскими источниками шума в городской застройке / А.И. Антонов, В.П. Гусев, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин // Жилищное строительство. - 2013. - № 6. - С. 13-15.

13. Антонов, А.И. Оценка распространения шума в зданиях с анфиладной системой планировки / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, А.В. Головкин, И.Л. Шубин // Проблемы экологической безопасности и энергосбережения в строительстве и ЖКХ: Материалы Международ. науч.-практ. конф. М. -Ковала, 2014. С. 233-236.

14. Антонов, А.И. Оценка шумового режима акустически связанных помещений на основе статистического энергетического подхода к расчету отраженных шумовых полей / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев, И.Л. Шубин // Материалы Международной научно-практической конференции «Экологическая безопасность и энергосбережение в строительстве». Москва-Кавала, 17-27 августа 2013. – С. 128-133.

15. Антонов, А.И. Расчет шума при проектировании звукоизолирующих кожухов технологического оборудования / А.И. Антонов, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин, И.Л. Шубин // Строительные материалы. – 2015. - №6. – С.39-41.

16. Антонов, А.И. Расчеты уровней прямого звука от линейных источников шума, располагающихся на промышленных предприятиях и в городской застройке / А.И. Антонов, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. - 2013. - № 31-1 (50). - С. 329-335.

17. Антонов, А.И. Условия, определяющие процессы формирования шумового режима в замкнутых объемах, и их учет при оценке распределения звуковой энергии в помещениях / А.И. Антонов, А.В. Бацунова, И.Л. Шубин // Приволжский научный журнал. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2015. - №3. – С.89-96.

18. Архитектурное проектирование жилых зданий / М.В. Лисициан, В.Л. Пашковский, З.В. Петунина и др.; Под ред. М.В. Лисицина, Е.С. Пронина. – М.: Архитектура - С, 2006. – 488с.

19. Архитектурное проектирование общественных зданий и сооружений: Учебник для вузов / В.В. Адамович, Б.Г. Бархин, В.А. Варезкин и др.; Под общ. ред. И.Е. Рожина, А.И. Урбаха. – 2е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 543с.

20. Бацунова А.В. Разработка методов расчета непостоянного шума для проектирования строительно-акустических средств защиты в зданиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.В.Бацунова. – М., 2015. – 20с.

21. Борьба с шумом на производстве / Под ред. Е.Я. Юдина. М.: Машиностроение, 1985. - 400 с.

22. Борьба с шумом на производстве: справочник Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн [и др.]. М.: Стройиздат. 1987. – 218с.

23. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 502 с.

24. Головкин, А.В. Экспериментальные исследования звуковых полей в акустически связанных помещениях // МИИТ. — М. — 1985. — 15 с. — Деп. в ЦИНИС, № 6044-85.

25. Головкин, А.В., Снижение шума выгородками в промышленных зданиях / А.В. Головкин, С.И. Крышов, С.Д. Ковригин Ковригин // Акустическая изоляция

помещений и оборудования в промышленности и на транспорте: Материалы научно-технического семинара. Л.: ЛДНТП. - 1985. - С. 88-91.

26. Головкин, А.В. Оценка звуковых полей в системах акустически связанных помещений при проектировании зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.В.Головкин. – М., 1986. – 24с.

27. Гусев, В.П. Метод оценки распространения шума в крупногабаритных газозвуковых трактах энергетических объектов / В.П. Гусев, В.И. Леденев, И.В. Матвеева // Academia. Архитектура и строительство. - 2009. - № 5. - С. 104-107.

28. Гусев, В.П. Метод оценки распространения шума по воздушным каналам систем отопления, вентиляции и кондиционирования / В.П. Гусев, О.А. Жоголева, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин // Жилищное строительство. - 2012. - № 6. - С. 52-54.

29. Гусев, В.П. Расчет и проектирование систем вентиляции, кондиционирования воздуха и воздушного отопления / В.П. Гусев, В.И. Леденев, М.Ю. Лешко // Справочное пособие под редакцией И.Л. Шубина. М.: НИИСФ РААСН. – 80с.

30. Гусев, В.П. Учет характера отражения звука от поверхностей ограждений производственных помещений ТЭЦ в методах расчета в них уровней шума // В.П. Гусев, В.И. Леденев, И.В. Матвеева, Е.О. Соломатин // Энергосбережение и экология в строительстве и ЖКХ, транспортная и промышленная экология: материалы междунар. науч.-практ. конф. / НИИСФ РААСН. - Москва – Будва, 2010. - С. 259-262.

31. Гусев, В.П. Энергетический метод оценки распространения шума в газозвуковых трактах / В.П. Гусев, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин // Academia. Архитектура и строительство. - 2010. - № 3. - С. 230-233.

32. Демин, О.Б. Использование принципов геометрической теории акустики для характеристики стационарного звукового поля в замкнутых и незамкнутых пространствах // Труды МИИТа «Вопросы строительства на железнодорожном транспорте». – М.: 1976. – Вып. 521. – С. 68-73.

33. Жоголева О.А. Оценка влияния звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций на процесс распространения шума в квартирах с ячеевыми системами планировки / О.А. Жоголева, А.А. Родионова, Т.С. Яровая // Актуальные проблемы городского строительства: Сборник трудов Международ. науч.-техн. конф. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2013. С.252-256

34. Жоголева, О.А. Возможность применения комбинированной расчетной модели для оценки шума в помещениях с рассеивающим звук оборудованием / О.А. Жоголева, Е.О. Соломатин // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: сб. науч. тр. по материалам междунар. заочной науч.-практ. конф. / Мин-во обр и науки - М., 2013. - Ч. III. - С. 47-49.

35. Жоголева, О.А. Исследование характера отражения звука от поверхностей в крупногабаритных газовоздушных каналах и его влияние на точность расчета распространения шума в них / О.А. Жоголева, Е.О. Соломатин // Актуальные вопросы строительной физики – энергосбережение, надежность, экологическая безопасность: материалы конф. IV Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Г.Л. Осипова. г. Москва, 2012.

36. Заборов, В.И. О пределах применимости расчета отраженного звука по статистической теории / В.И. Заборов, Н.А. Кочергин // Доклады III Всесоюзной конференции по борьбе с шумом и вибрацией. Секция "Борьба с шумом" – Челябинск, 1980. - С. 319-322.

37. Качерович, Л.Н. Акустика зрительных залов. – М.: Искусство, 1968. – 207 с.

38. Ковригин, С. Д. Анализ звуковых полей производственных помещений / С.Д. Ковригин, С.И. Крышов, В.И. Леденев // Room and Building Acoustics: 19th Acoustical Conference, section «Room acoustics». – Bratislava, Czechoslovakia , 1980. – pp. 116-119.

39. Ковригин, С.Д. Использование принципов геометрической акустики для анализа поля в помещении / С.Д. Ковригин, О.Б. Демин, В.А. Горин // Труды VI акустической конференции. – Будапешт, 1976. – С. 49-52.

40. Конструкции гражданских зданий: Учеб. пособие для вузов / Т.Г. Маклакова, С.М. Нанасова, Е.Д. Бородай, В.П. Житкова; Под. ред. Т.Г. Маклаковой. – М.: Стройиздат, 1986. – 135с.

41. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г.Корн, Т.Корн – М.: Наука, 1973. – 831 с.

42. Косицина, Э.С. Расчет параметров звуковых полей источников, работающих в закрытых помещениях, методом мнимых источников / Э.С. Косицина, В.Р. Шеринский // Борьба с шумом и звуковой вибрацией: материалы семинара. – М.: МДНТП, 1972. – С.60-65.

43. Кочкин, А.А. Звукоизоляция легких ограждающих конструкций зданий из элементов с вибродемпфирующими слоями: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / А.А. Кочкин. – М., 2013. – 47с.

44. Крышов, С. И. Инженерная оценка распространения шума в тоннелях и коридорах / С.И. Крышов, В.И. Леденев, И.В. Матвеева // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5-2 (38). - С.393-396.

45. Крышов, С.И. Расчет звуковых полей при проектировании производственных помещений // Автореферат дисс. канд. техн. наук. М.; 1981. -24 с.

46. Кузнецов, В.А. Методы расчета ожидаемых уровней звукового давления на рабочих местах в помещениях промышленных предприятий / В.А. Кузнецов, Г.Л. Осипов, Е.Н. Федосеева // Труды НИИСФ. – М.: - 1975. – Вып. 11. – С4-48.

47. Кузнецов, В.А. Расчет уровней шума в незаглушенных и заглушенных моделях производственных помещений / В.А. Кузнецов, Г.Л. Осипов, Е.Н. Федосеева // Борьба с шумом и звуковой вибрацией (материалы семинара). – М.: МДНТП. - 197.– С47-52

48. Леденев, В. И. Влияние характера отражения звука от поверхностей ограждений на распределение отраженной звуковой энергии в помещениях // В. И. Леденев, И. В. Матвеева, Е. О. Соломатин // Проблемы и пути развития энергосбережения и защиты от шума в строительстве и ЖКХ: материалы XV междунар. науч.-практ. конф. / НИИСФ РААСН. - Москва-Будва, 2011. - С. 148-153.

49. Леденев, В.И. Комбинированный статистический энергетический метод расчета шумовых полей в производственных помещениях / В.И. Леденев, И.В. Матвеева, О.Б. Демин // Современные проблемы строительства и реконструкции зданий и сооружений: материалы междунар. науч. - техн. конф. – Вологда, 2003. – С. 133-136.

50. Леденев, В.И. Метод оценки шумового режима квартир / В.И. Леденев, А.Ю. Воронков, А.Е. Жданов // Жилищное строительство. – 2004. – № 11. – С. 15-17.

51. Леденев, В.И. Расчет шумовых полей в системах акустически связанных помещений / В.И. Леденев, А.И. Антонов // Вестник ТГТУ. Тамбов. - 1996. - Т.2 - № 1-2.-С. 149-157.

52. Леденев, В.И. Статистические энергетические методы расчета отраженных шумовых полей помещений / В.И. Леденев, А.И. Антонов, А.Е. Жданов. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2003. - Т. 9. - № 4. - С. 713-717.

53. Леденев, В.И. Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании производственных зданий. / В.И. Леденев // - Тамбов: Изд-во Тамб.гос.техн.ун-та, - 2000.

54. Леденев, В.И. Физико-технические основы распространения воздушного шума в производственных зданиях : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.23.01 / В.И. Леденев. – М., 2001. – 32 с.

55. Лифшиц, С.Я. Курс архитектурной акустики. – М. –Л.: ОНТИ, 1937. – 236с.

56. Макаров, А.М. Метод расчета энергетических параметров шумовых полей в производственных помещениях с технологическим оборудованием / А.М. Макаров, А.И. Антонов, В.И. Леденев // Проблемы и перспективы развития жилищно-коммунального комплекса города: Шестая Международная научно-практическая конференция 1-4 апреля 2008. – М., 2008. – Т.2. – С. 115-118.

57. Макаров, А.М. Оценка шумового режима при проектировании шумозащиты в производственных зданиях с помещениями сложной формы и с технологическим оборудованием: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.01 / А.М. Макаров. – М., 2009. – 23 с.

58. Маньковский, В.С. Акустика студий и залов для звуковоспроизведения - М.: Искусство - 1966.

59. Матвеева, И. В. Комбинированный метод расчета шумовых полей производственных помещений при направленном-рассеянном отражении звука / И.В. Матвеева, В.И. Леденев // Труды Тамбовского государственного технического университета: сб. науч. ст. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2003. – Вып. 14. – С. 3-7.

60. Матвеева, И. В. Оценка звуковых полей помещений при проектировании объемно-планировочных и конструктивных решений производственных зданий с учетом защиты от шума: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / И.В. Матвеева. – М., 2000. – 19 с.

61. Михеев М.А., Михеева И.М. основы теплопередачи. - М.: Энергия, 1973. - 319с.
62. Морз, Ф. Колебания и звук / Ф. Морз. – Л.: Гостехтеориздат, 1949. – 496 с.
63. Павлов, Ю.М. Расчет времени реверберации в производственных помещениях при различных акустических условиях / Ю.М. Павлов, В.А. Демичев // Труды Гипростройавиапрома. – М., 1990. – № 32. – С. 26-32.
64. Розенберг, Л.Д. Метод расчета звуковых полей, образованных распределенными системами излучателей, работающих в закрытых помещениях // ЖТФ. – 1942. – Т. 12. – 220 с.
65. Рыбак, С.А. Некоторые особенности распределения интенсивности поля источника белого шума в прямоугольном помещении / С.А. Рыбак, С.И. Третьякова // Научные труды Вуз лит. ССР – Вильнюс, 1974. – Вып.1(22). – С.141-144.
66. Сапожков, Р.А. Теоретическая фотометрия. – Л.: Энергия, 1967. – 268с.
67. Свидетельство о государственной регистрации программа для ЭВМ №2014661638. Расчет звукового поля в системе соразмерных акустически связанных помещений / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, И.Л. Шубин – Заявка №2014619411; дата поступления 17.09.2014; зарегистрирована 10.11.2014г.
68. Свидетельство о государственной регистрации программа для ЭВМ №2014661639. Расчет эффективности звукоизолирующих конструкций в системе акустически связанных помещений / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев – Заявка №2014619412; дата поступления 17.09.2014; зарегистрирована 10.11.2014г.
69. Седов М.С., Бобылев В.Н. Расчет звукоизоляции однослойных ограждений на низких частотах – Горький: изд-во ГТУ, 1976.- 66с.
70. Скучик, Е. Основы акустики. Т1. М.: Мир, 1976. – 520с.
71. Скучик, Е. Основы акустики / Е. Скучик. – М.: Изд-во ин. литер., 1959. – Т.2. – 565 с.
72. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Г.Л. Осипов, Е. Я. Юдин, Г. Хюбнер [и др.]; под ред. Г. Л. Осипова, Е. Я. Юдина. - М.: Стройиздат, 1987. - 558 с.
73. СНиП II-V.6-62. Ограждающие конструкции. Нормы проектирования. – М. 1963.

74. Солодова, М. А. Экспериментальные исследования шума в аналоге крупногабаритных воздушных каналов / М. А. Солодова, Е. О. Соломатин // Вестник Московского Государственного Строительного Университета. - 2011. - № 3, т. 1. - С. 97-102.

