

ФГБОУ ВО «ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»



на правах рукописи

ЯРОВАЯ ТАТЬЯНА СЕРГЕЕВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ШУМОВОГО РЕЖИМА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
АКУСТИЧЕСКОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ЗДАНИЙ И
СООРУЖЕНИЙ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ**

Специальность 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент, Антонов А. И.

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 Особенности формирования звуковых полей и распространения звуковой энергии в зданиях и сооружениях с массовым пребыванием людей.	
Постановка основных задач исследования	11
1.1 Характеристика объектов с массовым пребыванием людей с точки зрения их акустического благоустройства	11
1.2 Функциональные процессы и планировочные решения в зданиях и сооружениях с массовым пребыванием людей	13
1.3 Условия и особенности формирования звуковых полей на объектах с массовым пребыванием людей	16
1.3.1 Речь как источник шума в зданиях и сооружениях с массовым пребыванием людей	16
1.3.2 Факторы, определяющие процессы формирования шума на объектах с массовым пребыванием людей	17
1.4 Оценка методов расчета по условиям их использования на объектах с массовым пребыванием людей	25
1.4.1 Расчеты прямого звука	25
1.4.2 Расчеты отраженного шума	29
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 и определение основных направлений исследования	33
ГЛАВА 2 Исследование характеристик речи, необходимых для разработки методов расчета шума в зданиях и сооружениях с массовым пребыванием людей	35
2.1 Параметры речи, необходимые для расчетов шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей	35
2.2 Принципы исследования энергетических параметров речи	40
2.3 Методика исследований энергетических параметров речи в заглушенной камере НИИСФа	40
2.4 Методика исследований параметров речи в помещениях при наличии отраженного шума	42

2.5	Результаты определения факторов направленности и акустической мощности речи, полученные на основе экспериментальных исследований в помещениях и их последующей обработки	54
2.6	Результаты определения факторов направленности и акустической мощности речи, полученные при экспериментальных исследованиях в заглушенной камере и их последующей обработки	62
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2		67
ГЛАВА 3 Методы и методики расчета шума на объектах с массовым пребыванием людей		
3.1	Методы расчета прямого звука на объектах с массовым пребыванием людей	69
3.1.1	Компьютерное моделирование прямого звука от скопления разговаривающих людей как от точечных источников	70
3.1.2	Расчет прямого звука от разговаривающих людей, как от равномерно излучающей звуковую энергию плоскости	71
3.1.3	Сравнение точности методов расчета прямого звука, основанных на компьютерном моделировании и на представлениях об излучающей звуковую энергию плоскости	73
3.2	Методики расчета шума в помещениях с распределенными источниками звука в виде разговаривающих людей	75
3.2.1	Расчет шума в помещении на основе метода мнимых источников ..	75
3.2.2	Расчет шума методом прослеживания лучей	80
3.2.3	Расчет отраженного шума в соразмерных помещениях при диффузном отражении звука от ограждений	82
3.2.4	Численный статистический энергетический метод расчета шума в помещениях с массовым пребыванием разговаривающих людей ...	83
3.2.5	Комбинированный метод расчета шума в помещениях с массовым пребыванием разговаривающих людей при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений	90
3.3	Компьютерная реализация и экспериментальная проверка методов расчета шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей ..	95

3.3.1 Общие принципы построения компьютерных программ для расчета шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей	95
3.3.2 Комбинированная компьютерная программа по расчету шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей	97
3.4 Экспериментальная проверка методов расчета шума на объектах с массовым пребыванием людей	101
3.4.1 Оценка методов расчета прямого звука на стадионе во время футбольного матча	102
3.4.2 Исследование шумового режима в помещениях школы как местах с массовым пребыванием людей	110
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	122
ГЛАВА 4 Расчет и проектирование акустического благоустройства помещений с массовым пребыванием людей с использованием перегородок неполной высоты	124
4.1 Использование перегородок неполной высоты для обеспечения акустического комфорта в помещениях с массовым пребыванием людей	124
4.2 Особенности формирования шумового режима в помещениях с перегородками неполной высоты	126
4.2.1 Исследование структуры звукового поля в помещении с перегородками неполной высоты	127
4.2.2 Средняя длина свободного пробега звука в помещении с перегородками	134
4.3 Методы расчета шумового поля в помещениях с перегородками неполной высоты. Сравнительная оценка расчетных методов	142
4.4 Исследование влияния перегородок неполной высоты на акустические параметры выделенных объемов	150
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	158
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	161

Приложение А	Определение направленности и акустической мощности мужской и женской речи в заглушенной камере НИИСФа	176
Приложение Б	Определение направленности и акустической мощности мужской, женской и детской речи в помещениях при наличии отраженного шума	184
Приложение В	Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ	197
Приложение Г	Акты о внедрении результатов работы	202

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в городской застройке имеется большое количество сооружений с массовым пребыванием людей. К ним в первую очередь относятся стадионы, места для проведения массовых мероприятий. Большое скопление людей наблюдается также в зданиях общественного и другого назначения, предназначенных для обслуживания населения. Особенностью протекающего функционального процесса в таких зданиях и сооружениях является одновременное скопление в замкнутом объеме или на открытом пространстве большого количества людей, создающих высокие уровни шума за счет обмена ими речевой информацией. Как показывает анализ имеющейся нормативной документации в области защиты от шума, разработке нормативных требований к шумовому режиму для данной группы зданий и сооружений не уделялось должного внимания. Анализ имеющихся методов расчета прямого звука от источников в виде разговаривающих людей и отраженного звука, возникающего при большом скоплении таких источников в помещениях, показывает, что в настоящее время нет надежных методов, учитывающих особенности этих источников, в частности, непостоянство и прерывистость речи во времени, случайный характер положения источников и направленности излучения ими звуковой энергии и т.п.

В этой связи разработка теоретических основ расчетов звуковых полей для зданий и сооружений с массовым пребыванием людей с целью оценки шумового режима и последующей разработки конструктивных и планировочных методов обеспечения необходимого акустического и шумового комфорта в них является актуальной темой архитектурной и строительной акустики, имеющей научное и практическое значение.

Степень разработанности темы исследований. В настоящее время практически отсутствуют методы оценки акустического комфорта в местах с массовым пребыванием людей и определения энергетических параметров шума на этих объектах. По этой причине необходимо целенаправленное проведение исследования процесса формирования шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей и разработка на этой основе методов расчета прямого и отраженного шума, учитывающих особенности излучения звуковой энергии людьми как специфическими источниками звука.

Объект исследования - здания и сооружения с массовым пребыванием людей.

Предмет исследования - оценка формирования и распространения прямой и

отраженной звуковой энергии в зданиях и сооружениях от источников шума в виде скопления большого количества разговаривающих людей.

Цель и задачи диссертационной работы.

Цель работы: разработка методов и методик расчета прямого и отраженного шума, обеспечивающих возможность оценки шумового режима и разработки планировочных и конструктивных решений для создания акустического комфорта на объектах с массовым пребыванием людей.

Задачи работы: дать характеристику объектов с массовым пребыванием людей с точки зрения их шумового воздействия на окружающую среду; исследовать условия формирования шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей и определить основные факторы, влияющие на него; выполнить оценку существующих методов расчета энергетических параметров шума с позиции возможности их использования на объектах с массовым пребыванием людей; исследовать энергетические параметры речи с учетом пола и возраста людей как специфических источников звуковой энергии и дать аналитическое описание факторов направленности на основе аппроксимации экспериментальных данных; разработать метод компьютерного моделирования прямого звука, образующегося в местах массового пребывания разговаривающих людей; разработать метод расчета прямого звука от разговаривающих людей как от излучающей звуковую энергию плоскости; разработать методы расчета отраженного шума в помещениях от распределенных источников (людей) при зеркальном и диффузном отражении звука от ограждений; разработать методику расчета и проектирования акустического благоустройства помещений с массовым пребыванием людей путем использования перегородок неполной высоты; разработать компьютерные программы для реализации предложенных методов и методик; произвести экспериментальную проверку разработанных методов и методик на натурных объектах с массовым пребыванием людей.

Научная новизна работы:

- на основе оценки степени воздействия возникающего при разговорах людей шума на окружающую среду впервые дано определение объектов с массовым пребыванием людей с позиции их шумовых характеристик;
- путем экспериментальных исследований в лабораторных и натурных условиях получены энергетические характеристики речи людей разного пола и возраста предложены новые зависимости для определения факторов направленности речи;

- разработан новый метод компьютерного моделирования прямого звука, образующегося в местах массового пребывания разговаривающих людей;
- разработан новый метод расчета прямого звука, возникающего при разговорах людей в местах их массового скопления, как от излучающей звуковую энергию плоскости;
- на основе методов статистической и геометрической теорий акустики помещений предложены методики расчета отраженного шума в помещениях, учитывающие особенности излучения звуковой энергии находящимися в помещениях людьми как плоскими источниками звука;
- разработана новая методика расчета и проектирования акустического благоустройства в помещениях с массовым пребыванием людей путем использования перегородок неполной высоты.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается в представлении разговаривающих людей в местах их массового скопления как специфических источников звука, обладающих особенностями случайного размещения и перемещения и направленностью излучения звуковой энергии; во всестороннем изучении речи как источника шума в местах массового скопления людей и в аналитических выражениях, полученных для определения факторов направленности излучаемой людьми звуковой энергии; в разработке новых методов и в совершенствовании существующих методов и методик расчетов прямого и отраженного звука, возникающего в зданиях и сооружениях при массовом скоплении разговаривающих людей; в разработке методики расчета и проектирования акустического благоустройства в помещениях с массовым пребыванием людей путем устройства в них перегородок неполной высоты; в разработке компьютерных программ для определения энергетических параметров шума на объектах с массовым пребыванием людей и в проектировании на этой основе мероприятий по акустическому благоустройству объектов и защите от их шума прилегающих городских территорий.

Методология и методы исследования.

При разработке темы выполнялись теоретические и экспериментальные исследования. Целью теоретических исследований являлось установление особенностей формирования и распространения прямого и отраженного звука на объектах с массовым пребыванием разговаривающих людей. Экспериментальные исследования выполнялись с

целью определения энергетических характеристик речи, а также для подтверждения точности предложенных методов и методик расчета. Разработка методов и методик выполнена с использованием основополагающих положений геометрической и статистической теорий акустики. Все расчеты выполнены с использованием специально разработанных компьютерных программ.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследований процесса формирования и распространения шума в зданиях и сооружениях при массовом скоплении в них разговаривающих людей;
- результаты исследования энергетических характеристик речи и предложенные для их описания зависимости;
- методы расчета прямого звука на объектах с массовым пребыванием людей;
- методики расчета отраженного шума, формирующегося на объектах с массовым пребыванием людей;
- методика расчета и проектирования акустического благоустройства в зданиях с массовым пребыванием людей с использованием перегородок неполной высоты;
- компьютерные программы для реализации разработанных методов и методик.