75. Соломатин, Е.О. Метод оценки шумового режима в производственных помещениях энергетических объектов / А.И. Антонов, Е.О. Соломатин, В.И. Леденев, В.П. Гусев. // Academia. Архитектура и строительство. - 2009. - № 5. - С. 250-252.

76. Соломатин, Е.О. Оценка шумового режима при разработке строительно-акустических средств снижения шума в зданиях с крупногабаритным оборудованием и на прилегающим к ним территориях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Е.О. Соломатин. – М., 2014. – 18 с.

77. СП 51.13330.2011«Защита от шума. Актуализированная версия СНиП 23-03-2003». - М. 2011.

78. Справочник проектировщика. Защита от шума / под ред. Е.Я. Юдина – М.: Стройиздат, 1974. – 136 с.

79. Фурдеев, В.В. Электроакустика / В.В. Фурдеев. - М.: Гостехтеориздат, 1948. - 515с.

80. Чигринский, Г.А. Картина отражений и ее применение в архитектурной акустике // ДАН СССР. – 1939. – Т. XXIII. – Вып. 7. – 631 с.

81. Шеринский, В.Р. О математической модели акустических источников, работающих в помещениях, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда // Доклады III Всесоюзной конференции по борьбе с шумом и вибрацией. Секция «Борьба с шумом». – Челябинск, 1980. С. 338-341.

82. Antonov, A.I. The combined method of calculation of noise conditions in industrial buildings of thermal power stations / A.I. Antonov, V.I. Ledenev, Ye.O. Solomatin // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. - 2012. - № 1. - С. 7-16.

83. Billon, A. Modeling the sound transmission between rooms coupled through partition walls by using a diffusion model. / A. Billon, C. Foy, J. Picaut, V. Valeau, and A. Sakout // Journal of the Acoustical Society of America, 2008. - vol. 123. - no. 6. - pp. 4261–4271.

84. Billon, A. Prediction of the reverberation time in high absorbent room using a modified-diffusion model. / A. Billon, J. Picaut, and A. Sakout // *Applied Acoustics*, 2008. - vol. 69. - no. 1. - pp. 68–74.
85. Billon, A. Introducing atmospheric attenuation within a diffusion model for room-acoustic predictions (L). / A. Billon, J. Picaut, C. Foy, V. Valeau, and A. Sakout // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008. - vol. 123. - no. 6. - pp. 4040–4043.
86. Billon, A. On the use of a diffusion model for acoustically coupled rooms. / A. Billon, V. Valeau, A. Sakout, and J. Picaut // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006. - vol. 120. - no. 4. - pp. 2043–2054.
87. Bradley, D. T. The effects of simple coupled volume geometry on the objective and subjective results from non exponential decay / D.T. Bradley, L.M. Wang // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2005. – Vol. 118(3). – pp. 1480–1490.
88. Dai, Gen-hua. Estimation of the influence of diffusion on reverberation using ray-tracing simulation / Gen-hua Dai // *Acustica*, 1983.- V.54. – pp. 43-45.
89. Ermann, M. Coupled volumes: Aperture size and the double sloped decay of concert halls. / M. Ermann // *Building Acoustics*, 2005. - Vol.12(1), - pp. 1–14.
90. Eyring, C.F. Reverberation time measurement in coupled rooms // *JASA.*, 1931. – V.3. -№2. – pp.11-206.
91. Foy, C. An empirical diffusion model for acoustic prediction in rooms with mixed diffuse and specular reflections. / C. Foy, V. Valeau, A. Billon, J. Picaut, and A. Sakout // *Acta Acustica United with Acustica*, 2009. - vol. 95. - no. 1. - pp. 97–105.
92. Geddes, E.R. Finite element approximation for low-frequency sound in a room with absorption / E.R. Geddes, J.C. Porter // *JASA*, 1988. - Vol. 83, №4. – pp. 1431-1435.
93. Gremer, L. Gekoppelte Raume. - *Statistische Raumakustik*, 1961, ch.3, pp.56-81.
94. Hodgson, M. Measurements of the influence of fittings and roof pitch on the sound field in panel-roof factories / M. Hodgson // *Applied Acoustics*, 1983. - №4. – pp.369-391.
95. Hodgson, M. On the accuracy of models for predicting sound propagation in fitted rooms./ M. Hodgson// *Journal of the Acoustical Society of America*, 1990. - Vol. 88, - N. 2, - pp. 871–878.

96. Jeske, W. Schallausbreitung in Werkhallen mit Teiltrennwänden // Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, 1970. - Bd. 79. - № 4-5. - pp. 149-156.
97. Jing, Y. A modified diffusion equation for room-acoustic predication (L). / Y. Jing and N. Xiang // Journal of the Acoustical Society of America, 2007. - vol. 121, - no. 6. - pp. 3284–3287.
98. Jing, Y. On boundary conditions for the diffusion equation in roomacoustic prediction: theory, simulations, and experiments. / Y. Jing and N. Xiang // Journal of the Acoustical Society of America, 2008. - vol. 123. - no. 1. - pp. 145–153.
99. Jing, Y. Visualizations of sound energy across coupled rooms using a diffusion equation model. / Y. Jing and N. Xiang // Journal of the Acoustical Society of America, 2009. - vol. 124. - no. 6. - pp. EL360–EL365.
100. Kruzins, E. The prediction of sound fields in non-diffuse spaces using a random walk approach. / E. Kruzins, F. R. Fricke // Journal of Sound and Vibration. - 1982. p. 549-564.
101. Kruzinst, E. The prediction of sound fields inside non-diffuse spaces: transmission loss considerations. / E. Kruzinst // Department of Architectural Science, Sydney University. Sydney, New South Wales. Australia. – 2006. pp. 439-445
102. Kuttruff, H. Nachhall und effektive Absorption in Räumen mit diffuser Wandreflexion // Acustica, 1976. – vol. 35. – no. 3. – pp.141-153.
103. Kuttruff, H. Room acoustics / H. Kuttruff. - London: Applied Science, 1973. – 298 p.
104. Kuttruff, H. Simulierte Nachhalkurven in Rechteckraumen mit diffusem Shallfeld / H. Kuttruff // Acustica, 1971. – Vol.25, № 6. – pp. 333-342.
105. Kuttruff, H. Zur Abhanqigkeit der Raumnachhalls von deu Wand diffusitat und von Raumform / H. Kuttruff, T. Strassen // Acustica, 1980. – V.45. – N4. – pp.246-255.
106. Lyle, C.D. An improved theory for transact sound behavior in coupled diffuse spaces // Acoust. Lett, 1981. – V.4 - №12. – pp.248-252.
107. Lyle, C.D. The Behavior of sound in Naturally spaces. Part 1; Natural Coupling at Hugh Frequencies. – Ph.D. Thesis, Chelses Lollege, London, 1981.
108. Lyle, C.D. The prediction of steady state sound levels in naturally coupled enclosures // Acoust. Lett, 1981. - V.5. - № 1. - pp. 16-21.

109. Navarro, J. A theoretical approach to room acoustic model based on a radiative transfer model. / J. Navarro, F. Jacobsen, J. Escolano, and J. Lopez // *Acta Acustica United with Acustica*, 2010. - vol. 96. - pp. 1078–1089.
110. Ollendorff, F. Diffiisionstheorie des Schallfeldes im Strassentunnel // *Acústica*, 1976. - V.34. - № 2. - pp. 311-315.
111. Ollendorff, F. Statistische Raumakustik als Diffusionsproblem (ein Vorschlag) // *Acústica*, 1969. - V.21. - № 2. - pp. 236-245.
112. Picaut, J. Sound field modeling in architectural acoustics using a diffusion equation. / J. Picaut, V. Valeau, A. Billon, and A. Sakout // in *Proceedings of the 20th International Conference on Noise*, pp. 1–8, Honolulu, Hawaii, USA, 2006.
113. Picaut, J. A mathematical model of diffuse sound field based on a diffusion equation. / J. Picaut, L. Simon, and J. D. Polack, // *Acustica*, 1997. - vol. 83. - no. 4, pp. 614–621,
114. Picaut, J. Sound field in long rooms with diffusely reflecting boundaries. / J. Picaut, L. Simon, and J. D. Polack // *Applied Acoustics*, 1999. - vol. 56. - no. 4, pp. 217–240.
115. Pu, H. Different sound decay patterns and energy feedback in coupled volumes. / H. Pu, X. Qiu, and J. Wang // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011. - vol. 129. - no. 4. - pp. 1972–1980.
116. Sabine, W.C. *Collected papers an acoustics*. – New York: Dower publications, 1964. - 299 p.
117. Santon, F. Prevision des niveaux de bruit dans les ateliers textiles / F. Santon, A. Daumas // *Rev, d'acoustique*, 1983. - №65. – pp.109-112.
118. Schroder, M.R. Mesaurement of Sound diffusion in reverberation Chambers // *JASA*, 1959. - V. 31. - № 11. - pp. 1407-1414.
119. Schroeder, M.R. Computer models for concert hall acoustics / M.R. Schroeder // *AJP*. – 1973. – V.41, №4. – pp.461-471.
120. Schroeder, M.R. Digital simulations of sound transmission in reverberant spaces / M.R. Schroeder // *JASA*. – 1970. – Vol.47, №2 – pp.424-431.
121. Schroeder, M.R. Progress in architectural acoustics and artificial reverberation. Concert hall acoustics and number theory / M.R. Schroeder // *Journ. Audio Eng. Soc*, 1984. – V.32. – N4. – pp.456-468.

122. Summers, J. E. Adapting a randomized beam-axis-tracing algorithm to modeling of coupled rooms via late-part ray tracing. / J. E. Summers, R. R. Torres, Y. Shimizu, B.-I. L. Dalenbäck // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2005. - Vol. 118(3), - pp. 1491–1502.

123. Summers, J. E. Statistical-acoustics models of energy decay in systems of coupled rooms and their relation to geometrical acoustics. / J. E. Summers, R. R. Torres, and Y. Shimizu // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2004. - vol. 116. - no. 2, - pp. 958–969.

124. Thompson, C. On the acoustics of a coupled space. / C. Thompson // *Journal of the Acoustical Society of America*, 1984. - Vol. 75(3). – pp. 707–714.

125. Valeau, V. A diffusion-based analogy for the prediction of sound fields in fitted rooms. / V. Valeau, M. Hodgson, and J. Picaut // *Acta Acustica United with Acustica*, 2007. - vol. 93. - no. 1. - pp. 94–105.

126. Valeau, V. On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction. / V. Valeau, J. Picaut, M. Hodgson, // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006. vol. 119. - no. 3. - pp. 1504–1513.

127. Visentin, C. A numerical investigation of the sound intensity field in rooms by using diffusion theory and particle tracing / C. Visentin, V. Valeau, N. Prodi, and J. Picaut // in *Proceedings of the 19th International Congress on Acoustics (ICA '10)*, 2010. - pp. 1–6, Sydney, Australia.

128. Wayman, J.L. Three-dimensional computer simulation of reverberation in an enclosure / J.L. Wayman, J.P. Vanyo // *JASA*, 1977. – V.62, №1. – pp. 213-215.

129. Wente, E.C. The Characteristics of Sound Transmission in Rooms // *JASA*. , 1935. - №7. – pp. 123-126.

130. Zwicker, C. Amortissement du son dans les canaux d'acrage / C. Zwicker, W. Kosten // *Rewue d'Acoustique*, 1935. – Vol. 4.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**Результаты экспериментальных исследований и расчетов в системе
акустически связанных помещений с коридорной планировкой**

В приложении приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных в помещениях коридорной системы планировки, схема которой приведена на рисунке 3.13. Параметры помещений, звукоизоляция дверей и коэффициенты звукопоглощения даны в таблице 3.3

Таблица П.1.1 - Экспериментальные и расчетные уровни в коридоре и помещениях при расположении источника в 1 точке коридора, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Уровни звукового давления L , дБ							
в коридоре				в помещениях			
№ точ.	Экспериментальный уровень, $L_{экс_i}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч_i}$ дБ	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$	№ пом.	Экспериментальный уровень $L_{экс_i}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч_i}$ дБ	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$
1	90.55	90.01	0.54	1	74.92	77.45	-2.53
2	82.45	80.60	1.85	2	62.30	65.60	-3.30
3	77.94	76.80	1.14	3	72.02	73.70	-1.70
4	75.55	75.30	0.25	4	66.80	69.70	-2.90
5	72.86	72.50	0.36	5	63.57	64.70	-1.13
6	69.38	70.70	-1.32	6	51.31	54.50	-3.14
7	67.16	68.50	-1.34	7	54.29	56.70	-2.41
8	66.59	67.70	-1.11	8	46.33	49.40	-3.07
9	65.98	67.30	-1.32	9	53.72	54.49	-0.77
10	65.45	65.90	-0.45	10	52.06	52.50	-0.44
11	64.45	65.10	-0.65	11	48.57	47.60	0.97
12	62.18	64.30	-2.12	12	46.43	47.22	-0.79
13	61.67	63.60	-1.93	13	51.73	54.14	-2.41
14	57.12	60.10	-2.98	14	66.82	67.25	-0.43
15	59.48	63.00	-3.52	15	64.29	65.25	-0.96
16	54.37	56.20	-1.83	16	60.02	58.41	1.61
17	52.54	54.60	-2.06	17	68.93	67.53	1.40
18	50.86	52.90	-2.04	18	70.01	73.81	-3.80
19	50.11	52.40	-2.29	19	68.03	70.79	-2.76
20	48.21	51.70	-3.49	20	77.53	80.83	-3.30