Степень достоверности результатов. При разработке расчетных методов и методик использованы положения геометрической и статистической теорий акустики помещений, а также статистический энергетический метод расчета шума, разработанный в рамках статистической теории акустики. Допущения, использованные при разработке методов и методик, общеприняты в работах российских и зарубежных авторов. Достоверность разработанных методов и методик подтверждается сравнительным анализом расчетных и экспериментальных данных, полученных на объектах с массовым пребыванием людей. При проведении экспериментов использованы общепринятые методы, оборудование и приборы, отвечающие требованиям действующих ГОСТ.

Апробация работы. Материалы, изложенные в диссертации, представлялись и обсуждались на 3, 4 и 9-й Международных научно-практических конференциях Института архитектуры, строительства и транспорта ТГТУ «Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт» (Тамбов, 2016, 2017, 2022); на Международной научно-практической конференции «В. И. Вернадский: Устойчивое развитие регионов» (Тамбов, 2016); на Всероссийских научно-технических конференциях «Актуальные проблемы городского строительства» (Пенза, 2019, 2020); на 1 и 2-ой Всероссийских (национальных)

научно-практических конференциях «Современная наука: теория, методология, практика» (Тамбов, 2019, 2020); на VIII, XIII, XIV Международных научных конференциях «Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г. Л.» (Москва, 2017, 2022, 2023); на VIII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Тамбов, 2023).

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.1 - Строительные конструкции, здания и сооружения: п. 7 «Разработка рациональных форм и параметров, объемно-планировочного решения зданий и сооружений исходя из условий их размещения в застройке, функциональных и технологических процессов, теплофизических, светотехнических, акустических и иных санитарно-гигиенических условий, пожарной и экологической безопасности»; п. 9 «Разработка и развитие теоретических основ и методов расчета ограждающих конструкций зданий и сооружений с учетом природно-климатических, теплофизических, светотехнических, акустических и иных условий».

Реализация результатов работы. Исследования выполнялись в рамках НОЦ «ТГТУ-НИИСФ РААСН». Результаты исследований и их компьютерное обеспечение переданы в НИИСФ РААСН с целью использования их при выполнении научных исследований, а также при решении практических задач снижения шума в общественных зданиях с массовым пребыванием людей. Результаты исследований шумового режима на стадионе «Спартак» г. Тамбова использованы в ООО «ТНТЦСА» при обосновании целесообразности увеличения вместимости стадиона в условиях сложившейся городской застройки. Результаты исследований акустической мощности речи людей как источников шума использованы при разработке звукоизолирующих и звукопоглощающих конструкций в школе №3 г. Рассказово при проведении ремонтных работ. Результаты работы используются в учебном процессе ТГТУ при подготовке бакалавров и магистров строительного и архитектурного направлений.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 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, основных выводов работы, списка литературы из 134 наименований и 4 приложений. Общий объем работы 206 страниц. Основной текст, включая 71 рисунок, 61 таблицу, изложен на 175 страницах, объем приложений - 31 страница.

ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ. ПОСТАНОВКА ОСНОВНЫХ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Характеристика объектов с массовым пребыванием людей с точки зрения их акустического благоустройства

В настоящее время в нормативной и технической литературе, связанной с оценкой шумового режима и с проектированием мер защиты от шума, отсутствует определение и характеристика источников шума в виде речи людей в местах их массового пребывания, нет также и определения мест массового пребывания людей как специфического акустического объекта.

Термин «массовое пребывание людей» используется в документах, связанных с пожарной безопасностью (Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 г. N 1479 «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации» [1]) и с обеспечением общественной безопасности (Постановление Правительства РФ от 25.03.2015 г. N 272 «Об утверждении требований к антитеррористической защищенности мест массового пребывания людей и объектов (территорий), подлежащих обязательной охране полицией, и форм паспортов безопасности таких мест и объектов (территорий)» [2]).

Согласно документам [1] и [2] под местом массового пребывания людей понимается территория общего пользования поселения или городского округа, либо специально отведенная территория за их пределами, либо место общего пользования в здании, строении, сооружении, на другом объекте, на которых при определенных условиях может одновременно находиться более 50 человек. Таким образом, с точки зрения безопасности основным признаком «массовости» пребывания людей является их количество, а именно 50 и более человек в определенном пространстве. Другие характеристики скопления людей в этом случае не имеют существенного значения.

С точки зрения расчета энергетических параметров шума, создаваемого людьми, термин «массовое пребывание людей» должен иметь иное наполнение. Во-первых, этот термин может служить для описания объектов (помещений, открытых площадок, сооружений и т. п.) как мест одновременного нахождения большого количества людей. В этом

случае для характеристики скоплений людей следует использовать такие количественные показатели, как общее количество людей, их плотность размещения, область пространства, занимаемая людьми. Во-вторых, места массового пребывания людей можно рассматривать как специфические источники шума. В этом случае наряду с количественными параметрами толпы следует использовать такие физические характеристики, как шумность, динамичность и т. п. [3].

При определенном количестве людей и разговоре средней громкости общая акустическая мощность излучаемой людьми звуковой энергии может оказаться незначительной, а создаваемые уровни звукового давления соизмеримы или даже ниже фонового шума, создаваемого в помещении или на открытой территории другими источниками звука. В этом случае нет смысла учитывать шум, возникающий от речи людей, самостоятельно. Его можно рассматривать как добавку к фоновому шуму. Таким образом, минимальное количество людей, образующих с акустической точки зрения «место массового пребывания», не является жестко установленной величиной, а зависит от акустического эффекта, который они создают, а также от факторов, влияющих на этот эффект.

Одним из таких основных факторов является соотношение шума, создаваемого речью людей, и шумом от других источников. Например, в промышленных помещениях шум, создаваемый речью людей, как правило, ничтожен по сравнению с шумом технологического оборудования. На открытой территории в качестве маскирующего шума можно рассматривать фоновые уровни, создаваемые транспортной системой поселения. С другой стороны, всего несколько человек, например, занимающихся в помещении спортсменов, могут создавать шум высоких уровней. В этом случае с акустической точки зрения даже небольшое количество участников следует рассматривать как массовое пребывание людей.

Следует отметить тот факт, что с акустической точки зрения важно не только общее количество людей, но и плотность их размещения. Создаваемые уровни звукового давления пропорциональны плотности расположения однотипных источников, в данном случае разговаривающих людей.

Другим не менее важным фактором является громкость речи или в более широком смысле «шумовое поведение» людей в месте их скопления. Например, большое количество посетителей в читальном зале создают настолько малые уровни звукового давления, что нет необходимости рассматривать читателей как самостоятельный источник шума из

категории «массовое пребывание людей». В то же время, как отмечено ранее, небольшое количество спортсменов во время игры могут создавать высокие уровни шума, и особенно, в закрытых объемах спортивных залов.

Кроме прямого звука, излучаемого людьми, на шумовой режим помещений существенное влияние оказывает его отраженная составляющая. Геометрические и акустические параметры помещений определяют величину и характер распределения отраженного звука в помещении и, следовательно, также оказывают влияние на необходимость учета или неучета речи людей при оценке шумовой ситуации в помещениях.

Таким образом, при оценке шумового режима количественные параметры массового скопления людей важны не с точки зрения идентификации их в качестве объекта с массовым пребыванием людей, а с точки зрения необходимости учета речи людей как специфического источника шума, имеющего свои особенности.

1.2 Функциональные процессы и планировочные решения в зданиях и сооружениях с массовым пребыванием людей

К местам массового пребывания людей относятся объекты, которые оказывают услуги населению, или другие объекты, которые массово посещает население.

Места массового пребывания людей можно разделить на следующие группы:

- по функциональному назначению – на объекты, обслуживающие население, и объекты по обслуживанию общества и государства;
- по положению в пространстве – на открытые сооружения и закрытые (здания);
- по характеру нахождения людей – эпизодического, периодического, повседневного пользования.

Объекты с массовым пребыванием людей имеют большое разнообразие по своему функциональному назначению. С точки зрения шумности и необходимости обеспечения в них акустического комфорта их можно разделить на следующие группы:

- *предприятия потребительского рынка и торговых услуг* (рынки, ярмарки, торговые центры, супермаркеты). Эти объекты могут быть открытыми и закрытыми, повседневного и периодического пользования. При их проектировании необходимо решать задачи по обеспечению комфортного шумового режима и требований разборчивости речи;
- *предприятия общественного питания* (рестораны, кафе, столовые и т. д.).

Объекты проектируются в основном закрытыми и предназначены для постоянного пользования. К ним предъявляются требования по созданию акустического комфорта (рестораны, кафе), а также по обеспечению условий конфиденциальности (приватности). Последнее может реализовываться устройством кабин (выгородок) с перегородками неполной высоты;

- *объекты физической культуры и спорта* (стадионы, бассейны, спортивные залы). Проектируются закрытыми (спортивные залы) и открытыми (стадионы). Отличаются высокими уровнями шума. При их проектировании требуется обеспечение мероприятий по созданию комфортного шумового режима.

- *объекты транспортного обслуживания* (вокзалы для всех видов транспорта). Они включают в себя различные по функциональному назначению помещения с различными требованиями к шумовому режиму. При проектировании необходимо учитывать эти требования для каждого конкретного случая. Требуется также обеспечение разборчивости речи, как правило, во всех помещениях вокзалов;

- *объекты культуры* (театры, музеи, концертные залы, дома культуры). При проектировании требуется обеспечение необходимого шумового режима и акустических условий для качественного восприятия музыкальной и речевой информации;

- *объекты образования* (детские сады, школы, профессионально-технические и другие колледжи и училища, высшие учебные заведения). В зданиях учебных заведений имеется, как правило, большое количество разных по функциональному назначению помещений, с различными требованиями к шумовому и акустическому режиму. В большинстве случаев к ним предъявляются требования по обеспечению хорошей слышимости и разборчивости;

- *объекты социального и другого обслуживания населения* (многофункциональные центры, пенсионные фонды, банки, бизнес-центры). В составе перечисленных объектов имеются операционные залы с массовым по акустическим условиям пребыванием людей. При их проектировании во многих случаях требуется обеспечение приватности общения между оператором и клиентом. Это достигается, как правило, устройством выгородок неполной высоты. При этом должны обеспечиваться конфиденциальность речевой информации и разборчивость речи.

Выше указаны наиболее распространенные объекты с массовым пребыванием людей. Кроме них могут быть также и другие более специфические объекты, например,

религиозные учреждения, проектирование акустического режима в которых имеют свои существенные особенности [4, 5, 6].

Все более широкое распространение в практике находят также залы, в которых могут выполняться различные по своему функциональному назначению процессы, например спортивно-зрелищные залы и залы многофункционального назначения. При их проектировании необходимо одновременно соблюдать ряд различных требований к шумовому режиму, слышимости и разборчивости [7, 8].

Указанные выше объекты имеют разнообразные планировочные решения, определяемые их функциональным назначением.

К основным планировочным решениям в зданиях с массовым пребыванием людей относятся анфиладные, коридорные, галерейные, зальные планировки. Перечисленные планировки могут применяться как по отдельности, так и в различных сочетаниях [9]. В качестве примера в таблице 1.1 приведены характерные планировочные решения для ряда зданий с массовым пребыванием людей.

Таблица 1.1 – Характерные планировочные решения для общественных зданий с массовым пребыванием людей

Тип планировки	Наименование объектов
Анфиладная	Музеи, торговые центры, рынки, ярмарки
Коридорная	То же
Галерейная	Бизнес-центры, торговые центры, рынки, ярмарки
Зальная	Рестораны, кафе, спортивные залы, помещения вокзалов, супермаркеты, операционные залы различного назначения
Зально-ячейковая	Кинотеатры, театры, вокзалы, выставочные залы
Комбинированная	Школы, высшие учебные заведения, банки, суды, многофункциональные центры

Как видно из табл. 1.1 при проектировании объектов одного и того же назначения могут применяться различные планировочные решения, которые по-разному влияют на шумовой режим объектов и на качество восприятия необходимой речевой информации.

1.3 Условия и особенности формирования звуковых полей на объектах с массовым пребыванием людей

1.3.1 Речь как источник шума в зданиях и сооружениях с массовым пребыванием людей

Разговаривающие в местах массовых мероприятий люди являются особой группой источников звуковой энергии, имеющих характерные для них особенности.

При оценке людей как источников звуковой энергии их возможно рассматривать как отдельные точечные источники звука, так и как их совокупности, представляющие в целом плоские или линейные источники.

Речь человека как источник звука характеризуется мощностью излучаемой при разговоре звуковой энергии, ее направленностью и частотным спектром. Нахождение человека в пространстве может быть детерминированным или случайным. К детерминированным источникам можно отнести речь оператора или клиента при общении их между собой во время обслуживания. В этом случае направленность излучения звуковой энергии также будет детерминированной или незначительно меняться в пределах ограниченного пространственного угла. Характерным примером такого стационарного положения может быть размещение болельщиков на трибунах спортивных сооружений. Ориентация их определяется действием, происходящим на спортивной арене.

В тоже время в большом количестве случаев поведение людей в местах их массового скопления отличается высокой степенью мобильности, случайным характером перемещения и, соответственно, случайной направленностью излучения звуковой энергии при разговоре. Примерами этому могут служить перемещения людей в торговых залах, на рынках, в рекреационных помещениях учебных заведений, в коммуникационных помещениях вокзалов и т. д.

В рассмотренных случаях при случайном перемещении людей производить оценку уровней звукового давления от каждого отдельного человека с последующим их суммированием от всех посетителей не представляется возможным. В данных ситуациях следует использовать методы оценки прямого звука, рассматривая скопление людей как единый плоский или линейный источник, имеющий в каждом конкретном случае свои особенности. К ним относятся плотность размещения одновременно разговаривающих

людей, уровень излучаемой при разговорах звуковой энергии, направленность речи в пределах скопления людей в целом.

Плотность размещения людей может быть примерно постоянной и реже переменной по пространству их расположения. Например, в залах ожидания вокзалов при их полном заполнении плотность практически постоянна по всему помещению. В то же время в местах проведения митингов и других подобных массовых мероприятий плотность участников или зрителей падает по мере удаления от сцены. Переменная плотность и, соответственно, переменные параметры совместной акустической мощности звуковой энергии, излучаемой людьми, влияют на процесс формирования шума и должны учитываться в методах расчета его энергетических параметров.

На распределение звуковой энергии в пространстве, окружающем места с массовым пребыванием людей, влияют геометрические параметры зоны нахождения людей как источников звука. Расположение зон влияет не только на уровни прямого звука, но и на уровни отраженного шума, образующегося при отражениях прямого звука от ограждений. Зоны могут занимать всю площадь помещения. В этом случае, как правило, шумовой режим мало изменяется в объеме помещения. При этом параметры образующегося отраженного звукового поля близки к параметрам диффузного поля. Зоны могут также занимать только часть площади помещения. Формирующееся отраженное звуковое поле в этом случае может отличаться от диффузного.

Исходя из изложенного выше на рисунке 1.1 приведены параметры источников звука в виде людей, излучающих при разговоре звуковую энергию, которые необходимо знать при расчетах шумового режима и оценке качества слышимости и разборчивости. Установление значений указанных параметров источников является важной задачей, решение которой рассмотрено далее в главе 2 работы.

1.3.2 Факторы, определяющие процессы формирования шума на объектах с массовым пребыванием людей

Формирование шумового режима на открытых территориях и внутри закрытых от внешней среды объектах с массовым пребыванием людей является многофакторным процессом. В данном случае условия формирования и распространения звуковой энергии определяется двумя группами факторов. К первой относятся факторы, связанные с

параметрами источника звука в виде разговаривающих людей. Ко второй группе относятся факторы, определяемые геометрическими и акустическими параметрами объемов, в которых имеется массовое скопление разговаривающих людей.

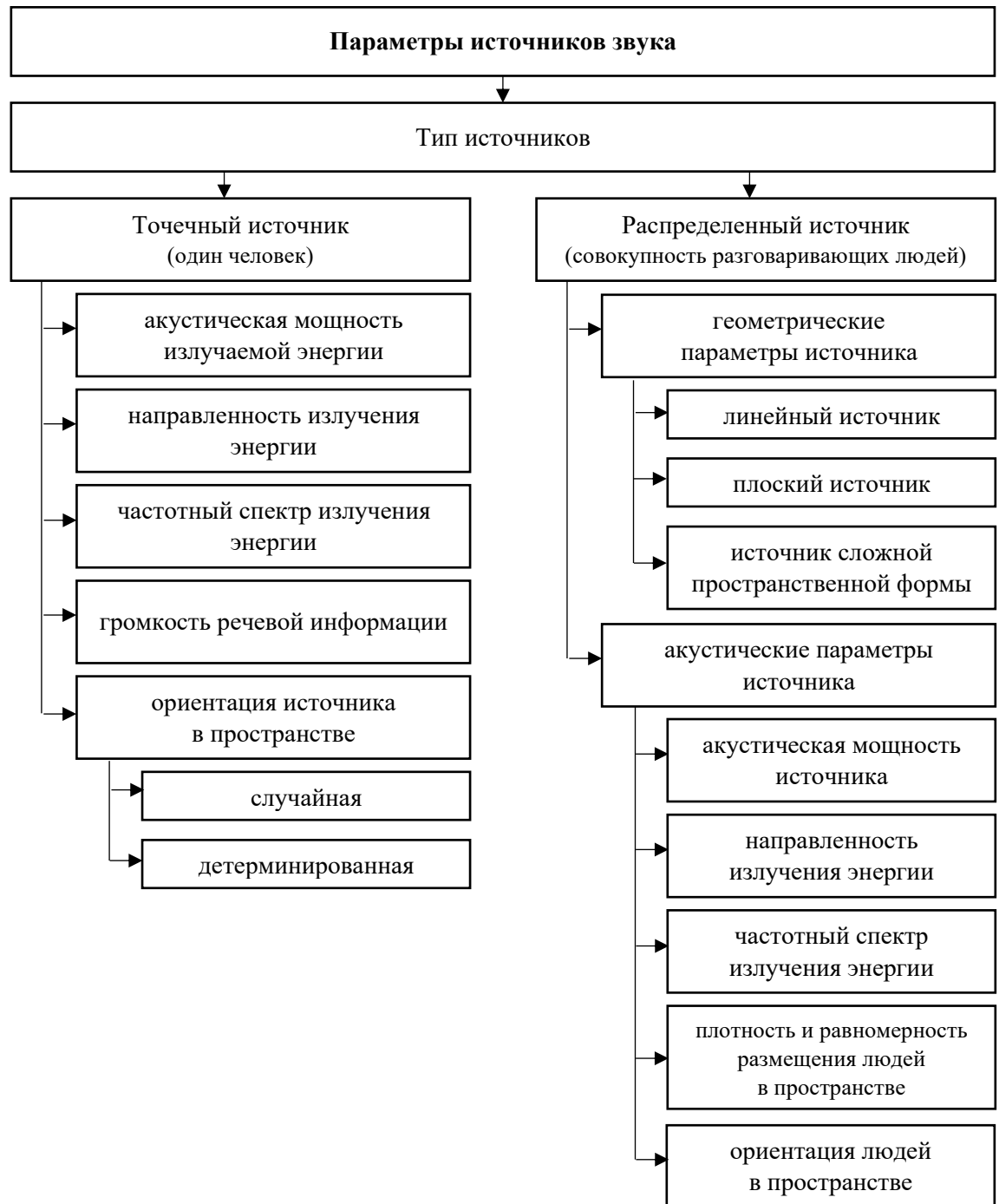


Рисунок 1.1 – Параметры людей как источников звука

Первая группа факторов определяет распространение прямой энергии от источников и влияет на формирование отраженной энергии, распространение которой во многом зависит от факторов, входящих во вторую группу. Таким образом, факторы, относящиеся

к первой и второй группам, взаимосвязаны между собой, и поэтому комплексно влияют на формирование шумового режима объектов с массовым пребыванием людей.

Ниже показаны пути учета указанных факторов в методах расчета энергетических характеристик шума, излучаемого людьми в местах их массового скопления.

При расчетах прямого звука, излучаемого людьми, необходимо учитывать акустические характеристики источника, а именно: частотную характеристику излучения; уровни звуковой мощности по частотам; пространственный характер излучения звука; фактор направленности излучения звука; временную характеристику излучения.

В настоящее время отсутствуют необходимые данные для определения перечисленных характеристик. Наши исследования показали, что излучаемая человеком звуковая энергия зависит от возраста и пола людей, их эмоционального (поведенческого) состояния в пределах массового скопления, целевой установки разговоров и др. [10, 11, 12].

Как показано выше, источники излучения звука от различных по своему назначению массовых собраний людей могут различаться по своим геометрическим параметрам и по расположению на открытом пространстве или внутри объема объектов.

Открытые объекты с массовым пребыванием людей могут оказывать негативное шумовое воздействие на прилегающую городскую застройку. К таким шумным мероприятиям могут относиться митинги, шествия, демонстрации, ярмарки, концерты. Наибольшие неудобства для окружающей застройки доставляют спортивные площадки и стадионы во время проведения спортивных мероприятий в непосредственной близости к жилым домам. От таких источников шума в застройке образуются поля прямого и отраженного звука. Отраженное звуковое поле образуется за счет отражения звуковых волн от поверхности земли и от окружающей застройки. Доля отраженного звука, как правило, незначительна. Она зависит от характера окружающей застройки, ее плотности и этажности. Уровни отраженного звука редко превышают величину прямого звука и могут оказывать влияние на шумовой режим на удаленных от источников шума участках территорий застройки [13].

Величина прямого звука определяется прежде всего параметрами источника шума, а также факторами, влияющими на распространение шума от места возникновения до точки измерения или расчетной точки (см. рис. 1.2). На распространение звука оказывает влияние подстилающий слой земли, степень поглощения звука в воздухе, направление и скорость движения воздуха, его температурные градиенты [14]. Значительное влияние на

распространение звуковой энергии в городской среде оказывают экранирующие звук сооружения. К таким объектам относятся зеленые насаждения, различные малые архитектурные формы и другие элементы, встречающиеся на пути распространения [15, 16, 17]. Для ограничения распространения шума от излучающих шум объектов используются специально возведенные акустические экраны, интегрируемые в городскую среду [18, 19, 20, 21].