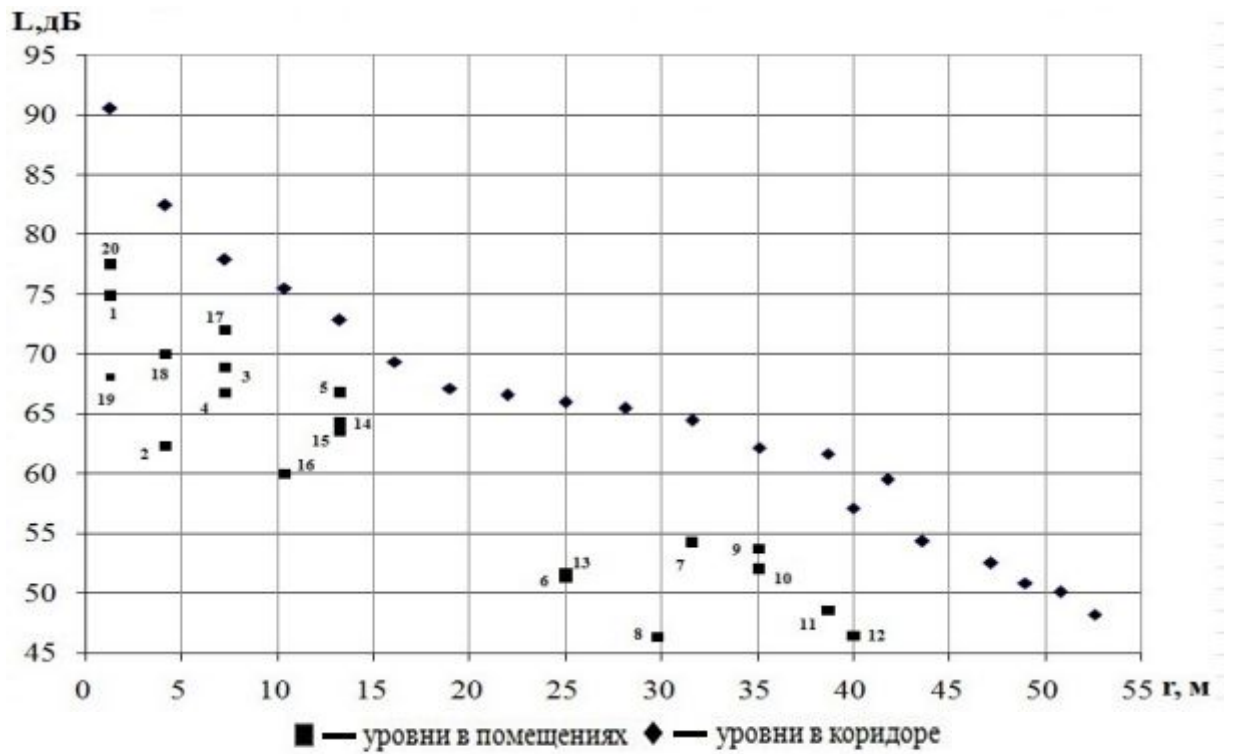


Рисунок П.1.1 - Экспериментальные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 1 точке коридора, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

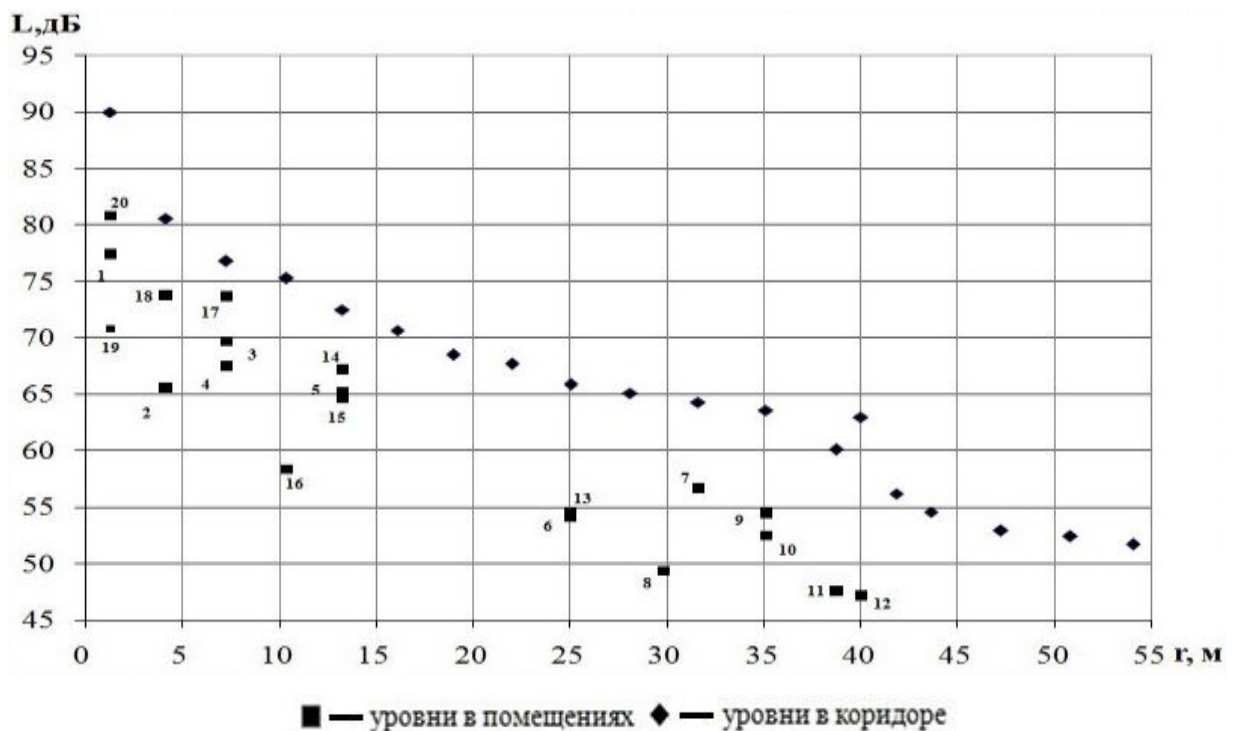


Рисунок П.1.2 - Расчетные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 1 точке коридора, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Таблица П.1.2 - Экспериментальные и расчетные уровни в коридоре и помещениях при расположении источника в 1 точке коридора, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Уровни звукового давления L , дБ							
в коридоре				в помещениях			
№ точ.	Экспериментальный уровень, $L_{экс_i}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч_i}$ дБ	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$	№ пом.	Экспериментальный уровень $L_{экс_i}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч_i}$ дБ	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$
1	91.02	91.00	0.02	1	60.26	63.10	-2.84
2	82.53	81.10	1.43	2	59.10	62.70	-3.60
3	78.08	77.90	0.18	3	74.19	74.80	-0.61
4	77.34	76.00	1.34	4	52.09	55.00	-2.91
5	75.32	74.50	0.82	5	53.24	53.70	-0.46
6	71.90	72.10	-0.20	6	47.90	46.50	1.40
7	69.41	71.10	-1.69	7	42.42	45.00	-2.58
8	68.03	70.60	-2.57	8	28.48	26.89	1.59
9	67.48	69.40	-1.92	9	42.77	41.50	1.27
10	67.20	68.20	-1.00	10	40.59	39.50	1.09
11	65.19	67.50	-2.31	11	34.10	31.50	2.60
12	64.29	66.30	-2.01	12	39.47	37.60	1.87
13	63.43	65.60	-2.17	13	45.20	48.20	-3.00
14	59.26	60.10	-0.84	14	57.16	60.00	-2.84
15	61.09	63.10	-2.01	15	54.26	57.14	-2.88
16	58.12	61.00	-2.88	16	41.50	44.40	-2.90
17	57.75	60.60	-2.85	17	39.38	37.40	1.98
18	55.81	58.80	-2.99	18	54.98	54.50	0.48
19	54.98	57.70	-2.72	19	49.80	52.50	-2.70
20	54.65	56.30	-1.65	20	64.61	67.60	-2.99

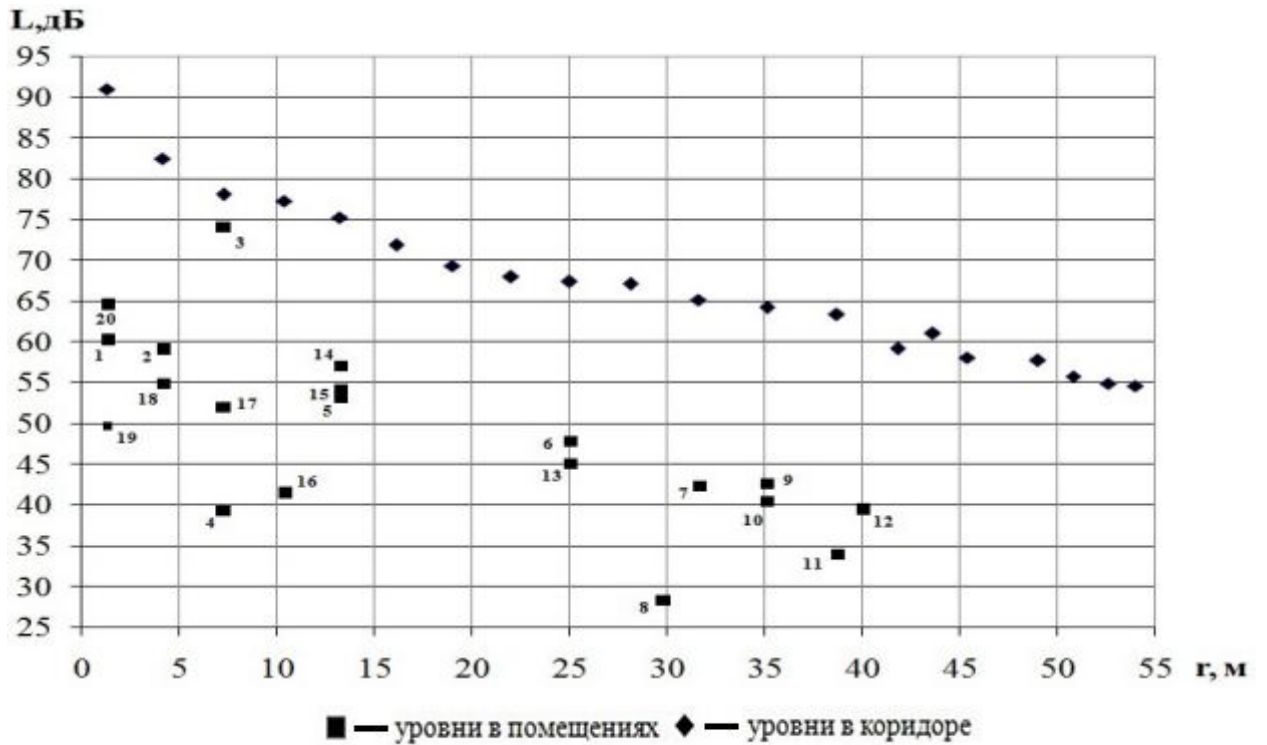


Рисунок П.1.3 - Экспериментальные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 1 точке коридора, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

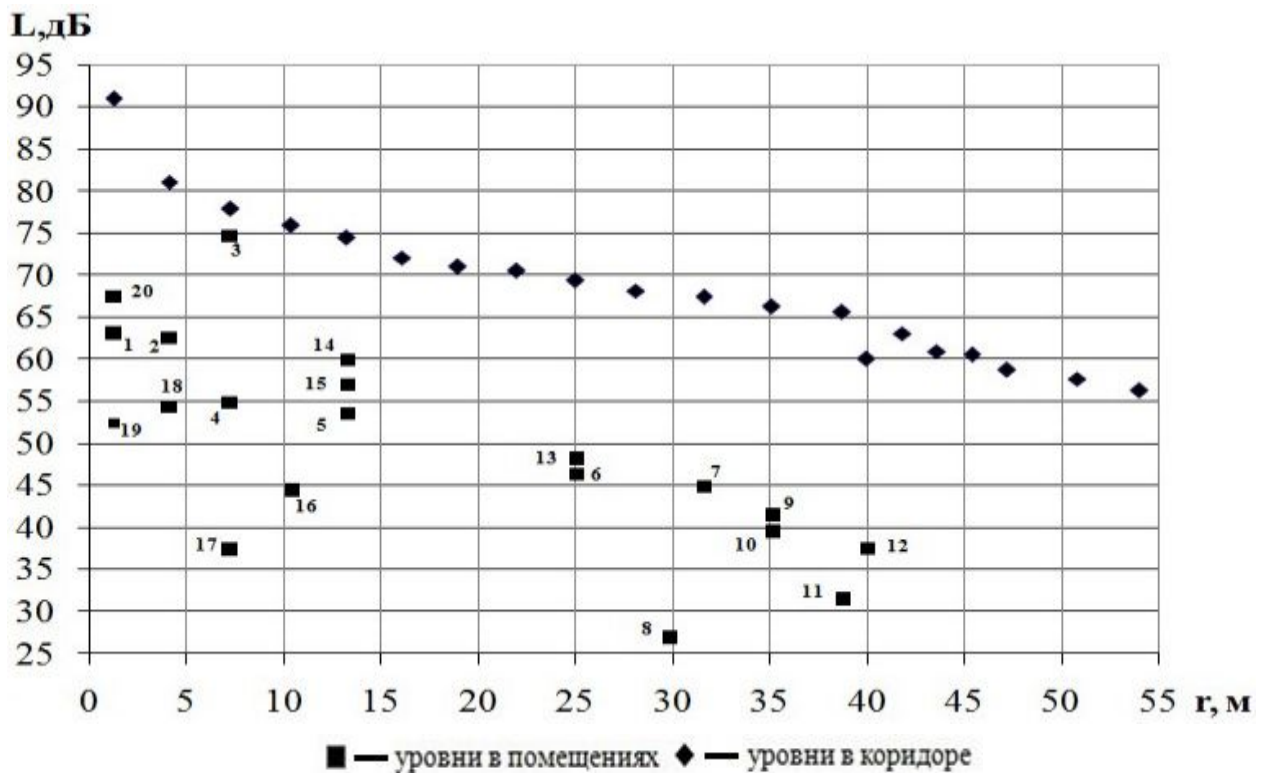


Рисунок П.1.4 - Расчетные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 1 точке коридора, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Таблица П.1.3 - Экспериментальные и расчетные уровни в коридоре и помещениях при расположении источника в 7 точке коридора, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Уровни звукового давления L , дБ							
в коридоре				в помещениях			
№ точ.	Экспериментальный уровень, $L_{экс}$; дБ	Расчетный уровень $L_{расч}$; дБ	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч}$	№ пом.	Экспериментальный уровень $L_{экс}$; дБ	Расчетный уровень $L_{расч}$; дБ	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч}$
1	68.86	70.60	-1.74	1	60.57	60.24	0.33
2	70.12	72.30	-2.18	2	61.31	63.47	-2.16
3	71.59	73.00	-1.41	3	68.25	71.19	-2.94
4	72.52	74.50	-1.98	4	62.99	64.12	-1.13
5	76.15	76.60	-0.45	5	71.77	74.25	-2.48
6	81.19	79.50	1.69	6	67.29	70.28	-2.99
7	87.43	88.40	-0.97	7	68.18	71.18	-3.00
8	83.15	89.70	-6.55	8	60.66	63.71	-3.05
9	80.26	77.70	2.56	9	67.34	70.43	-3.09
10	76.38	75.40	0.98	10	65.20	67.56	-2.36
11	74.79	73.30	1.49	11	60.57	62.57	-2.00
12	72.36	71.30	1.06	12	58.57	61.41	-2.84
13	71.61	69.00	2.61	13	69.00	72.08	-3.08
14	66.49	68.00	-1.51	14	75.41	77.33	-1.92
15	67.36	68.00	-0.64	15	72.20	73.41	-1.21
16	65.19	64.70	0.49	16	68.15	68.36	-0.21
17	63.11	64.10	-0.99	17	55.91	57.09	-1.18
18	62.75	62.20	0.55	18	58.25	61.37	-3.12
19	61.76	60.70	1.06	19	52.94	53.58	-0.64
20	59.96	60.50	-0.54	20	65.60	63.62	1.98

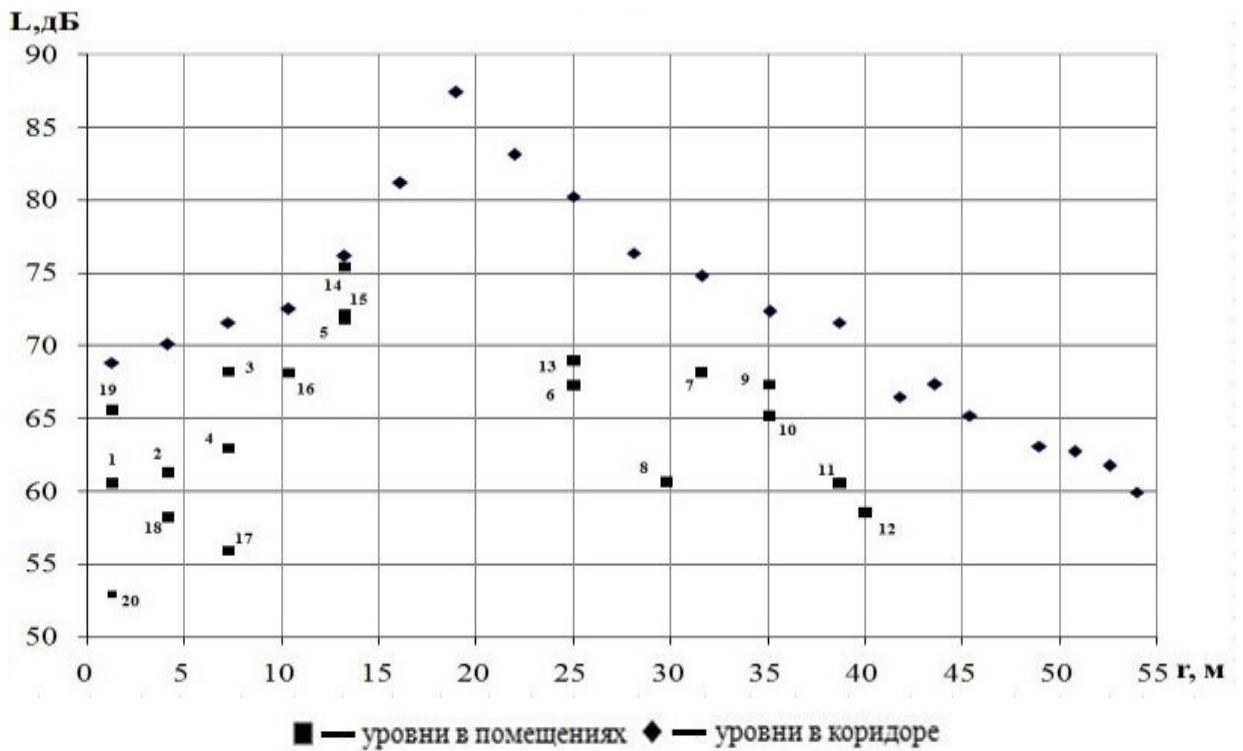


Рисунок П.1.5 - Экспериментальные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 7 точке коридора, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

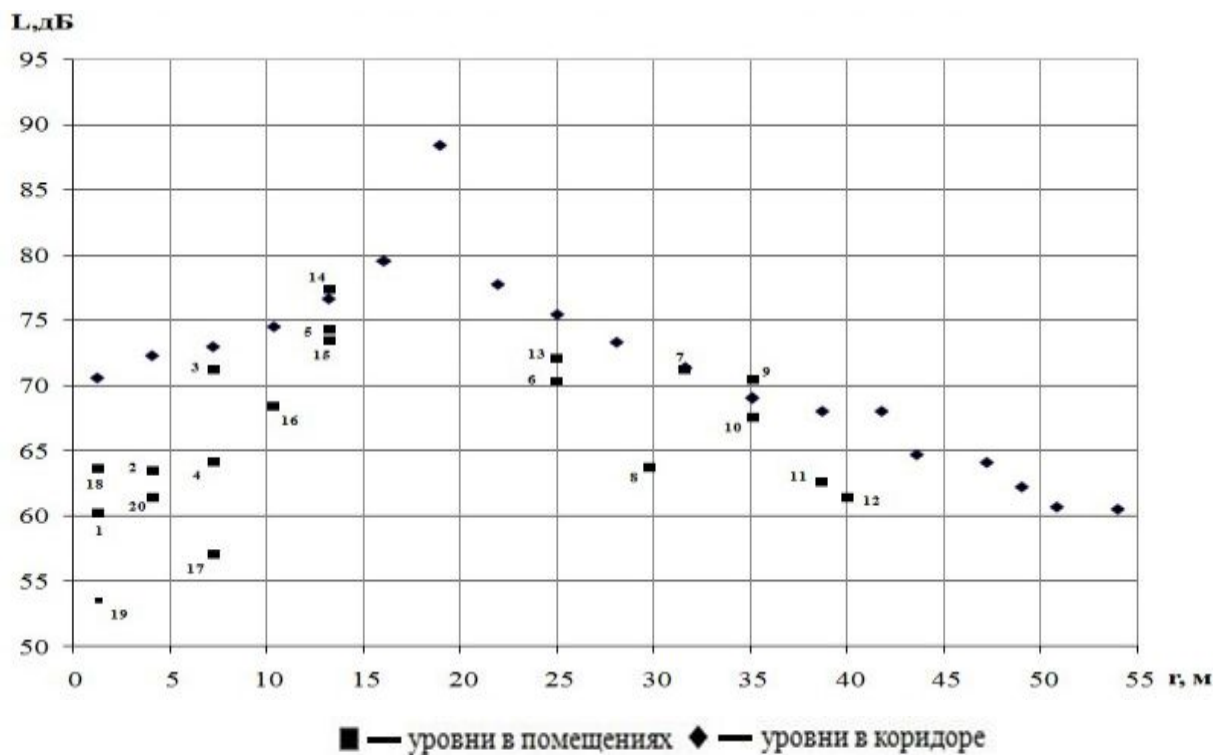


Рисунок П.1.6 - Расчетные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 7 точке коридора, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Таблица П.1.4 - Экспериментальные и расчетные уровни в коридоре и помещениях при расположении источника в 7 точке коридора, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Уровни звукового давления L , дБ							
в коридоре				в помещениях			
№ точ.	Экспериментальный уровень, $L_{экс}$; дБ	Расчетный уровень $L_{расч}$; дБ	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч}$	№ пом.	Экспериментальный уровень $L_{экс}$; дБ	Расчетный уровень $L_{расч}$; дБ	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч}$
1	71.33	70.30	1.03	1	45.88	49.20	-3.32
2	72.12	71.10	1.02	2	46.86	50.50	-3.64
3	73.89	76.00	-2.11	3	70.21	72.60	-2.39
4	74.55	77.10	-3.45	4	51.00	53.80	-2.80
5	79.56	82.00	-2.44	5	59.96	61.20	-1.24
6	85.02	84.40	0.62	6	51.73	54.10	-2.37
7	88.23	88.90	-0.67	7	53.20	56.40	-3.20
8	84.11	84.50	-0.39	8	41.29	37.50	3.79
9	80.59	82.10	-1.51	9	57.50	60.78	-3.28
10	77.68	80.20	-2.52	10	55.80	57.61	-1.81
11	74.96	78.30	-3.34	11	36.02	37.80	-1.78
12	74.11	77.00	-2.89	12	47.54	51.00	-3.46
13	73.65	74.00	-0.35	13	57.71	60.80	-3.09
14	68.69	70.30	-1.61	14	62.72	65.20	-2.48
15	68.45	70.40	-1.95	15	59.39	62.40	-3.01
16	67.70	69.40	-1.70	16	46.73	48.40	-1.67
17	66.66	67.00	-0.34	17	31.59	33.40	-1.81
18	65.38	66.10	-0.72	18	47.91	50.50	-2.59
19	64.17	64.60	-0.43	19	35.19	37.70	-2.51
20	63.45	63.80	-0.35	20	52.00	53.80	-1.80

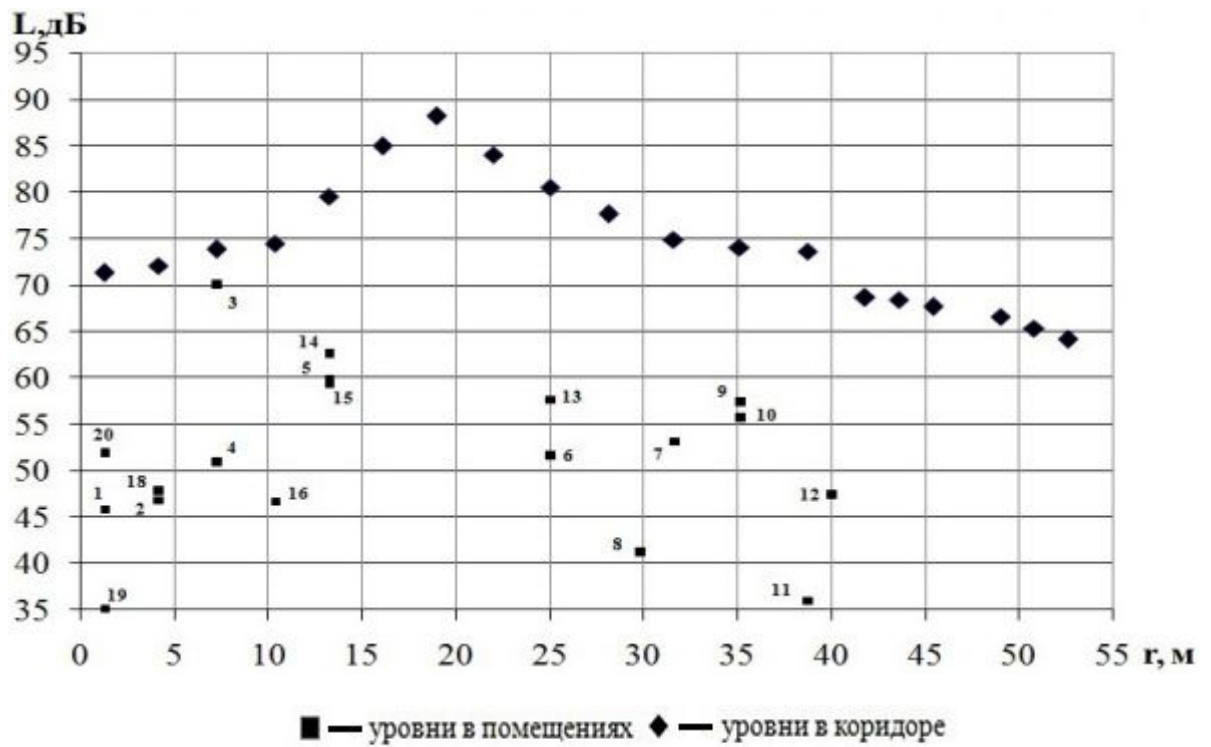


Рисунок П.1.7 - Экспериментальные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 7 точке коридора, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