Рисунок 1.2 – Факторы, влияющие на распространение звука от сооружений с массовым пребыванием людей в пространстве городской застройки

При разработке методов расчета все эти факторы необходимо учитывать совместно с особенностями источников шума в виде массового скопления разговаривающих людей.

Прямой звук внутри помещений рассчитывается на основании тех же принципов, которые используются при его расчетах на открытом пространстве. Некоторым отличием являются меньшие расстояния распространения звука и, следовательно, незначительное влияние на него параметров среды.

В помещениях при большом скоплении разговаривающих людей обеспечение комфортного шумового режима зависит не только от прямой звуковой энергии, но и от возникающей при этом отраженной составляющей. В ряде случаев наличие ранних

отражений способствует улучшению акустических качеств помещений [22]. В других же ситуациях отраженная звуковая энергия ухудшает слышимость и разборчивость речи, а также приводит к ухудшению шумового режима на объекте. Поэтому при выборе и проектировании средств акустического благоустройства в помещениях необходимо обеспечивать требуемое соотношение между уровнями звукового давления прямой и отраженной энергии. Например, при культурно-зрелищных мероприятиях акустический режим должен быть сформирован таким образом, чтобы, с одной стороны, каждый зритель, находясь в любой точке зала, разборчиво слышал все, что происходит на сцене, а с другой стороны, шум, создаваемый зрителями в зале, не мешал происходящему на сцене [23]. Похожая ситуация наблюдается в учебных заведениях, где в роли источника звука выступает преподаватель или лектор, а в роли слушателей – обучающиеся.

В помещениях с массовым пребыванием людей для создания хорошей разборчивости речи в этом случае должны предъявляться определенные требования к акустическому режиму помещений. Для ряда ситуаций на практике даются рекомендации о соотношениях уровней полезного сигнала и шумовых помех. Для отдельных различных по своему назначению помещений даются также рекомендации по величинам времени реверберации. Это касается в первую очередь помещений для проведения культурно-массовых мероприятий. В помещениях другого утилитарного назначения подобные требования в явном виде не предъявляются. Считается, что помещение не должно быть гулким, а уровень шумовых помех должен быть достаточно низким. С другой стороны, излишняя заглушенность помещений и очень низкий уровень фонового шума могут ухудшать условия обмена речевой информацией и, в частности, привести к снижению конфиденциальности речи. Например, такая переглушенность не допускается в залах ожидания вокзалов.

Формирование отраженной составляющей шума в закрытых объемах зависит от большего количества факторов, приведенных на рисунке 1.3.

Следует отметить, что планировка помещений, их геометрические и акустические параметры оказывают влияние на абсолютные значения отраженной энергии и на их изменения во времени [24]. Последнее особенно важно при рассмотрении речи человека как источников, излучающих отдельные импульсы энергии [25].

Спортивные сооружения, кинотеатры, вокзалы, предприятия общепита, религиозные учреждения, как правило, имеют зальную планировочную схему, но условия формирования в них шумового режима различны. Так, в спортивно-зрелищных сооружениях

источниками шума являются трибуны со зрителями и игровой процесс. Характерным явлением здесь является частое комментирование игры через средства усиления звука. Вокзалам также характерно электроусиление звука, посредством которого передаются важные информационные объявления.

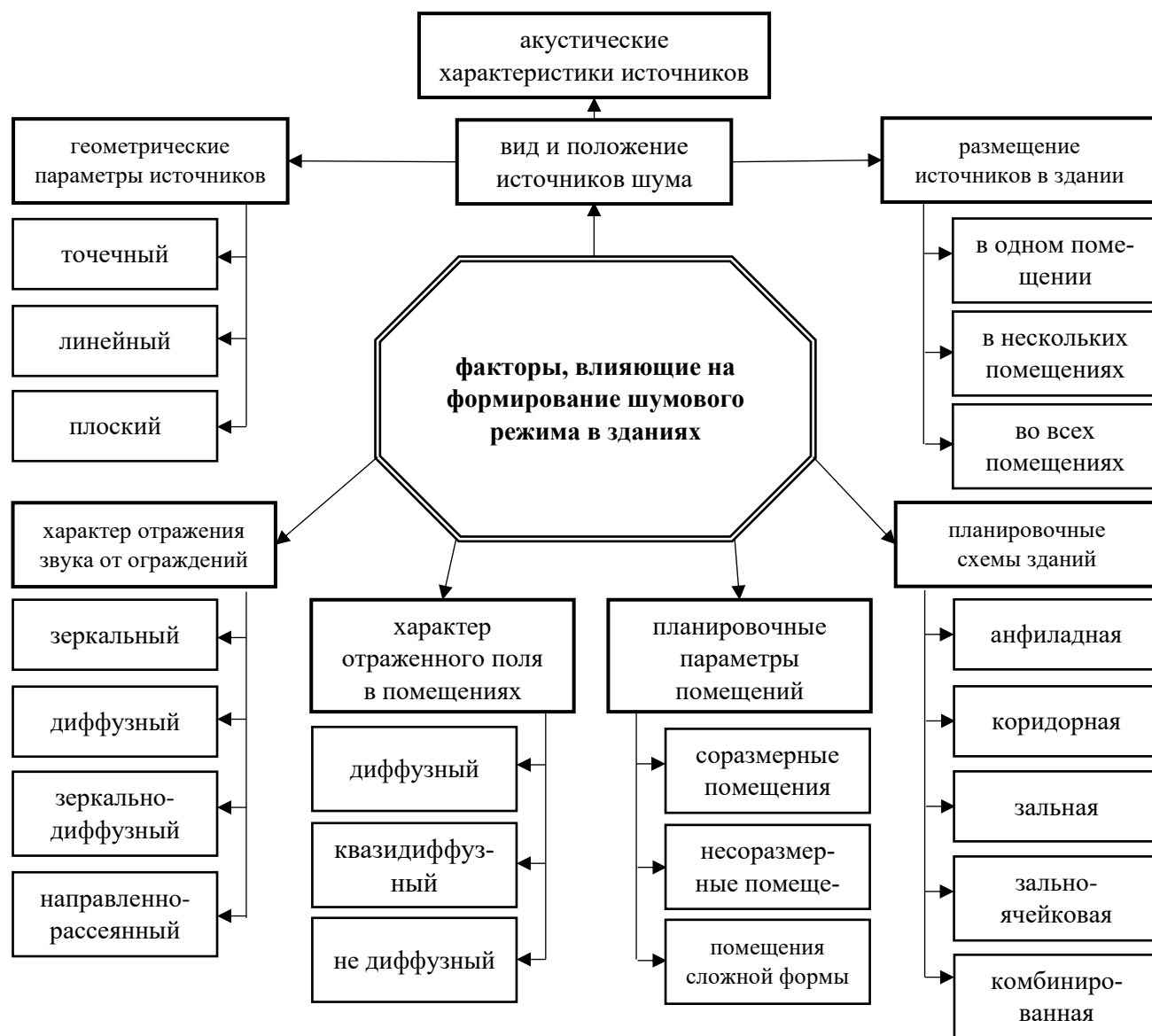


Рисунок 1.3 – Факторы, определяющие формирование шумовых полей в зданиях с массовым пребыванием людей

Для учебных заведений характерны комбинированные планировочные решения. При этом в коридорах имеются рекреационные пространства, в пределах которых в перерывах между уроками находится большое количество одновременно говорящих детей. В школах имеются также зальные помещения (актовые и спортивные залы, столовые), шумовой режим в которых зависит от их назначения.

На формирование шумового режима отдельных помещений, входящих в общую структуру зданий, существенное влияние оказывают их объемно-планировочные параметры, и в первую очередь, пропорции помещений. По пропорциям они делятся на соразмерные и несоразмерные. Последние в свою очередь могут быть длинными или плоскими [14]. В соразмерных помещениях образуется, как правило, диффузное отраженное поле, которое характеризуется двумя признаками диффузности, а именно, однородностью и изотропностью [26]. В несоразмерных помещениях образуются квазидиффузные звуковые поля, в которых не обеспечивается признак однородности распределения отраженной энергии по объему, но сохраняется равновероятность прихода в каждую расчетную точку отраженной энергии со всех возможных направлений [27]. Для таких помещений характерно наличие спадов отраженной энергии по мере удаления от источника шума. Величина спадов зависит от пропорций помещения и звукопоглощающих характеристик ограждений, а также от наличия внутри помещений различных рассеивателей звука [28, 29]. В сложных по форме помещениях распределение отраженной энергии может иметь как диффузный, так и квазидиффузный характер. Это зависит от формы помещения в конкретных его областях.

В пределах объемно-планировочных структур зданий все помещения можно рассматривать как акустически связанные объемы [30]. Акустическая связь в них может обеспечиваться за счет открытых проемов, через звукоизолирующие перегородки, а также через общие, связывающие их между собой воздушные пространства, например, через общее пространство в помещениях, разделенных перегородками неполной высоты [31]. Такие решения используются не только в промышленных зданиях, а также применяются в гражданских зданиях с массовым пребыванием людей.

На формирование отраженного шума и его распределение по объему помещения оказывает влияние характер отражения звука от ограждений помещений [32, 33].

В зависимости от вида поверхности, структуры материалов ограждений, частотного состава падающих на ограждения волн, угла падения звуковой энергии и других факторов характер отражения может быть зеркальным, диффузным (рассеянным), смешанным (зеркально-диффузным), направленно-рассеянным [33]. Схемы перечисленных видов отражения приведены на рисунке 1.4.

В методах расчета шума, применяемых на практике, в основном используются модели с зеркальным или диффузным отражением звука [33].

При зеркальном отражении звука действуют законы геометрической акустики, в соответствии с которыми при отражениях сохраняется форма звуковой волны, а угол отражения звука равен углу падения для каждого элемента отражающей поверхности помещения. В случае диффузного (рассеянного) отражения звука от поверхностей для описания отраженного поля используются статистические характеристики: средняя длина свободного пробега звуковых волн, среднее число актов поглощения энергии на ограждениях, диффузный коэффициент звукопоглощения поверхностей и др.

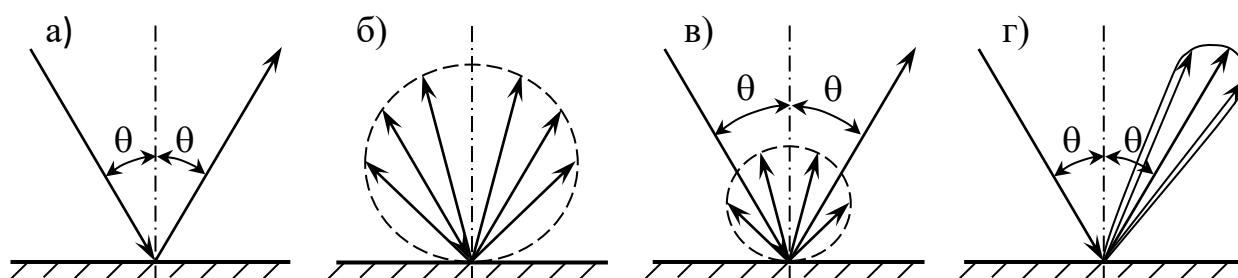


Рисунок 1.4 – Характер отражения звука от ограждений: а) зеркальное отражение; б) диффузное (рассеянное) отражение; в) смешанное отражение; г) направленно-рассеянное отражение

При таких идеализированных моделях отражения звука точность расчетов во многих случаях оказывается недостаточной. При диффузной модели результаты расчетов завышаются в ближних и занижаются в дальних от источника зонах помещения. При зеркальной модели, наоборот, результаты расчетов занижаются в ближней к источнику зоне помещения и завышаются в дальней. Установлено, что характер отражения звука в большей мере соответствует смешанной зеркально-рассеянной модели отражения. В этой модели одновременно учитываются свойства зеркального и диффузного отражений [33]. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования во многих случаях дают основание для выбора зеркально-рассеянной модели в качестве основной расчетной модели отражения звука [34, 35, 36].

Таким образом, на формирование шумового режима в помещениях оказывает влияние большое количество факторов. Эти факторы должны быть учтены в методах расчета шума. Чем больше будет учтено факторов в методе расчета, тем точнее будут результаты исследования.

Далее в п. 1.4 произведен анализ методов расчета энергетических характеристик шума применительно к задачам оценки шума в помещениях и сооружениях с массовым пребыванием людей.

1.4 Оценка методов расчета шума по условиям их использования на объектах с массовым пребыванием людей

Шумовой режим в конкретных точках пространства сооружений и зданий с массовым пребыванием людей определяется прямым звуком и отраженным шумом, образующимся в результате отражений прямого звука от ограждений. В открытых сооружениях преобладает энергия прямого звука. В закрытых зданиях и сооружениях отраженная составляющая шума соизмерима с энергией прямого звука, а в некоторых случаях и преобладает над ней.

По этим причинам при оценке шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей необходимо производить расчеты прямого звука и отраженной составляющей шума. Для этой цели необходимо иметь методы расчета, учитывающие особенности источников звука, в данном случае одновременно разговаривающих людей, и формирование отраженной энергии при массовом скоплении людей. Ниже рассмотрены существующие методы расчета прямого и отраженного звука с позиций возможности их использования при решении поставленных в работе задач.

1.4.1 Расчеты прямого звука

При расчетах прямого звука нужны сведения о параметрах и акустических характеристиках источников шума. Для этого необходимо иметь сведения о положении источника в пространстве застройки или помещения, о его геометрических параметрах, о пространственной направленности излучения звуковой энергии и об акустической мощности. Как правило, этих данных бывает достаточно для расчета энергетических характеристик прямых и отраженных звуковых полей.

Все источники делятся на две группы: на источники, излучающие постоянный шум и создающие постоянное во времени звуковое поле, и источники, формирующие переменное во времени звуковое поле.

Наиболее просто рассчитываются характеристики постоянных звуковых полей, параметры которых не изменяются во времени. Такие поля образуются при действии источников с постоянными во времени параметрами. Они должны иметь постоянную акустическую мощность и быть стационарными, то есть не перемещаться в пространстве и не

поворачиваться относительно своей оси. В подавляющем же большинстве случаев источники создают переменное во времени звуковое поле. Расчет характеристик таких полей достаточно сложен. В этой связи при расчетах принято использовать упрощенные подходы. Например, в результате замены переменной во времени акустической мощности усредненной эквивалентной характеристикой мощности, задача оценки энергетических характеристик поля сводится к решению постоянного во времени звукового поля. Следует отметить, что при этом теряется часть полезной для акустического проектирования информации. Например, нельзя получить сведения о максимальных и минимальных значениях уровней звукового давления, необходимых при исследованиях шума, излучаемого импульсными источниками звука [37, 38, 39].

За редким исключением все источники создают переменное во времени звуковое поле. Изменение во времени параметров звуковых полей может происходить за счет переменной акустической мощности источника. Другой причиной непостоянства звукового поля во времени является перемещение источника звука. К таким источникам, например, относятся транспортные средства: поток автомобилей, железнодорожные составы и т. д. Подобные ситуации возникают при формировании шумового режима в местах массового скопления людей. Связано это с изменением акустической мощности речи людей, а также с их перемещениями в толпе. Эти обстоятельства существенным образом оказывают влияние на выбор методов расчета прямого звука, излучаемого людьми в местах их массового скопления.

Вторым классификационным признаком источников шума, влияющим на выбор методов расчета является детерминированность и случайность (стохастичность) их параметров.

Детерминированные источники имеют постоянные места расположения или перемещаются по известным маршрутам с определенной скоростью. Положение и направленность излучения шума такими источниками известна в любой момент времени. Современные методики расчета шума приспособлены именно под такой тип источников.

Отдельную группу составляют перемещающиеся источники шума со случайной траекторией движения. Действующие нормативные документы не содержат методов расчета звуковых полей таких источников шума. Особую группу стохастичных источников представляют разговаривающие люди в местах массовых мероприятий (см. п. 1.3.1). С учетом их небольших размеров по сравнению с расстоянием до расчетных точек людей

можно считать точечными источниками звука. Такие источники могут быть стационарными, то есть имеют фиксированное положение и направленность излучения шума. Например, к такому типу источников шума относятся болельщики на трибунах спортивных мероприятий. Однако, в большинстве случаев люди на массовых мероприятиях отличаются высокой мобильностью, случайным характером перемещения и направленности речи.

Ниже рассмотрены возможные методы расчета прямого звука, которые можно использовать при оценке шума, создаваемого людьми в местах их массового нахождения.

В общем виде источники звуковой энергии, излучаемой людьми, можно рассматривать как источники с постоянным или случайным положением.

Как показано выше, в некоторых типах зрелищных и спортивных объектов зрители и болельщики занимают постоянные места в залах и на трибунах, а также имеют фиксированное направление взгляда и, соответственно, речи. В таких случаях они могут быть представлены в виде совокупности людей как точечных источников или источников в виде плоской или линейной фигуры с определенной заданной плотностью акустической мощности. Методики расчета от плоских и линейных источников подробно разработаны в [27, 40, 41]. Например, для плоского источника уравнение плотности энергии прямого звука может быть записано в виде

$$\varepsilon_{np} = \int_S \frac{W'' \Phi}{\Omega R^2 c} dS, \quad (1.1)$$

где W'' – поверхностная мощность излучения звуковой энергии источником; R – расстояние от элемента dS поверхности до расчетной точки; Φ – фактор направленности; Ω – пространственный угол излучения источника; c – скорость звука в воздухе.

Путем численного интегрирования уравнения (1.1) возможно определить плотность звуковой энергии в расчетной точке от плоского источника любой произвольной формы в том числе и с различным распределением акустической мощности по поверхности [40].

В случае источника произвольной формы, излучающего энергию по закону Ламберта, выражение (1.1) можно записать в виде

$$\varepsilon_{np} = \frac{W''}{c} \frac{\Theta}{\pi}, \quad (1.2)$$

где Θ – телесный угол, стягивающий поверхность S_i источника.

В этом случае для расчетной точки, находящейся, например, перед центральной частью трибуны стадиона, источник шума, состоящий из большого количества болельщиков, можно рассматривать в виде бесконечной плоскости и, соответственно, при $\Theta = 2\pi$ из уравнения (1.2) получить выражение

$$\varepsilon_{np} = \frac{2W''}{c}. \quad (1.3)$$

Для нахождения плотности энергии ε_{np} от трибуны как от прямоугольного плоского источника можно использовать приближенное выражение, предложенное в работе [40]

$$\varepsilon_{np} = \frac{W''(\alpha_2 - \alpha_1)(\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)}{\pi c}. \quad (1.4)$$

Здесь углы φ и α задают границы плоского источника в горизонтальном и вертикальном направлениях (см. рис. 1.5).

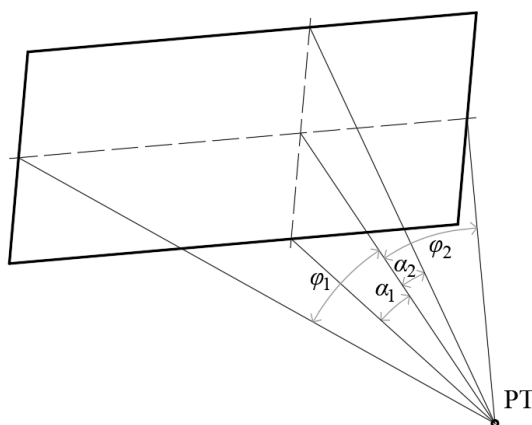


Рисунок 1.5 – Схемы к расчету углов φ и α в выражении (1.4)

При определенных соотношениях расстояний до расчетных точек и размеров плоского источника, его можно рассматривать как бесконечно плоский источник, как линейный или точечный. Подробно эти исследования выполнены в работе [42].

Как показано ранее, отличительной особенностью, значительно влияющей на выбор расчетной модели, является необходимость учета случайного характера движения людей, как источников шума, в местах их массового пребывания. В нормативной литературе отсутствует упоминание о подобных источниках шума и нет рекомендаций по расчету прямого и отраженного звука при их наличии.

Расчет шумового поля от случайно расположенных источников шума можно производить различными методами. Для этих целей может быть использован метод

компьютерного моделирования случайного процесса. В этом случае для реализации случайной функции потребуются многочисленные расчеты с учетом нахождения вероятности расположения и ориентации каждого из многочисленных источников шума. В случае большого количества людей и их высокой плотности расположения в местах массовых мероприятий возможно использование менее трудоемких методик расчета шума. В частности, можно осуществить переход от детерминированных источников к сплошной излучающей поверхности за счет «размазывания» отдельных источников шума в пределах их нахождения. При этом на основе расчета вероятности расположения источников шума в местах массового пребывания людей и определения вероятности ориентации источников шума в пространстве можно установить распределение поверхностной плотности акустической мощности и направленность излучения звука плоским источником. В случае небольшого количества людей такое усреднение может приводить к значительному разбросу результатов расчета. Вопросы обоснования возможности усреднения характеристик источников шума со случайной траекторией движения требуют дальнейших исследований.

1.4.2 Расчеты отраженного шума

Распределение отраженной звуковой энергии в отличие от прямого звука, подчиняется более сложным закономерностям и зависит от формы и соотношения размеров помещения, от характера отражения звука от ограждений, от величины звукопоглощения поверхностей и т.д. (см. п. 1.3.2).

В настоящее время для оценки энергетических характеристик отраженного шума и его распределения в помещениях используется достаточно большое количество различных методов. Они в основном базируются на положениях геометрической и статистической теорий акустики помещений [43, 44, 45, 46, 47].

Методы геометрической теории акустики имеют достаточно широкое распространение в практике расчетов звуковых полей помещений. Методы основываются на представлениях о зеркальном характере отражения звука от ограждений, при котором для звуковых лучей выполняются законы геометрической оптики [48, 49, 50].

Возможность практического использования геометрической теории акустики ограничивается пределами ее применения. Представление о распространении энергии

звуковыми лучами справедливо при размерах поверхностей помещений, превышающих длину волны [49].

Использование методов геометрической теории в практике показало, что в большинстве случаев они не обеспечивают требуемой точности расчетов [26]. Недостаточная точность метода связана с тем, что принятая при разработке методов схема зеркальных отражений лучей (см. рис. 1.4 а) практически не обеспечивается в большинстве реальных помещений.