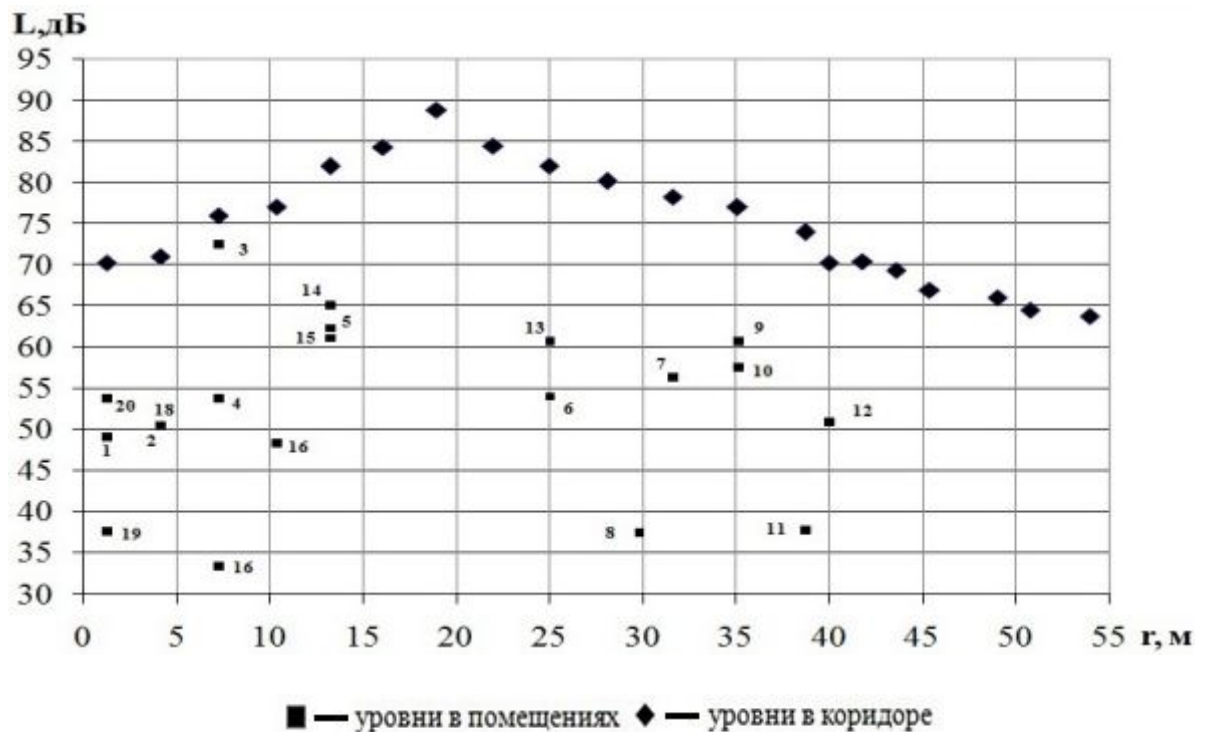


Рисунок П.1.8 - Расчетные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 7 точке коридора, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Таблица П.1.5 - Экспериментальные и расчетные уровни в коридоре и помещениях при расположении источника в 13 точке коридора, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Уровни звукового давления L , дБ							
в коридоре				в помещениях			
№ точ.	Экспериментальный уровень, $L_{экс}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч}$ дБ	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч}$	№ пом.	Экспериментальный уровень $L_{экс}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч}$ дБ	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч}$
1	58.11	61.30	-3.19	1	51.52	53.20	-1.68
2	59.48	62.50	-3.12	2	50.99	52.02	-1.03
3	61.23	63.60	-2.37	3	57.59	60.12	-2.53
4	62.70	64.80	-2.10	4	53.03	56.10	-3.07
5	64.32	65.90	-1.58	5	59.44	57.92	1.52
6	67.12	68.00	-0.88	6	60.99	63.80	-2.81
7	69.93	70.20	-0.27	7	73.26	74.50	-1.24
8	71.58	71.50	0.08	8	67.09	67.20	-0.11
9	73.69	72.70	0.99	9	79.47	78.60	0.87
10	75.39	74.40	0.99	10	76.97	76.60	0.37
11	80.05	77.00	3.05	11	71.84	68.80	3.04
12	84.41	81.40	3.01	12	66.80	67.90	-1.10
13	87.63	89.00	-1.37	13	60.65	64.00	-3.35
14	77.18	77.50	-0.32	14	63.28	64.90	-1.62
15	76.80	77.70	-0.90	15	60.55	62.80	-2.25
16	76.27	76.20	0.07	16	56.15	53.40	2.75
17	74.90	75.80	-0.90	17	46.86	46.50	0.36
18	73.65	73.80	-0.15	18	48.64	51.60	-2.96
19	73.73	73.80	-0.07	19	49.05	50.70	-1.65
20	73.63	72.60	1.03	20	60.70	57.80	2.90

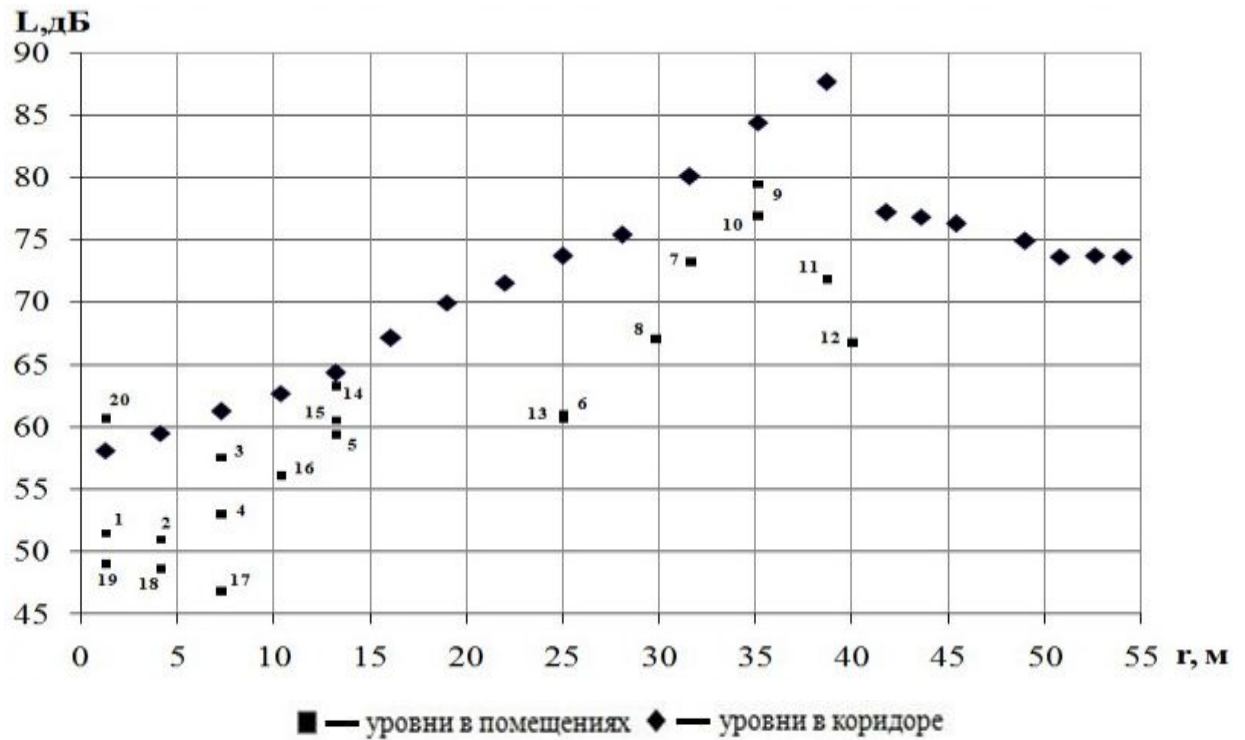


Рисунок П.1.9 - Экспериментальные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 13 точке коридора, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

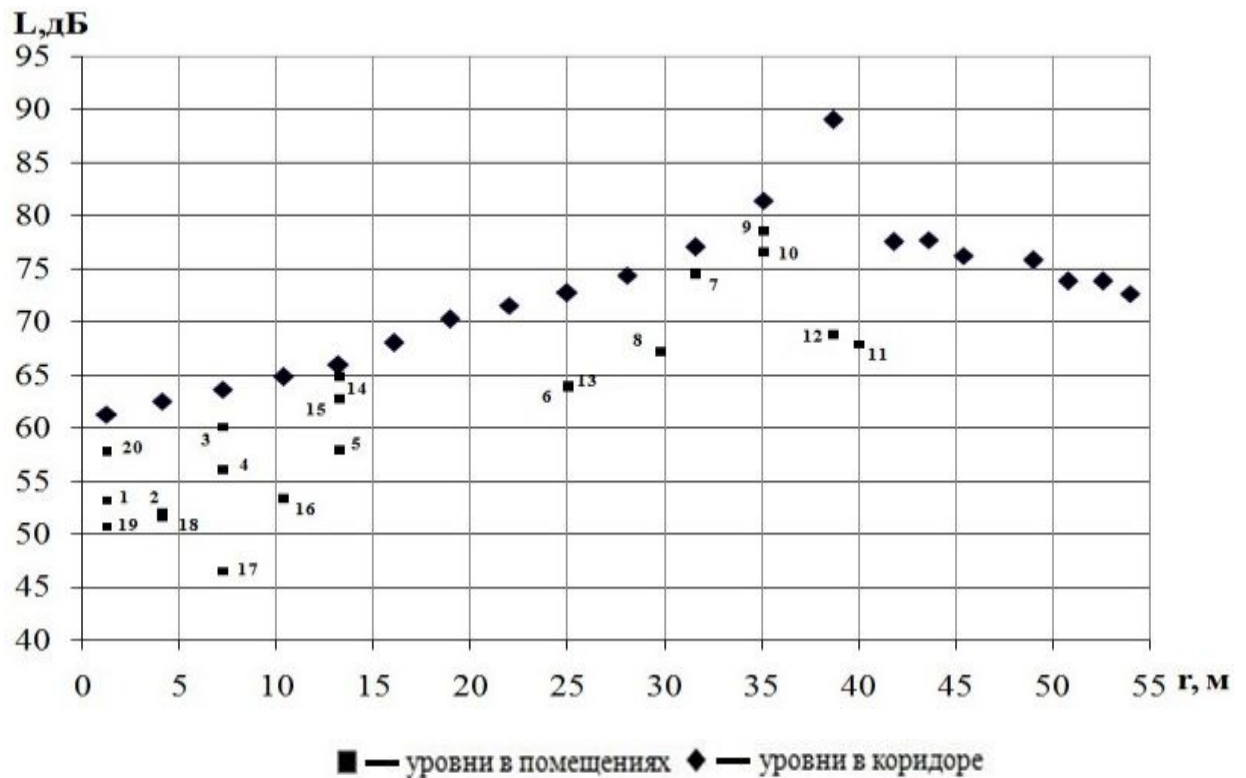


Рисунок П.1.10 - Расчетные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 13 точке коридора, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Таблица П.1.6 - Экспериментальные и расчетные уровни в коридоре и помещениях при расположении источника в 13 точке коридора, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Уровни звукового давления L , дБ							
в коридоре				в помещениях			
№ точ.	Экспериментальный уровень, $L_{экс_i}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч_i}$ дБ	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$	№ пом.	Экспериментальный уровень $L_{экс_i}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч_i}$ дБ	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$
1	63.18	65.90	-2.72	1	42.55	43.80	-1.25
2	63.89	67.20	-3.31	2	41.22	43.60	-2.38
3	65.12	67.50	-2.38	3	62.05	64.70	-2.65
4	66.14	68.20	-2.06	4	43.80	46.00	-2.20
5	68.25	69.60	-1.35	5	51.05	48.80	2.25
6	70.96	70.00	0.96	6	51.33	51.10	0.23
7	73.48	70.60	2.88	7	56.90	55.70	1.20
8	74.98	71.90	3.08	8	35.54	35.40	0.14
9	75.61	73.00	2.61	9	61.30	64.30	-3.00
10	76.89	74.70	2.19	10	58.42	60.70	-2.28
11	79.12	76.20	2.92	11	48.82	51.51	-2.69
12	82.36	79.10	3.26	12	54.66	54.40	0.26
13	87.92	88.00	-0.08	13	50.87	50.80	0.07
14	77.16	77.00	0.16	14	53.48	55.50	-2.02
15	77.56	76.50	1.06	15	52.98	54.30	-1.32
16	77.01	76.40	0.61	16	46.54	45.30	-1.24
17	75.25	75.50	-0.25	17	-	25.50	-
18	73.84	73.40	0.44	18	39.99	41.60	-1.61
19	73.56	73.30	0.26	19	30.98	28.30	2.68
20	72.89	73.60	-0.71	20	44.84	44.40	0.44

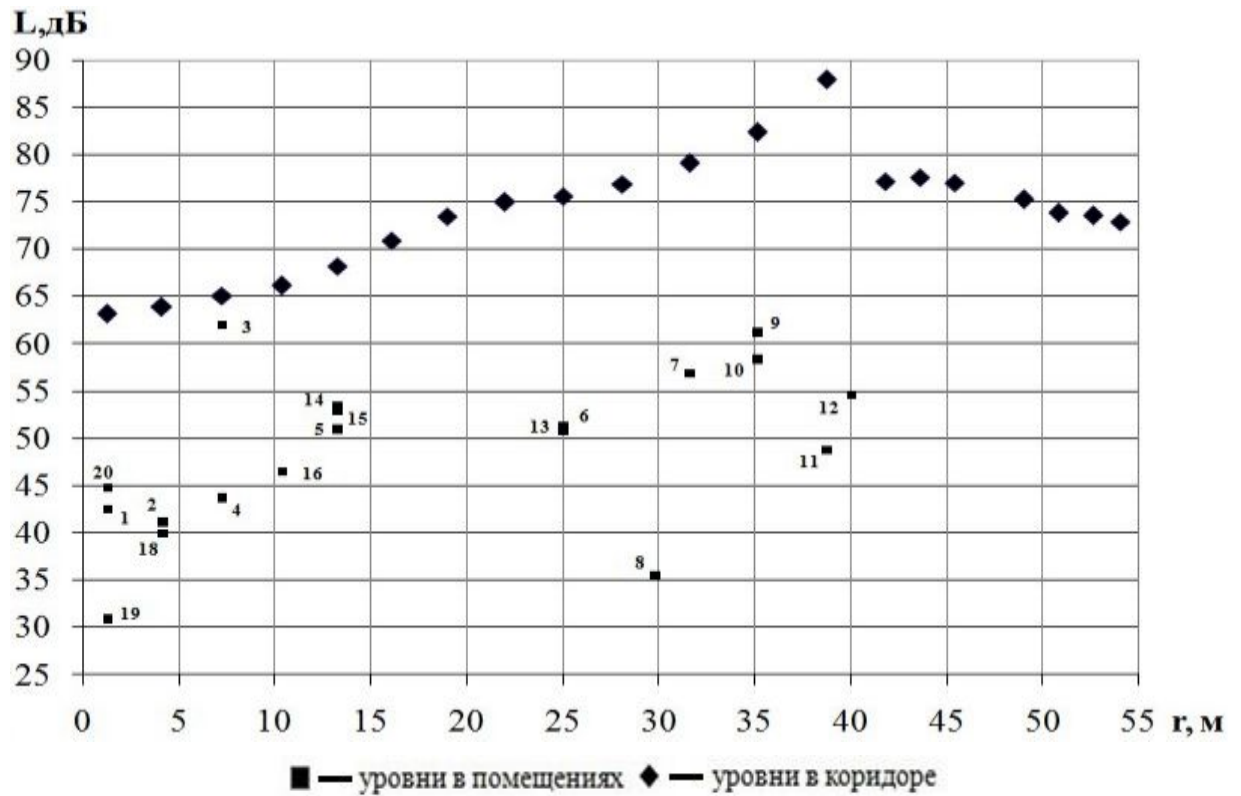


Рисунок П.1.11 - Экспериментальные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 13 точке коридора, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц

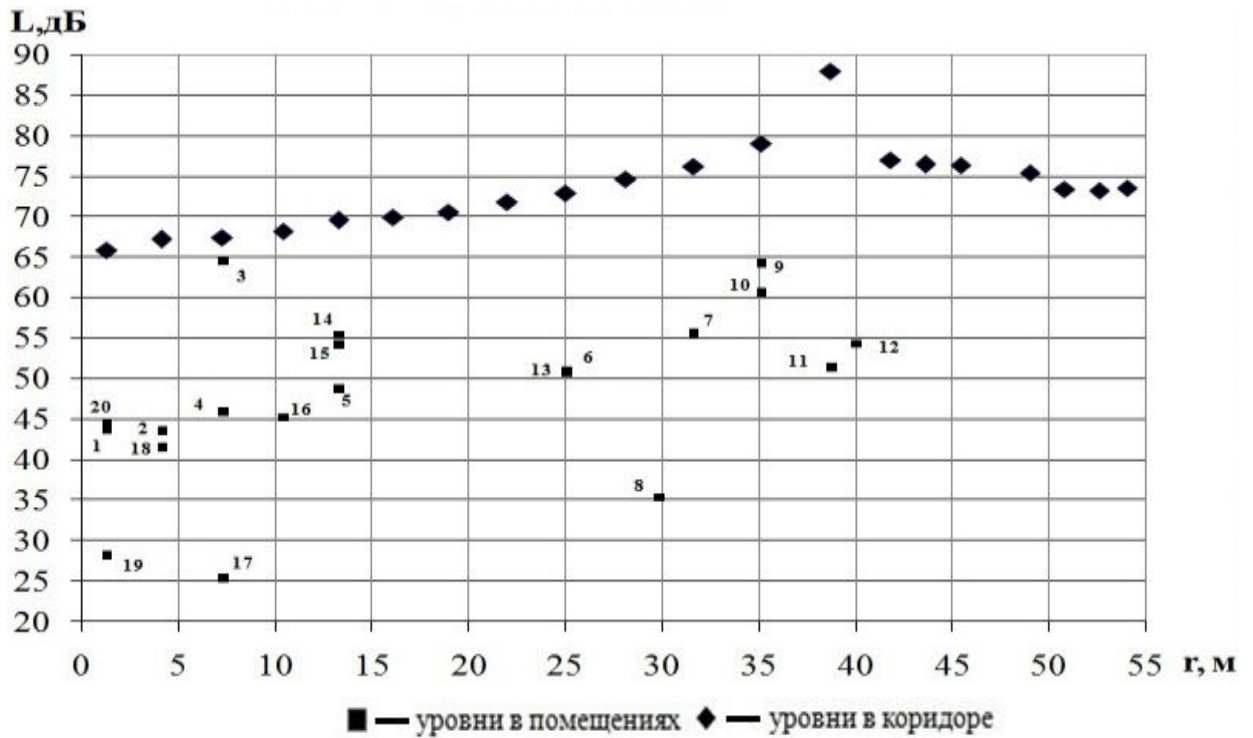


Рисунок П.1.12 - Расчетные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 13 точке коридора, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Таблица П.1.7 - Экспериментальные и расчетные уровни в коридоре и помещениях при расположении источника в 9 помещении, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Уровни звукового давления L , дБ							
в коридоре				в помещениях			
№ точ.	Экспериментальный уровень, $L_{экс_i}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч_i}$ дБ	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$	№ пом.	Экспериментальный уровень $L_{экс_i}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч_i}$ дБ	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$
1	54.36	53.66	0.70	1	48.07	45.41	2.66
2	55.96	57.42	-1.46	2	46.96	49.28	-2.32
3	58.63	61.73	-3.10	3	55.79	59.00	-3.21
4	60.86	64.19	-3.43	4	56.54	57.12	-0.58
5	63.65	66.61	-2.96	5	50.94	54.54	-3.60
6	65.91	69.19	-3.28	6	60.99	64.38	-3.39
7	67.13	70.89	-3.76	7	72.40	75.33	-2.93
8	69.03	72.92	-3.89	8	65.74	68.25	-2.51
9	70.88	74.84	-3.96	9	93.28	91.48	1.80
10	73.51	77.53	-4.02	10	91.02	87.31	3.71
11	77.24	79.70	-2.46	11	82.90	83.26	-0.36
12	82.30	81.88	0.42	12	63.19	60.41	2.78
13	78.47	75.23	3.24	13	63.14	65.98	-3.84
14	68.76	71.62	-2.86	14	61.38	62.61	-1.23
15	71.06	71.28	-0.22	15	58.98	58.70	0.28
16	71.38	70.66	0.72	16	54.00	56.00	-2.00
17	70.84	69.85	0.99	17	46.95	44.81	2.14
18	69.05	69.43	-0.38	18	43.57	46.09	-2.52
19	68.63	69.01	-0.38	19	-	37.75	-
20	68.06	68.90	-0.84	20	50.85	48.78	2.07

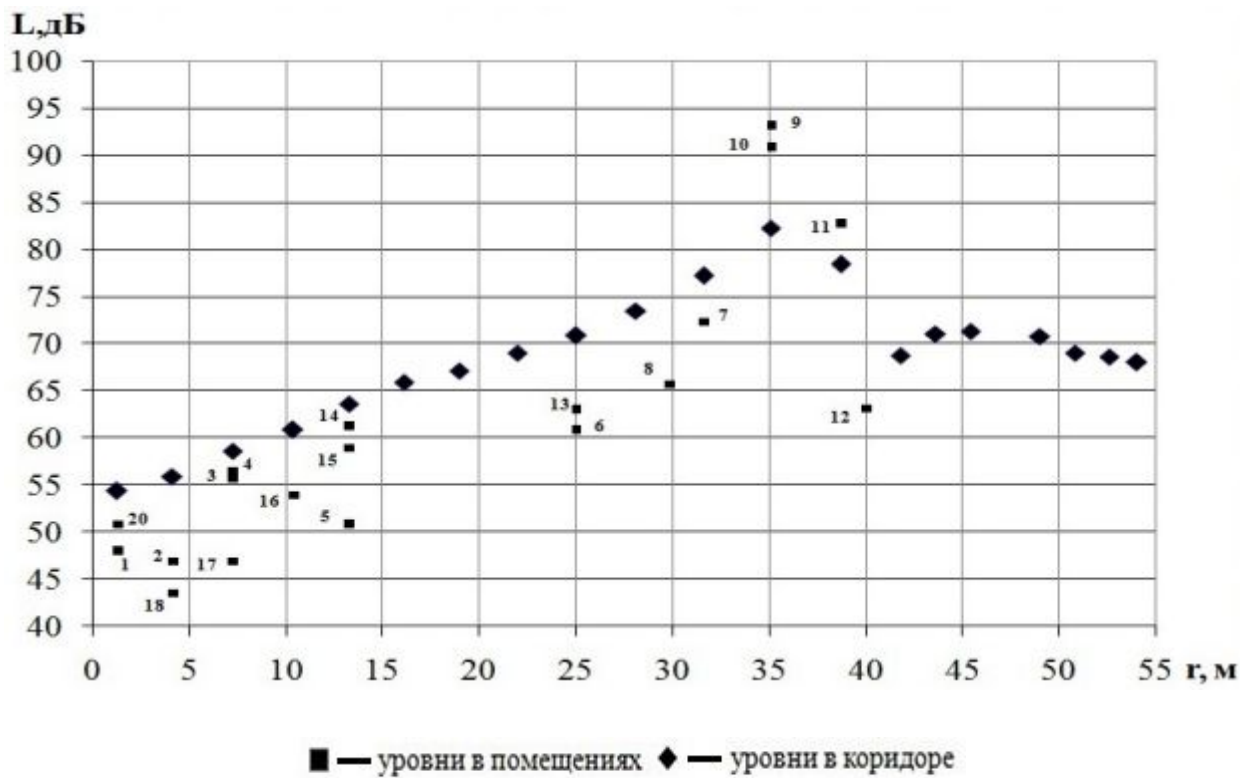


Рисунок П.1.13 - Экспериментальные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 9 помещении, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

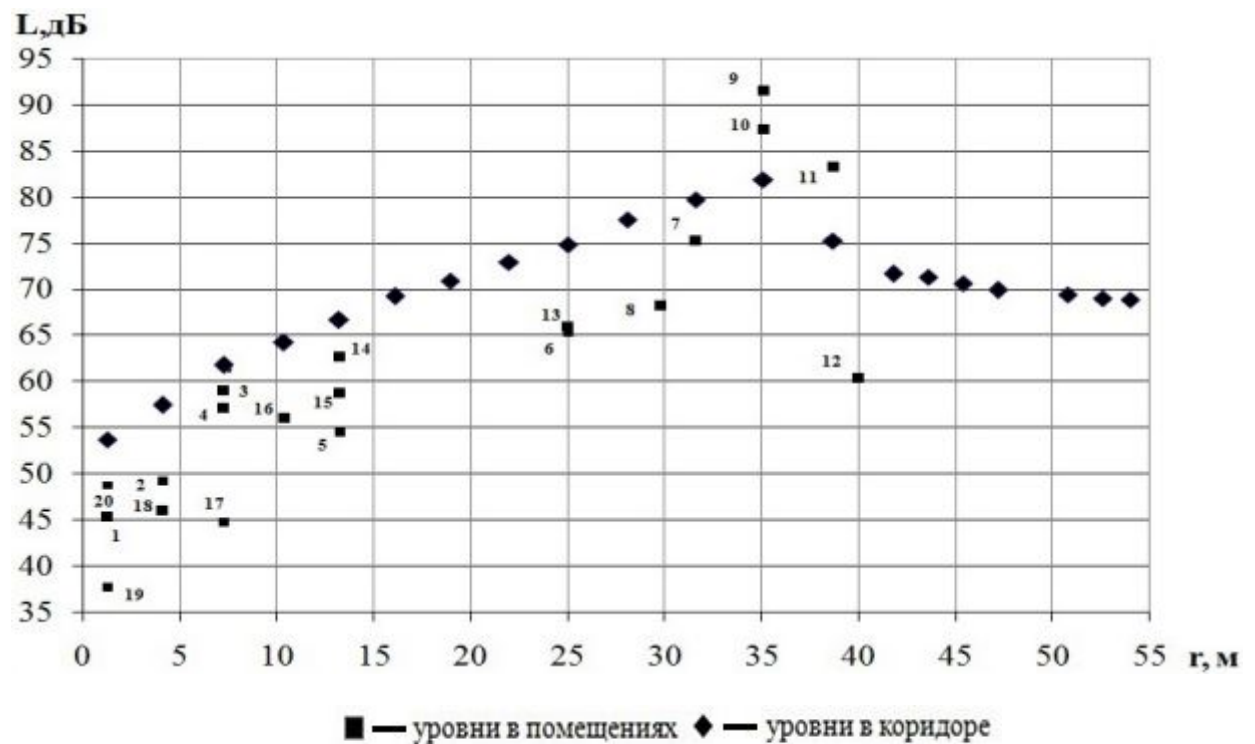


Рисунок П.1.14 - Расчетные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 9 помещении, при всех открытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Таблица П.1.8 - Экспериментальные и расчетные уровни в коридоре и помещениях при расположении источника в 9 помещении, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

Уровни звукового давления L , дБ							
в коридоре				в помещениях			
№ точ.	Экспериментальный уровень, $L_{экс_i}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч_i}$ дБ	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$	№ пом.	Экспериментальный уровень $L_{экс_i}$ дБ	Расчетный уровень $L_{расч_i}$ дБ	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{расч_i}$
1	50.12	50.90	-0.78	1	29.31	28.70	0.61
2	50.98	52.20	-1.22	2	34.73	31.40	3.33
3	51.45	52.50	-1.05	3	47.85	49.77	-1.92
4	51.99	53.20	-1.21	4	-	31.10	-
5	53.35	54.60	-1.25	5	-	34.60	-
6	55.19	55.00	0.19	6	35.38	36.10	-0.72
7	57.94	55.60	2.34	7	45.21	41.70	3.51
8	59.23	56.90	2.33	8	-	21.40	-
9	61.09	58.00	3.09	9	94.64	92.94	1.70
10	62.05	60.00	2.05	10	92.32	90.91	1.41
11	64.48	61.20	3.28	11	85.55	82.80	2.75
12	66.19	66.10	0.09	12	-	29.50	-
13	67.77	66.00	1.77	13	38.45	36.80	1.65
14	51.48	52.10	-0.62	14	42.34	40.50	1.84
15	52.89	54.20	-1.31	15	40.02	38.50	1.52
16	53.3	53.80	-0.50	16	-	27.60	-
17	53.19	53.20	-0.01	17	38.61	36.68	1.93
18	52.83	53.00	-0.17	18	-	26.60	-
19	50.73	52.10	-1.37	19	-	13.00	-
20	49.67	51.00	-1.33	20	31.04	29.50	1.54

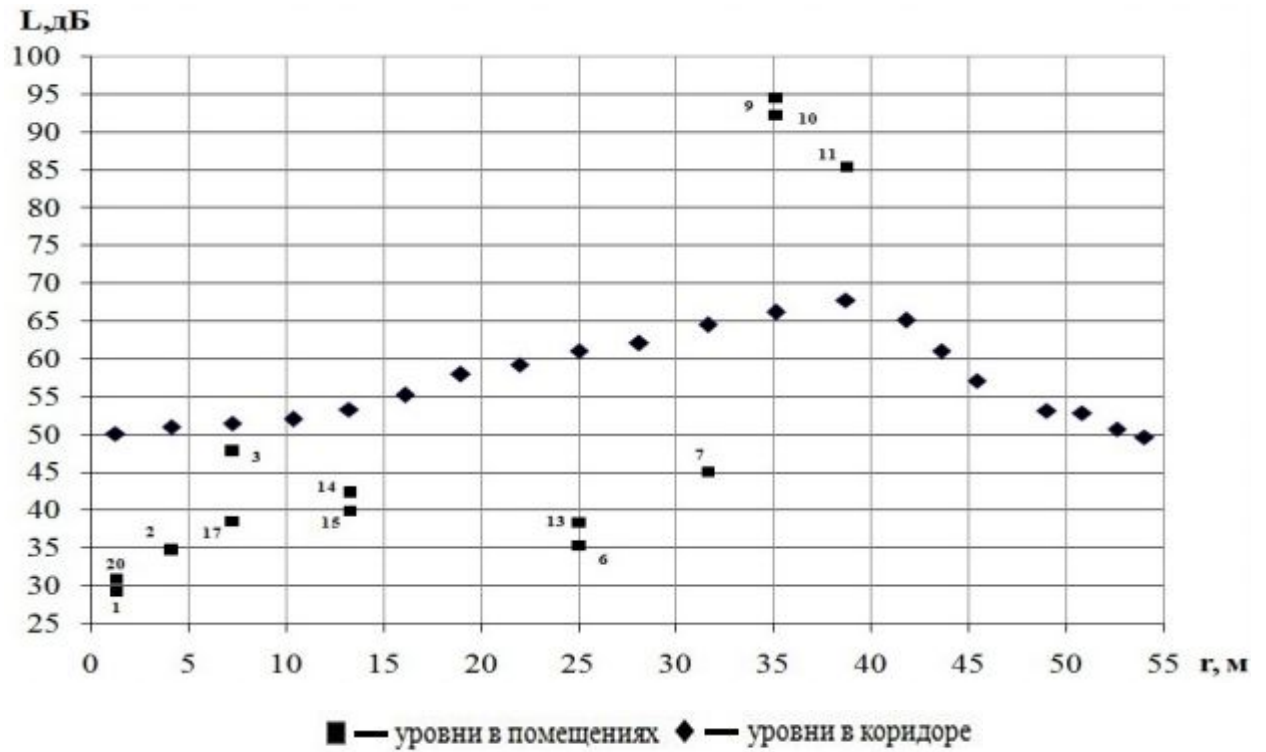


Рисунок П.1.15 - Экспериментальные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 9 помещении, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