Наиболее широкое применение в практике расчетов отраженного шума с использованием методов геометрической акустики имеют метод мнимых источников и метод прослеживания лучей.

Метод мнимых источников был впервые предложен А. Д. Розенбергом [51]. Он получил применение при теоретических исследованиях процессов формирования акустического режима в помещениях и при определении энергетических характеристик шума в помещениях [52, 53, 54, 54, 55]. Практика использования метода мнимых источников показала его существенные ограничения, связанные с принципами, положенными в его основу. В основе метода лежит представление о зеркальном характере отражения звука от ограждений. Во многих ситуациях это не отвечает реальному отражению звука. Степень точности расчетов зависит от соответствия фактического отражения звука от ограждения принятой зеркальной модели отражения. Установлено, что при 20% и более рассеяния звуковой энергии при отражениях метод мнимых источников дает большие погрешности. В этом случае его следует использовать в составе комбинированных расчетных моделей, учитывающих зеркально-диффузный характер отражения звука [36, 56, 57, 58]. Значительным ограничением метода является также невозможность его использования в помещениях, формы которых отличаются от правильных форм типа параллелепипедов. Метод сложно использовать в помещениях с рассеивающими звук предметами и оборудованием.

Более перспективным методом моделирования акустических процессов и расчетов уровней шума в помещениях является метод прослеживания звуковых лучей (ray tracing), впервые предложенный М. Шредером для исследования акустических процессов в залах [59, 60]. В настоящее время он также используется и при оценке шумового режима в помещениях другого назначения [61, 62, 63].

По сравнению с методом мнимых источников метод прослеживания лучей имеет ряд существенных преимуществ. Одним из них является возможность применения метода

для расчетов в помещениях сложных форм. К преимуществам метода также можно отнести возможность его использования и при диффузной модели отражения звука [64, 65, 66, 67]. По этой причине метод можно считать наиболее универсальным [68]. Он позволяет учитывать размещение в помещении крупногабаритного оборудования, а также других рассеивающих звук предметов, и исследовать влияние этих предметов на акустические характеристики помещений, например, на длину пробега звуковых лучей [69].

Широкое применение метод получил в составе расчетных моделей, реализующих зеркально-диффузный характер отражения звука [36]. Его использование в комбинированной расчетной модели позволяет учитывать переход зеркально отраженной энергии в диффузно-рассеянную энергию [36].

В случае диффузного характера отражения звука при расчетах отраженного шума используются методы статистической теории акустики. На выбор этих методов влияют условия формирования отраженного звука в различных по форме и размерам помещениях.

В соразмерных помещениях при диффузном характере отражения звука образуется диффузное звуковое поле, имеющее признаки однородности и изотропности (см. п. 1.3.2). В этом случае расчет звуковых полей производится методом, основанным на классической статистической теории акустики [45, 46]. В работе [70] выполнен анализ границ применения методов диффузного поля в зависимости от степени соразмерности и геометрических параметров помещения. Установлено, что точность расчетов зависит от звукопоглощающих характеристик ограждений. Чем выше звукопоглощение, тем ниже точность расчетов. Основываясь на данных работы [70], метод диффузного поля рекомендуется применять в помещениях, у которых соотношение наименьшего и наибольшего размеров не менее 1:5 [71]. Оценка границ применимости диффузного метода при решении практических задач дана также в работе [72].

Следует отметить, что в помещениях с массовым скоплением людей источники шума в виде людей достаточно часто равномерно заполняют все помещение. В этом случае образующееся звуковое поле близко к диффузному, в том числе и в некоторых помещениях, не относящихся к соразмерным. Расчеты показали, что теория диффузного поля применима для широкого класса помещений с массовым пребыванием людей.

В помещениях с большой степенью несоразмерности условия однородности не соблюдаются, но при этом сохраняется второй признак диффузности, а именно,

равновероятность прихода в расчетную точку отраженных лучей с различных направлений. В этих случаях для оценки распределения отраженной звуковой энергии в объеме помещений может быть использованы статистические энергетические методы, разработанные в рамках статистической теории акустики [27].

Методы основаны на статическом энергетическом подходе и реализуют математическую модель, описывающую распределение плотности отраженной звуковой энергии в виде дифференциального уравнения второго порядка с соответствующими граничными и начальными условиями. Для этой модели в работе [73] показаны границы применения, и дана методика оценки ее точности. Для реализации модели разработаны аналитические и численные методы, которые в настоящее время используются при решении задач по борьбе с шумом [74, 75, 76, 77, 78, 79]. Анализ методов показывает, что для решения поставленных в работе задач наиболее применим численный статистический энергетический метод. В случае диффузной модели отражения звука численный метод позволяет решать задачи в сложных по форме помещениях.

Следует отметить, что в зарубежной практике расчетов шума в помещениях в последнее время начинает находить применение диффузионный метод расчета параметров шума [80, 81, 82, 83, 84, 85]. В его основе использована идея Ф. Олендорфа о распространении отраженной энергии в виде частиц энергии, перемещающихся в пространстве помещения подобно броуновскому движению молекул газа [86].

Рассмотренные выше геометрические и статистические методы основаны на представлениях о зеркальном или диффузном характерах отражения звука от ограждений. В то же время реальный характер отражения звука в большей степени соответствует зеркально-диффузной модели отражения [36]. В этом случае для исследований параметров отраженных звуковых полей помещений и расчета шума в них более приемлемы комбинированные расчетные модели [36]. Наибольшее распространение среди них получили модели, в которых используются метод прослеживания лучей и метод, основанный на численном решении интегрального уравнения Куттруфа, а также метод прослеживания лучей совместно со статистическим энергетическим методом [36].

Сравнительный анализ указанных расчетных моделей показывает, что наиболее приемлемой для решения поставленных в работе задач является модель, основанная на методе прослеживания лучей и численном статическом энергетическом методе. В настоящее время на ее основе разработаны методы расчета шума в помещениях и воздуховодах

различного назначения [34, 35, 36, 87]. Указанный комбинированный метод позволяет выполнять расчеты в помещениях сложной формы, в том числе и с технологическим оборудованием [88]. Методики использования метода подробно рассмотрены в статьях [89, 90]. Комбинированный метод использован также для решения задач по оценке импульсного шума [91] и для расчета шума в производственных помещениях с перегородками неполной высоты [31].

В целом, выполненный анализ методов расчета показывает, что выбор конкретного метода зависит от рассмотренных выше условий и факторов, определяющих процессы формирования звуковых полей в помещениях с массовым пребыванием людей. Расчеты шума в этом случае следует выполнять с использованием компьютерных технологий [92, 93, 94].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Определена область исследования в виде объектов с массовым пребыванием людей, создающих высокий уровень шумового воздействия на окружающую среду. Установлена проблема отсутствия методов расчета звуковых полей от динамичных стохастических источников шума, какими являются люди в местах их скопления. Приведена характеристика объектов с массовым пребыванием людей с позиций решения задач по их акустическому благоустройству.

2. Выполнены исследования факторов, влияющих на процессы формирования звуковых полей от источников в виде большого количества разговаривающих людей. Определены специфические свойства массового скопления людей, как источника шума. Сформулированы требования к методам расчета звуковых полей. Для обеспечения необходимой степени точности расчетов расчетные модели и методы должны в максимальной степени учитывать факторы, определяющие процесс распространения звуковой энергии от людей на открытом пространстве и в помещениях.

3. Анализ существующих методов и методик расчета звуковых полей показал, что в технической литературе не используется отдельный тип источников шума в виде динамической стохастической среды, заполняющей некоторое пространство массового

пребывания людей. Специфический вид источников шума не позволяет напрямую использовать существующие подходы для расчета прямого звука от людей, находящихся в местах их массового скопления. Необходимы подробные исследования излучения звуковой энергии как отдельным человеком, так и при их скоплении.

4. При оценке шума в помещениях с массовым скоплением людей, следует использовать комбинированные методы расчета, учитывающие зеркально-диффузный характер отражения звука от ограждений. Для этого наиболее применим комбинированный метод расчета, основанный на методе прослеживания лучей и численном статистическом энергетическом методе.

5. При определенных условиях при расчетах отраженного шума могут быть использованы геометрические или статистические методы расчета. Границы их применения зависят от параметров помещений и условий формирования в них отраженного поля.

Исходя из поставленной цели работы и результатов выполненного в главе анализа основными направлениями исследования являются:

- исследование параметров речи людей как специфических источников (акустической мощности, частотного спектра, фактора направленности и др.) с учетом пола и возраста людей;
- разработка методов расчета прямого звука путем компьютерного моделирования речи и использования представлений об излучении звуковой энергии людьми в местах массового скопления как плоских источников звука;
- разработка методик расчета шума в помещениях с массовым пребыванием людей с учетом характера отражения звука от ограждений;
- разработка алгоритмов и компьютерных программ по расчету шума на объектах с массовым пребыванием людей;
- экспериментальные исследования распределения звуковой энергии на открытых пространствах и в помещениях от источников в виде массового пребывания людей с целью обоснования и проверки точности разработанных расчетных методов;
- разработка метода расчета и методики проектирования перегородок неполной высоты в помещениях с массовым пребыванием людей.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧИ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ШУМА В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ

Как показано ранее в главе 1, в местах массового скопления людей шумовая обстановка во многом определяется звуковой энергией, возникающей при разговорах людей, находящихся в толпе. В результате этого на объектах с массовым пребыванием людей достаточно часто возникают повышенные уровни шума, создающие помехи нормальному протеканию функционального процесса и оказывающие негативное воздействие на находящихся в толпе людей. Постоянная шумовая нагрузка от разговаривающих людей на органы слуха человека вызывает усталость, раздражительность, рассеянность внимания и т. д. Неблагоприятным фактором, возникающим при таких шумовых воздействиях, является также снижение слышимости и разборчивости речи между разговаривающими в толпе людьми или при получении ими звуковой информации из других источников. По этим причинам получение сведений о возможном шумовом режиме в местах скопления людей является важной задачей, результаты которой необходимы при проектировании таких объектов.

Шум на объектах с массовым пребыванием людей создается речью людей, являющихся в этом случае специфическими источниками звука, имеющими только им присущие особенности излучения энергии, расположения и перемещения в пространстве и т. д.

Информация о параметрах таких источников необходима для расчета распространяющегося от говорящих людей прямого звука и возникающей отраженной энергии.

В данной главе работы приведены результаты исследований характеристик речи с позиций представления разговаривающего человека как источника звуковой энергии с целью последующего использования этих данных при расчетах прямого и отраженного звука на объектах с массовым нахождением людей.

2.1 Параметры речи, необходимые для расчетов шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей

Формирование шумового режима в местах массового пребывания людей, его

энергетические характеристики и другие особенности во многом определяются энергией прямого звука, излучаемого людьми. В случае открытых объектов, например, открытых стадионов, спортивных площадок, игровых площадок детских садов и т. д., энергия прямого звука является основной составляющей, формирующей шумовой режим на этих объектах и на прилегающих к ним территориях городской застройки. В закрытых объектах распространение прямого звука вызывает также возникновение отраженной составляющей шума. Величина отраженной составляющей наряду с другими факторами (см. п.1.3.2) во многом определяется звуковой мощностью источника, количеством и местом положения таких источников. Следовательно, прямая звуковая энергия является основной величиной, определяющей шумовой режим на объектах массового пребывания людей.

Для расчета прямого звука необходимо иметь сведения о речи как источнике звуковой энергии.

Формирование, распространение, восприятие и распознавание речи изучается в специальных разделах акустики: в психоакустике, акустике речи, музыкальной акустике, биоакустике, электроакустике [25, 95, 96, 97, 98, 99]. В то же время в строительной акустике речь не рассматривается в виде отдельного источника шума. По этой причине в технической литературе, связанной с практикой снижения шума, отсутствуют необходимые сведения о характеристиках речи как источнике шума. Негласно считается, что акустическая мощность речи значительно ниже мощности других источников. Поэтому вклад речи в шумовой режим помещений или не учитывается, или считается частью фонового шума, который также в свою очередь часто игнорируется при акустических расчетах звуковых полей.

Речь как источник шума имеет ряд особенностей. Она непостоянна во времени, состоит из отдельных слов и пауз между ними. Темп речи и длительность пауз могут быть различными. Например, длительность пауз между словами зависит от дыхания говорящего человека, необходимости акцентирования внимания слушающих на отдельных важных моментах содержания разговора, имеются также смысловые паузы, которые при письме отмечаются запятыми. После слов, оканчивающихся на согласную букву, как правило паузы длиннее, чем после гласной буквы [97]. Можно получить усредненную временную структуру речи, которая имеет значение для оценки разборчивости речи. Однако, эти сведения будут избыточны при решении задач по снижению шума. Для оценки речи как источника шума часто достаточно знать только усредненные во времени

эквивалентные уровни акустической мощности речи. В настоящее время в литературе сохраняются только общие параметры громкости речи. Например, часто приводятся уровни звукового давления, не привязанные к месту измерения и в неопределенном частотном диапазоне, не указывается направление излучаемой человеком звуковой энергии и т. п.

Для расчета шума, создаваемого разговаривающими людьми на открытом пространстве и в помещениях, с точки зрения борьбы с шумом требуются сведения об акустической мощности речи и пространственном факторе направленности излучаемой человеком звуковой энергии.

Акустическая мощность источника шума является основной характеристикой, необходимой для выполнения расчетов прямого звука. Уровень акустической мощности говорящего человека L_{WP} можно определить при наличии сведений об уровнях звукового давления речи L_P путем обратного расчета для уровня звука от говорящего посетителя как от точечного источника

$$L_p = L_{WP} + 10 \lg \left(\frac{\Phi}{4\pi R^2} \right), \quad (2.1)$$

где R – расстояние от источника шума (сигнала) до расчетной точки; Φ – фактор направленности речи; L_{WP} – акустическая мощность говорящего человека.

В настоящее время отсутствуют подробные исследования речи человека как специфического источника шума. Следует особо отметить работу [95], в которой дана спектральная характеристика речевого сигнала L_P . Приведенные в ней спектральные характеристики L_P для расстояния $R = 1$ м от источника сигнала даны в таблице 2.1 для соответствующих уровней речевых сигналов при их линейном усреднении L_S .

Таблица 2.1 – Типовые уровни речевого сигнала согласно [95]

№	Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц	Частотный спектр речи, дБ, для типовых интегральных уровней		
		$L_S = 64$ дБ	$L_S = 70$ дБ	$L_S = 76$ дБ
1	125	47	53	59
2	250	60	66	72
3	500	60	66	72
4	1000	55	61	67
5	2000	50	56	62
6	4000	47	53	59
7	8000	49	49	55

В работе [95] на основе типовых интегральных уровней речевых сигналов предложена следующая классификация речи: $L_S = 64$ дБ – тихая речь; $L_S = 70$ дБ – речь средней громкости; $L_S = 76$ дБ – громкая речь.

Разработанная классификация была предложена ее автором для решения задач по защите речевой информации. Она также использована нами и при оценке уровней звуковой энергии, излучаемой людьми во время массовых мероприятий [98].

Кроме акустической мощности речи важное значение для оценки распространения прямого звука имеет фактор направленности речи.

В работе [25] дается характеристика фактора направленности речи для звукового давления в виде приближенного аналитического выражения

$$F_\theta = 0.5(1 + \cos(\theta / 2)), \quad (2.2)$$

где θ – угол между акустической осью источника и направлением на расчетную точку.

Соответственно, фактор направленности для плотности звуковой энергии имеет вид

$$\Phi = kF_\theta^2 = 0.25k(1 + \cos(\theta / 2))^2. \quad (2.3)$$

Нормирующий коэффициент k определяется выражением

$$k = \frac{4\pi}{2\pi \int_0^\pi 0.25(1 + \cos(\theta / 2))^2 \sin \theta d\theta} \approx 1.41, \quad (2.4)$$

и нормированный фактор направленности имеет вид

$$\Phi = kF_\theta^2 = 0.3525(1 + \cos(\theta / 2))^2. \quad (2.5)$$

В таком виде фактор направленности можно рассматривать, как степень отклонения плотности звуковой энергии или интенсивности прямого звука от средней величины в пределах сферы излучения.

С учетом (2.5) уровень акустической мощности разговаривающего человека в конкретной частотной полосе в соответствии с (2.1) при $\theta = 0$, $R = 1$ м будет определяться как

$$L_{WP} = L_P - 10 \lg \left(\frac{0.3525(1 + \cos(\theta / 2))^2}{4\pi \cdot 1^2} \right) = L_P + 9.5, \quad (2.6)$$

где L_P – уровень звукового давления речи в определенном частотном диапазоне на расстоянии 1 м от говорящего человека.

Приблизленно значения L_P можно принимать по табл. 2.1.

Величина акустической мощности речи будет определяться выражением

$$W_p = W_0 10^{0.1L_{wp}}, \quad (2.7)$$

где $W_0 = 10^{-12}$ Вт – пороговое значение акустической мощности.

Формула (2.2) была предложена для решения определенных акустических задач, например, для случая разговора оратора со слушающей его публикой [25]. По этой причине выражения (2.2) и (2.5) требуют уточнения для различных частотных диапазонов с учетом пола и возраста говорящих людей. Отсутствие указанных сведений не дает возможность производить надежную количественную оценку шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей, на которых шумовая обстановка формируется за счет разговаривающих людей.

Недостаточность сведений о параметрах речи как источника шума требует проведения экспериментальных исследований ее энергетических характеристик, а именно направленности и акустической мощности с целью возможности их последующего использования при расчетах шума в местах массового пребывания людей. Ниже в данной главе работы приведены результаты экспериментальных исследований факторов направленности и акустической мощности речи как источника шума.

Кроме акустической мощности и фактора направленности для расчетов прямого звука важное значение имеют сведения о количестве одновременно разговаривающих в толпе людей. Подробных исследований этих ситуаций, за исключением работы [3], ранее систематически не проводилось. В этой связи нами были произведены исследования по установлению процентов одновременно разговаривающих людей в разных ситуациях.

По данным, приведенным в работе [3], в большинстве случаев в помещениях железнодорожных вокзалов одновременно разговаривают 30–50 % присутствующих людей. Выполненные выборочные наблюдения в помещениях Павелецкого вокзала Москвы подтверждают данные, приведенные в работе [3].

Подобные исследования выполнены нами на других объектах с массовым пребыванием людей. Установлено, что на спортивных мероприятиях, школьных и детских площадках коэффициент одновременности речи достигает 60–80 %. В рекреационных помещениях школ во время перерывов процент разговаривающих детей может достигать 80–85 %. При этом уровень речи соответствует градации громкой речи. Исследования акустической мощности речи для разных групп людей и ситуаций приведены в данной главе ниже.

2.2 Принципы исследования энергетических параметров речи

Оценка характеристик речи как источника звуковой энергии включает в себя решение двух связанных между собой задач: определение акустической мощности говорящего человека и фактора направленности излучаемой энергии.

При этом следует учитывать особенности восприятия звуковой энергии говорящего человека в пределах скопления людей. В толпе люди воспринимают излучаемую энергию в зависимости от их положения по отношению к говорящему человеку. В отличие от положения людей по отношению к оратору, рассмотренного в работе [25], в данном случае положение может быть спереди, сбоку, сзади. Поэтому фактор направленности должен быть определен в виде круговой диаграммы.

Для оценки необходимых характеристик речи следует использовать два вида объектов исследования. Оценку энергетических параметров речи следует производить в большой заглушенной камере. В этом случае исключается влияние на получаемые характеристики отраженной составляющей шума. В случае отсутствия такой возможности оценку параметров речи можно проводить в обычных помещениях при отсутствии в них звукопоглощающих облицовок на ограждениях. При этом помещения должны быть соразмерными, в которых образуется диффузное звуковое поле. Это позволяет с необходимой точностью определять отраженную энергию и иметь в этом случае возможность исключать ее влияние на прямую звуковую энергию.

По этим причинам в работе исследования энергетических характеристик речи производились в большой заглушенной камере НИИСФа и в реальных соразмерных помещениях.

Методики выполнения исследований энергетических параметров речи в заглушенной камере и в обычных помещениях имеют между собой существенные отличия.

Ниже рассмотрены основные аспекты этих методик, использованные при экспериментальных исследованиях энергетических характеристик речи.

2.3 Методика исследований энергетических параметров речи в заглушенной камере НИИСФа

В заглушенной камере согласно требованиям ГОСТ 31252-2004 [100] измерение

параметров речи производилось точным методом по ГОСТ 31273-2003 (ИСО 3745-2003) [101].

Для измерений в камере в качестве измерительной поверхности использовалась сфера радиусом 1 м с центром в акустическом центре источника. Микрофоны располагались в заданных точках измерительной поверхности согласно рекомендациям ГОСТ [101].

Проверка методом двух поверхностей (см. прил. В.3 в [101]) показала, что испытательное пространство и заглушенная камера пригодны для измерений. Разница δ , определяемая по формуле

$$\delta = L_{P1} - L_{P2} - 10 \lg \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (2.8)$$

не превышает 0.5 дБ в диапазоне частот от 63 Гц до 8000 Гц.

В формуле (2.8) L_{P1} и L_{P2} – уровни звуковых давлений соответственно на измерительных поверхностях с площадями S_1 и S_2 .

Уровни фонового шума L_ϕ , измеренные в заглушенной камере, даны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Уровни фонового шума в камере

Уровни фонового шума L_ϕ , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами f_{cp} , Гц								
31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
7.0	9.2	10.5	12.0	12.5	12.3	10.9	9.9	10.1

При оценке результатов измерений установлено, что в полосах частот с $f_{cp} = 125 \div 1000$ Гц величина фонового шума ниже уровней звукового давления источника более чем на 20 дБ. В остальных полосах частот уровни фонового шума ниже уровней звукового давления источника звука на 10–20 дБ. В последнем случае уровни звукового давления корректировались путем использования поправки K_{li} , дБ, определяемой по формуле

$$K_{li} = -10 \lg(1 - 10^{-0.1 \Delta L_i}), \quad (2.9)$$

где $\Delta L_i = L'_{pi} - L''_{pi}$; L'_{pi} , L''_{pi} – уровни звукового давления, соответственно, измеренные при работающем источнике (речи человека) и уровни давления фонового шума.