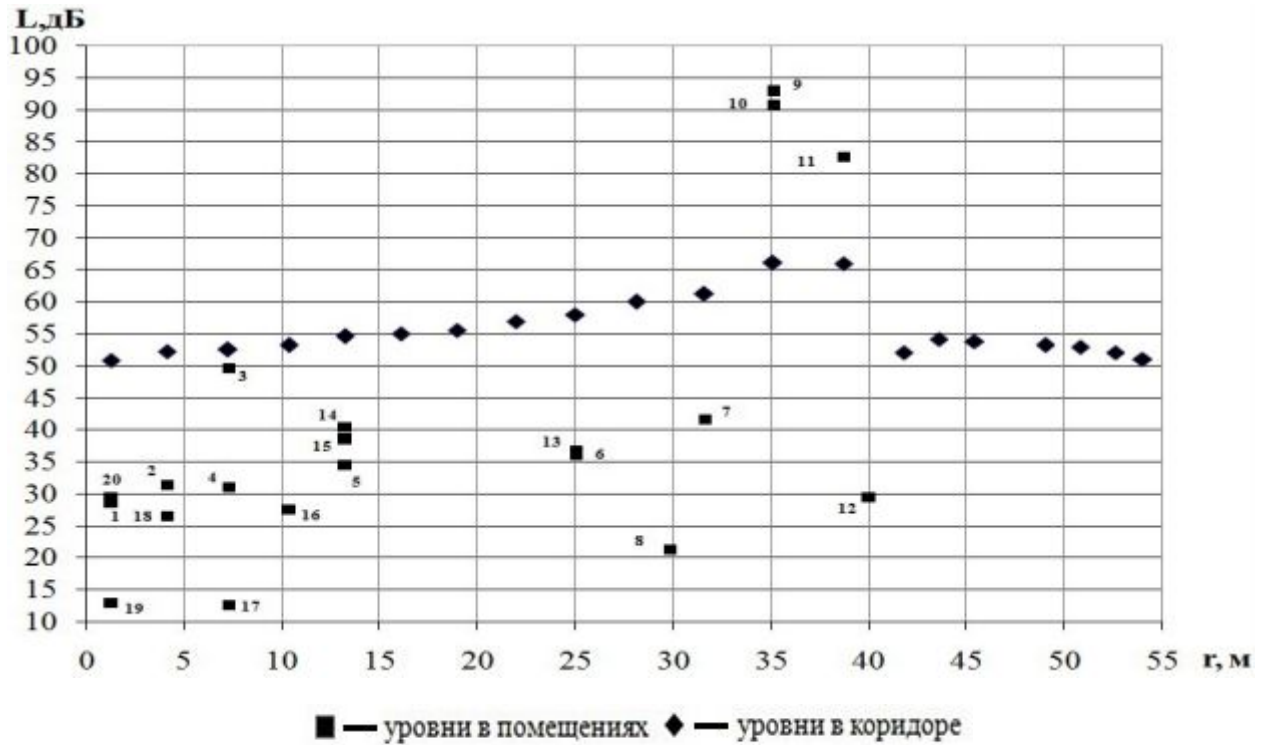


Рисунок П.1.16 - Расчетные уровни шума в коридоре и помещениях при расположении источника в 9 помещении, при всех закрытых дверях помещений, в октавной полосе $f_{cp}=2000$ Гц.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**Результаты экспериментальных исследований и расчетных данных в системе
помещений с перегородками неполной высоты**

В приложении приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных в крупногабаритной модели помещения с перегородками неполной высоты с устройством звукопоглощения на потолке, схема помещения приведена на рисунке П.2.1.

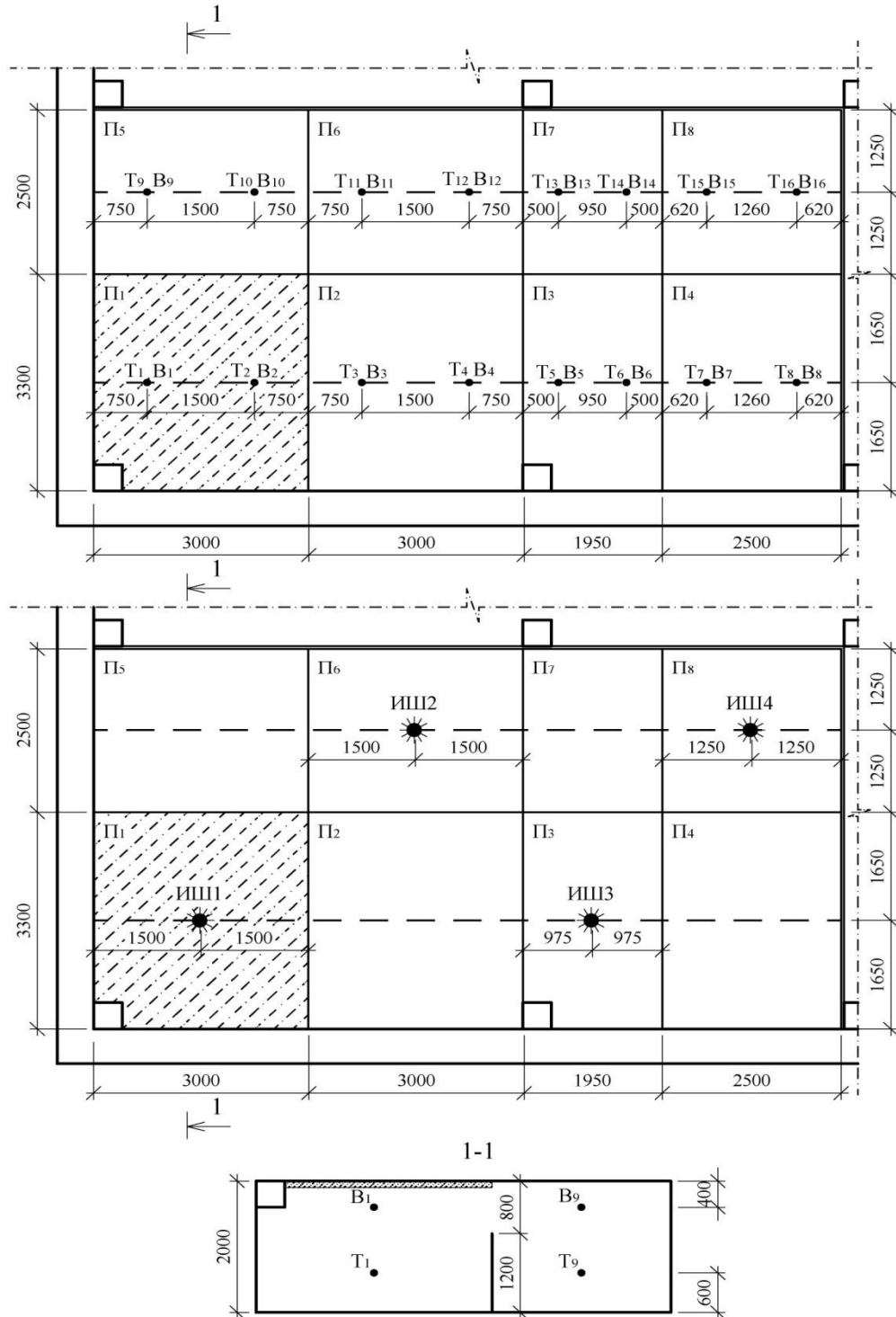


Рисунок П.2.1- Схема помещения с перегородками неполной высоты с указанием положения расчетных точек (а), положений источника шума (б) и положения звукопоглощения.

Таблица П.2.1 – Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных уровней в крупногабаритной модели помещения с перегородками неполной высоты с устройством звукопоглощения на потолке в объеме П1, при расположении источника в ИШ1, для октавной полосы с $f_{cp}=2000$ Гц.

№ точки	Экспериментальный уровень $L_{экс_i}$ дБ			Расчетные уровни при диффузной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ			Расчетные уровни при зеркальной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ			Расчетные уровни при комбинированной модели отражения $\xi=0,8$ $L_{расч_i}$ дБ		
	$L_{экс_i}$	$L_{экс\ z_i}$	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{экс\ z_i}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч\ z_i}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч\ z_i}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч\ z_i}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч\ z_i}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч\ z_i}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч\ z_i}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T1	89.98	87.63	2.35	88.39	89.88	-1.49	88.99	89.02	-0.03	88.57	89.19	-0.62
T2	89.65	89.43	0.22	87.93	89.54	-1.61	88.89	89.10	-0.21	88.22	89.04	-0.82
T3	85.63	82.94	2.69	84.88	84.93	-0.05	83.86	81.82	2.04	84.57	82.99	1.58
T4	86.37	83.61	2.76	83.62	83.67	-0.05	84.00	82.09	1.91	83.74	82.50	1.24
T5	80.82	79.24	1.58	81.23	81.28	-0.05	80.48	78.87	1.61	81.00	79.87	1.13
T6	81.65	80.30	1.35	80.77	80.81	-0.04	80.88	82.56	-1.68	80.80	79.82	0.98
T7	77.84	76.09	1.75	79.18	79.23	-0.05	78.88	77.42	1.46	79.03	77.79	1.24
T8	78.05	76.07	1.98	78.78	78.82	-0.04	79.24	77.76	1.48	78.91	77.76	1.15
T9	85.76	83.89	1.87	85.28	85.33	-0.05	84.57	83.02	1.55	85.07	83.77	1.30
T10	84.70	82.74	1.96	84.99	85.04	-0.05	84.95	82.98	1.97	84.98	83.48	1.50

Продолжение табл. П.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T11	82.79	81.71	1.08	83.41	83.47	-0.06	81.61	80.05	1.56	82.87	81.89	0.98
T12	83.27	81.78	1.49	82.55	82.60	-0.05	82.71	81.45	1.26	82.59	81.46	1.13
T13	79.51	77.02	2.49	80.59	80.64	-0.05	79.33	78.34	0.99	80.21	79.14	1.07
T14	79.84	77.72	2.12	80.20	80.25	-0.05	79.93	80.12	-0.19	80.12	79.40	0.72
T15	75.59	74.84	0.75	78.81	78.86	-0.05	78.05	77.33	0.72	78.58	77.66	0.92
T16	76.16	74.57	1.59	78.45	78.50	-0.05	78.33	77.61	0.72	78.41	77.39	1.02
B1	90.15	88.11	2.04	88.13	88.77	-0.64	88.52	87.44	1.08	88.25	87.82	0.43
B2	89.04	87.43	1.61	87.45	88.20	-0.75	88.05	87.16	0.89	87.63	87.23	0.40
B3	87.07	85.44	1.63	85.20	85.20	0.00	84.94	83.79	1.15	85.12	84.17	0.95
B4	85.30	83.70	1.60	83.44	83.44	0.00	84.10	82.28	1.82	83.64	82.53	1.11
B5	82.94	81.11	1.83	81.73	81.73	0.00	82.23	80.60	1.63	81.88	80.51	1.37
B6	81.05	79.50	1.55	80.59	80.59	0.00	80.65	79.56	1.09	80.61	79.51	1.10
B7	80.10	77.29	2.81	79.37	79.37	0.00	80.00	78.80	1.20	79.56	78.57	0.99
B8	78.52	76.38	2.14	78.73	78.73	0.00	79.29	79.07	0.22	78.90	78.07	0.83
B9	86.03	83.57	2.46	85.38	85.38	0.00	85.25	84.02	1.23	85.34	84.25	1.09
B10	83.74	82.20	1.54	84.96	84.96	0.00	85.33	83.76	1.57	85.07	83.75	1.32
B11	83.44	81.02	2.42	83.65	83.65	0.00	82.99	81.66	1.33	83.46	82.44	1.02
B12	81.76	81.04	0.72	82.44	82.44	0.00	82.11	81.27	0.84	82.34	81.47	0.87
B13	79.54	78.18	1.36	81.04	81.04	0.00	80.48	79.45	1.03	80.87	80.04	0.83
B14	79.04	77.32	1.72	80.07	80.07	0.00	79.57	78.62	0.95	79.92	79.05	0.87
B15	77.56	75.51	2.05	79.00	79.00	0.00	78.43	78.81	-0.38	78.83	78.18	0.65
B16	77.09	74.44	2.65	78.43	78.43	0.00	78.45	77.70	0.75	78.44	77.56	0.88

Таблица П.2.2 - Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных уровней в крупногабаритной модели помещения с перегородками неполной высоты с устройством звукопоглощения на потолке в объеме П1, при расположении источника в ИШ2, для октавной полосы с $f_{cp}=2000$ Гц.

№ точки	Экспериментальный уровень $L_{экс_i}$ дБ			Расчетные уровни при диффузной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ			Расчетные уровни при зеркальной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ			Расчетные уровни при комбинированной модели отражения $\xi=0,8$ $L_{расч_i}$ дБ		
	$L_{экс_i}$	$L_{экс_{z_i}}$	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{экс_{z_i}}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч_{z_i}}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч_{z_i}}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч_{z_i}}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч_{z_i}}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч_{z_i}}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч_{z_i}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T1	83.17	81.50	1.67	82.86	82.95	-0.09	82.30	81.06	1.24	82.69	82.53	0.16
T2	82.70	81.41	1.29	83.12	83.22	-0.10	81.72	80.69	1.03	82.70	82.69	0.01
T3	83.88	83.68	0.20	83.76	83.88	-0.12	83.77	83.01	0.76	83.76	83.60	0.16
T4	84.30	84.95	-0.65	83.69	83.81	-0.12	83.68	83.49	0.19	83.69	83.42	0.27
T5	81.15	81.29	-0.14	82.61	82.74	-0.13	81.11	80.57	0.54	82.16	81.95	0.21
T6	81.29	82.33	-1.04	82.35	82.48	-0.13	84.54	81.44	3.10	82.10	82.17	-0.07
T7	77.76	77.52	0.24	81.27	81.40	-0.13	79.86	79.46	0.40	80.84	80.72	0.12
T8	79.34	78.30	1.04	80.97	81.10	-0.13	80.80	80.26	0.54	80.92	80.70	0.22
T9	83.55	83.22	0.33	84.12	84.19	-0.07	84.07	83.42	0.65	84.11	83.86	0.25
T10	84.42	82.93	1.49	84.86	84.92	-0.06	84.14	83.85	0.29	84.64	84.26	0.38

Продолжение табл. П.2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T11	90.20	88.07	2.13	87.72	89.25	-1.53	88.88	89.93	-1.05	88.07	89.10	-1.03
T12	90.10	92.04	-1.94	87.63	89.53	-1.90	88.80	91.18	-2.38	87.98	89.45	-1.47
T13	82.57	82.54	0.03	84.65	84.77	-0.12	83.77	83.62	0.15	84.38	83.55	0.83
T14	83.68	82.75	0.93	84.06	84.18	-0.12	83.71	83.74	-0.03	83.96	83.28	0.68
T15	78.58	78.14	0.44	82.11	82.23	-0.12	81.26	80.63	0.63	81.85	80.97	0.88
T16	79.65	78.66	0.99	81.62	81.75	-0.13	81.60	81.50	0.10	81.62	81.20	0.42
B1	83.00	81.12	1.88	82.93	82.94	-0.01	82.62	80.44	2.18	82.84	82.48	0.36
B2	83.50	80.94	2.56	83.30	83.32	-0.02	82.75	80.94	1.81	83.14	82.93	0.21
B3	84.85	83.89	0.96	83.81	83.85	-0.04	84.02	83.68	0.34	83.88	83.63	0.25
B4	83.94	84.00	-0.06	83.72	83.77	-0.05	83.69	83.63	0.06	83.71	83.47	0.24
B5	82.71	82.47	0.24	82.97	83.02	-0.05	82.46	82.41	0.05	82.82	82.52	0.30
B6	82.30	81.10	1.20	82.32	82.37	-0.05	82.21	81.91	0.30	82.29	82.00	0.29
B7	80.57	80.29	0.28	81.50	81.55	-0.05	80.78	80.79	-0.01	81.29	80.84	0.45
B8	79.23	77.45	1.78	81.05	81.10	-0.05	79.57	79.94	-0.37	80.60	80.43	0.17
B9	84.86	83.62	1.24	84.15	84.14	0.01	84.20	84.37	-0.17	84.16	84.10	0.06
B10	85.38	85.47	-0.09	85.20	85.19	0.01	85.04	84.89	0.15	85.15	84.94	0.21
B11	89.70	89.13	0.57	87.16	87.91	-0.75	87.86	88.44	-0.58	87.37	87.78	-0.41
B12	89.49	90.18	-0.69	87.13	87.97	-0.84	87.95	88.58	-0.63	87.37	87.76	-0.39
B13	85.96	86.20	-0.24	85.35	85.39	-0.04	85.23	85.25	-0.02	85.31	84.67	0.64
B14	83.61	83.54	0.07	83.94	83.99	-0.05	84.26	84.46	-0.20	84.04	83.22	0.82
B15	81.51	81.11	0.40	82.45	82.49	-0.04	81.98	82.25	-0.27	82.31	81.98	0.33
B16	79.33	78.54	0.79	81.68	81.73	-0.05	81.11	81.17	-0.06	81.51	81.19	0.32

Таблица П.2.3 - Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных уровней в крупногабаритной модели помещения с перегородками неполной высоты с устройством звукопоглощения на потолке в объеме П1, при расположении источника в ИШЗ, для октавной полосы с $f_{cp}=2000$ Гц.

№ точки	Экспериментальный уровень $L_{экс_i}$ дБ			Расчетные уровни при диффузной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ			Расчетные уровни при зеркальной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ			Расчетные уровни при комбинированной модели отражения $\xi=0,8$ $L_{расч_i}$ дБ		
	$L_{экс_i}$	$L_{экс_{z_i}}$	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{экс_{z_i}}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч_{z_i}}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч_{z_i}}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч_{z_i}}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч_{z_i}}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч_{z_i}}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч_{z_i}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T1	81.45	80.27	1.18	80.50	80.59	-0.09	79.94	79.04	0.90	80.33	80.47	-0.14
T2	80.63	78.98	1.65	81.09	81.18	-0.09	80.37	78.88	1.49	80.87	80.85	0.02
T3	83.90	84.02	-0.12	83.34	83.43	-0.09	83.43	83.39	0.04	83.37	83.32	0.05
T4	83.91	84.07	-0.16	84.60	84.69	-0.09	83.36	83.25	0.11	84.23	84.30	-0.07
T5	90.75	93.41	-2.66	88.13	91.19	-3.06	89.45	91.77	-2.32	88.53	91.15	-2.62
T6	91.27	92.11	-0.84	88.10	91.11	-3.01	89.60	91.74	-2.14	88.55	91.09	-2.54
T7	84.18	84.08	0.10	85.44	85.54	-0.10	84.56	84.77	-0.21	85.18	84.50	0.68
T8	83.95	84.18	-0.23	84.93	85.02	-0.09	84.33	84.63	-0.30	84.75	84.30	0.45
T9	79.68	78.95	0.73	79.93	80.02	-0.09	79.34	78.94	0.40	79.76	79.92	-0.16
T10	80.14	78.68	1.46	80.39	80.47	-0.08	79.39	86.34	-6.95	80.09	80.31	-0.22

Продолжение табл. П.2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T11	81.88	81.70	0.18	82.00	82.08	-0.08	82.26	82.14	0.12	82.08	82.06	0.02
T12	81.46	82.13	-0.67	82.73	82.81	-0.08	81.40	82.82	-1.42	82.33	82.38	-0.05
T13	82.96	83.46	-0.50	83.78	83.85	-0.07	84.24	83.75	0.49	83.91	83.37	0.54
T14	83.48	84.04	-0.56	83.85	83.92	-0.07	84.14	83.79	0.35	83.94	83.33	0.61
T15	81.09	81.86	-0.77	83.61	83.68	-0.07	82.68	82.12	0.56	83.33	82.89	0.44
T16	80.45	81.48	-1.03	83.45	83.53	-0.08	82.49	83.21	-0.72	83.16	82.94	0.22
B1	81.05	79.09	1.96	80.54	80.59	-0.05	80.94	79.25	1.69	80.66	80.54	0.12
B2	82.16	80.82	1.34	81.40	81.45	-0.05	81.30	79.77	1.53	81.37	81.22	0.15
B3	84.07	83.86	0.21	83.22	83.27	-0.05	83.72	82.87	0.85	83.37	83.14	0.23
B4	85.45	85.35	0.10	84.94	84.99	-0.05	85.11	84.71	0.40	84.99	84.78	0.21
B5	88.99	89.88	-0.89	86.97	88.03	-1.06	88.17	89.00	-0.83	87.33	88.10	-0.77
B6	88.25	89.59	-1.34	87.12	88.16	-1.04	88.20	88.76	-0.56	87.44	88.13	-0.69
B7	87.34	88.11	-0.77	85.76	85.82	-0.06	85.45	85.44	0.01	85.67	85.25	0.42
B8	84.86	85.73	-0.87	84.98	85.03	-0.05	84.96	85.07	-0.11	84.97	84.40	0.57
B9	79.07	78.21	0.86	80.01	80.06	-0.05	79.66	79.15	0.51	79.91	79.98	-0.07
B10	79.97	78.79	1.18	80.67	80.72	-0.05	80.20	79.33	0.87	80.53	80.55	-0.02
B11	81.06	81.77	-0.71	81.99	82.03	-0.04	81.80	81.92	-0.12	81.93	81.62	0.31
B12	83.06	81.90	1.16	83.00	83.04	-0.04	82.43	82.36	0.07	82.83	82.54	0.29
B13	83.95	83.34	0.61	83.83	83.86	-0.03	84.17	84.37	-0.20	83.93	83.48	0.45
B14	84.64	83.32	1.32	84.02	84.05	-0.03	84.34	84.09	0.25	84.11	83.90	0.21
B15	82.34	83.13	-0.79	83.81	83.85	-0.04	83.10	83.72	-0.62	83.60	83.38	0.22
B16	81.75	82.13	-0.38	83.57	83.61	-0.04	83.01	83.12	-0.11	83.40	82.87	0.53

Таблица П.2.4 - Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных уровней в крупногабаритной модели помещения с перегородками неполной высоты с устройством звукопоглощения на потолке в объеме П1, при расположении источника в ИШ4, для октавной полосы с $f_{cp}=2000$ Гц.

№ точки	Экспериментальный уровень $L_{экс_i}$ дБ			Расчетные уровни при диффузной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ			Расчетные уровни при зеркальной модели отражения $L_{расч_i}$ дБ			Расчетные уровни при комбинированной модели отражения $\xi=0,8$ $L_{расч_i}$ дБ		
	$L_{экс_i}$	$L_{экс_{z_i}}$	$\Delta L = L_{экс_i} - L_{экс_{z_i}}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч_{z_i}}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч_{z_i}}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч_{z_i}}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч_{z_i}}$	$L_{расч_i}$	$L_{расч_{z_i}}$	$\Delta L = L_{расч_i} - L_{расч_{z_i}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T1	76.06	74.15	1.91	78.41	78.46	-0.05	77.70	77.48	0.22	78.20	78.35	-0.15
T2	75.91	73.71	2.20	78.90	78.94	-0.04	77.29	76.73	0.56	78.42	78.73	-0.31
T3	79.25	77.75	1.50	80.71	80.76	-0.05	80.50	80.12	0.38	80.65	80.71	-0.06
T4	77.50	77.71	-0.21	81.63	81.67	-0.04	79.50	78.66	0.84	80.99	81.09	-0.10
T5	82.56	81.95	0.61	83.49	83.53	-0.04	83.12	83.27	-0.15	83.38	83.39	-0.01
T6	81.40	81.15	0.25	83.86	83.90	-0.04	82.70	82.22	0.48	83.51	83.15	0.36
T7	82.70	82.31	0.39	85.19	85.23	-0.04	85.04	85.34	-0.30	85.15	84.80	0.35
T8	82.25	82.58	-0.33	85.41	85.45	-0.04	84.98	84.96	0.02	85.28	84.90	0.38
T9	76.72	74.82	1.90	78.53	78.57	-0.04	78.60	78.79	-0.19	78.55	79.61	-1.06
T10	76.14	74.40	1.74	79.10	79.15	-0.05	79.07	78.91	0.16	79.09	78.83	0.26

Продолжение табл. П.2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T11	80.61	79.98	0.63	81.29	81.34	-0.05	81.38	81.67	-0.29	81.32	81.11	0.21
T12	79.59	78.89	0.70	82.51	82.55	-0.04	81.17	81.11	0.06	82.11	81.81	0.30
T13	83.84	80.99	2.85	85.26	85.31	-0.05	85.01	85.05	-0.04	85.19	84.91	0.28
T14	84.00	82.42	1.58	85.93	85.97	-0.04	84.47	84.54	-0.07	85.49	85.21	0.28
T15	87.65	89.52	-1.87	89.02	90.67	-1.65	90.09	91.32	-1.23	89.34	90.46	-1.12
T16	88.37	88.81	-0.44	89.41	91.06	-1.65	90.16	91.51	-1.35	89.63	90.73	-1.10
B1	75.76	72.75	3.01	78.42	78.47	-0.05	78.23	77.04	1.19	78.36	78.30	0.06
B2	77.00	74.16	2.84	79.13	79.17	-0.04	78.52	77.39	1.13	78.95	79.07	-0.12
B3	78.18	76.67	1.51	80.59	80.64	-0.05	80.19	79.38	0.81	80.47	80.30	0.17
B4	78.96	77.84	1.12	81.86	81.90	-0.04	80.95	80.50	0.45	81.58	81.50	0.08
B5	81.80	81.11	0.69	83.29	83.33	-0.04	83.00	82.82	0.18	83.20	83.06	0.14
B6	81.96	82.43	-0.47	84.19	84.23	-0.04	83.32	83.17	0.15	83.93	83.67	0.26
B7	82.49	83.01	-0.52	85.13	85.17	-0.04	85.23	85.40	-0.17	85.16	84.92	0.24
B8	83.58	82.43	1.15	85.47	85.51	-0.04	85.50	85.24	0.26	85.48	85.18	0.30
B9	76.45	74.86	1.59	78.54	78.59	-0.05	78.87	78.89	-0.02	78.64	78.68	-0.04
B10	76.79	75.75	1.04	79.37	79.42	-0.05	78.99	79.05	-0.06	79.26	79.46	-0.20
B11	79.59	79.45	0.14	81.14	81.19	-0.05	81.54	81.37	0.17	81.26	80.96	0.30
B12	80.63	79.36	1.27	82.82	82.87	-0.05	82.61	82.15	0.46	82.76	82.50	0.26
B13	83.43	83.50	-0.07	84.96	85.01	-0.05	85.31	84.72	0.59	85.07	84.58	0.49
B14	85.32	85.09	0.23	86.55	86.60	-0.05	86.52	86.30	0.22	86.54	86.13	0.41
B15	89.39	85.84	3.55	88.42	89.13	-0.71	89.21	89.65	-0.44	88.66	88.82	-0.16
B16	87.81	87.02	0.79	89.04	89.68	-0.64	89.61	90.10	-0.49	89.21	89.28	-0.07