Уровень звукового давления с учетом коррекции определяется по формуле

$$L_{pi} = L'_{pi} - K_{li}. \quad (2.10)$$

Уровень звуковой мощности L_{WP} рассчитывался по среднему уровню звукового давления на поверхности измерительной сферы L_{pf} , определяемому по формуле

$$L_{pf} = 10 \lg \left(\frac{1}{S} \left[\sum_{i=1}^N S_i 10^{0.1 L_{pi}} \right] \right), \quad (2.11)$$

где L_{pi} – уровень звукового давления в i -м положении микрофона с учетом его коррективы по формуле (2.10); S_i – площадь участка измерительной сферы, соответствующая i -му положению микрофона; S – общая площадь измерительной сферы; N – число положений микрофона.

Исследование температурно-влажностного режима показали его соответствие требованиям ГОСТ [101]. При этом уровень звуковой мощности L_{WP} определялся по формуле, учитывающей метеосостояние камеры

$$L_{WP} = L_{pf} + 10 \lg \left(\frac{S}{S_0} \right) + c_1 + c_2, \quad (2.12)$$

где $S = 4\pi r^2$ – площадь сферы радиусом r ; $S_0 = 1 \text{ м}^2$; c_1, c_2 – поправки на метеосостояние камеры, определяемые по ГОСТ [101].

Для камеры НИИСФа поправки при измерениях речи составляли $c_1 = -0.12 \text{ дБ}$, $c_2 = 0.00 \text{ дБ}$.

Показатель направленности по результатам измерений определялся по формуле

$$D_{li} = L_{pi} - L_{pf}, \quad (2.13)$$

а фактор направленности рассчитывался по выражению

$$\Phi_i = 10^{0.1 D_{li}}. \quad (2.14)$$

Результаты исследований речи в заглушенной камере приведены в п. 2.6.

2.4 Методика исследований параметров речи в помещениях при наличии отраженного шума

Как сказано ранее, при исследованиях параметров речи в условиях реальных помещений необходимо учитывать наличие отраженного шума. Это обстоятельство оказывает влияние на выбор помещений для проведения исследований и на методику обработки результатов измерений.

Выбор помещений для проведения исследований речи. Экспериментальные

исследования направленности и акустической мощности речи взрослых людей проводились в аудитории N 205 учебного корпуса «Е» Тамбовского государственного технического университета. Энергетические параметры детских голосов определялись при измерениях в кабинете N 22 школы №3 г. Рассказово Тамбовской области.

Оба помещения относятся к типу учебных помещений, имеют идентичные размеры, одинаковую отделку поверхностей и мебель. Оба помещения по геометрическим параметрам относятся к соразмерным. В помещениях отсутствуют звукопоглощающие облицовки. В помещениях располагается мебель в виде ученических столов, шкафы для наглядных пособий. На стенах развешены планшеты с учебной информацией.

Ниже приведены геометрические параметры помещений и их акустические характеристики.

Аудитория 205 располагается в учебном корпуса «Е» ТГТУ и имеет размеры $11.6 \times 5.9 \times 3.33(h)$ м. Объем помещения $V = 227 \text{ м}^3$, площадь ограждающих поверхностей $S = 253 \text{ м}^2$.

Схема помещения и расположения в нем расчетных точек показаны на рисунке 2.1.

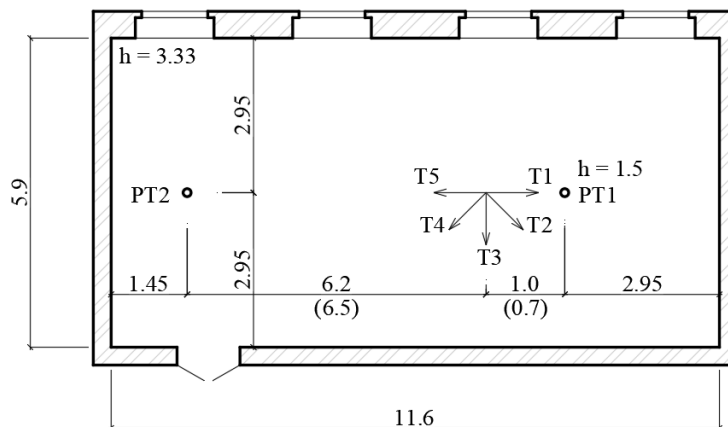


Рисунок 2.1 – Схема аудитории Е/205 с указанием расчетных точек (РТ1 и РТ2)

Стены помещений оштукатурены и покрашены водоэмульсионной краской, потолки бетонные, окрашенные, окна металлопластиковые, двери деревянные. Пол в аудитории имеет покрытие из линолеума.

Во время эксперимента в помещении аудитории находилось 19 столов и 42 стула.

Помещение по своим геометрическим параметрам относится согласно [14] к соразмерным. В помещении при работе источника звука образуется отраженное диффузное поле.

Средние коэффициенты звукопоглощения помещения $\bar{\alpha}$ определялись на основе результатов измерений времени реверберации.

В диапазоне частот до 2000 Гц при определении коэффициентов $\bar{\alpha}$ использовалась формула реверберации Сэбина

$$T = \frac{0.161V}{\bar{\alpha}S + 4m_a V}, \quad (2.15)$$

где V и S – объем и площадь ограждений помещения; $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения помещения.

В этом случае коэффициенты $\bar{\alpha}$ вычислялись по формуле

$$\bar{\alpha} = 0.041 \cdot l_{cp} / T, \quad (2.16)$$

где $l_{cp} = 4V/S$ – средняя длина пробега звука в помещении.

В диапазоне частот выше 2000 Гц при определении коэффициентов $\bar{\alpha}$ использовалась формула реверберации Эйринга

$$T = \frac{0.161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4m_a V}, \quad (2.17)$$

где m_a – показатель затухания звука в воздухе.

Рассчитанные по формулам Сэбина и Эйринга средние коэффициенты звукопоглощения приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Время реверберации и средние коэффициенты звукопоглощения помещения (аудитория Е/205)

Среднегеометрическая частота f , Гц	Время реверберации T , с	Пространственный коэффициент затухания звука в воздухе, m_a , м ⁻¹	$\bar{\alpha}$ по формуле Сэбина	$\bar{\alpha}$ по формуле Эйринга
125	2.27	0	0.06	0.06
250	1.68	0	0.09	0.08
500	1.42	0	0.10	0.10
1000	1.17	0	0.12	0.12
2000	1.23	0.01	0.08	0.08
4000	1.09	0.02	0.06	0.06
8000	0.73	0.03	0.09	0.09

В аудитории были выполнены также измерения фонового шума. Результаты измерений приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Уровни фонового шума в аудитории Е/205

Уровни фонового шума L_{ϕ} , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами $f_{\text{ср}}$, Гц						
125	250	500	1000	2000	4000	8000
31.1	25.7	16.2	12.6	12.5	13.9	15.6

Кабинет N22 располагается в школе N3 г. Рассказово и имеет размеры 10.7х6.1х3.45(н) м. Объем помещения $V = 225 \text{ м}^3$, площадь ограждающих поверхностей $S = 246 \text{ м}^2$. Схема помещения и расположения в нем расчетных точек показаны на рисунке 2.2.

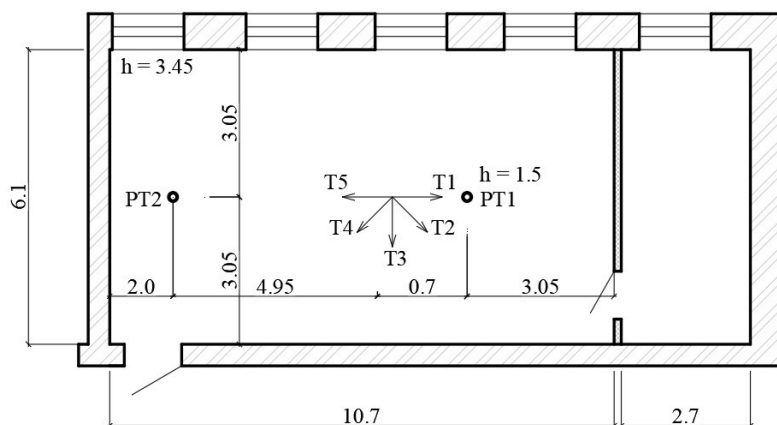


Рисунок 2.2 – Схема кабинета N22 с указанием расчетных точек

Стены помещений кирпичные, оштукатуренные, окрашенные водоэмульсионной краской, потолки бетонные, окна двухкамерные пластиковые, двери деревянные. Пол в кабинете дощатый. Во время выполнения измерений в помещении кабинета находилось 21 стол, 3 шкафа с учебными пособиями и 38 стульев.

Помещение по геометрическим параметрам относится к соразмерным и в нем при работе источника звука образуется отраженное диффузное звуковое поле.

Результаты определения времени реверберации и расчета средних коэффициентов звукопоглощения помещения приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Время реверберации и средние коэффициенты звукопоглощения помещения (кабинет N22)

Среднегеометрическая частота f , Гц	Время реверберации T , с	Пространственный коэффициент затухания звука в воздухе, m_a , м^{-1}	$\bar{\alpha}$ по формуле Сэбина	$\bar{\alpha}$ по формуле Эйринга
1	2	3	4	5
125	0.92	0	0.16	0.15

Окончание табл. 2.5

1	2	3	4	5
250	1.12	0	0.13	0.12
500	1.25	0	0.12	0.11
1000	1.28	0	0.12	0.11
2000	1.36	0.01	0.07	0.07
4000	1.49	0.02	0.03	0.03
8000	0.81	0.03	0.07	0.07

Уровни фонового шума, измеренные в кабинете, приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Уровни фонового шума в кабинете N 22

Уровни фонового шума L_{ϕ} , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами $f_{\text{ср}}$, Гц						
125	250	500	1000	2000	4000	8000
31.3	28.9	32.1	30.8	30.7	27.1	17.7

Аппаратурное обеспечение экспериментальных исследований.

При определении времени реверберации в аудитории Е/205 излучающая система состояла из компьютера, усилителя и всенаправленного источника шума (додекаэдра) OED SP–012–600. В кабинете №22 школы №3 г. Рассказово в качестве источника импульсного шума использовался пневматический пистолет.

Фиксация реверберационного процесса производилась с использованием шумомера Экофизика-110А и программного обеспечения приборов Октава «110 UTIL», позволяющего записывать характеристики непостоянного шума в исследуемых точках помещения. Схема измерительной системы приведена на рисунке 2.3.

При определении характеристик речи использовались одновременно два шумомера. Для оцифровки результатов измерений и переноса данных в файлы для дальнейшей компьютерной обработки на персональных компьютерах использовалось программное обеспечение «Report XL» и «110 UTIL».

Выбор методики измерения энергетических параметров источника шума производился в соответствии с ГОСТ 31252–2004 [100]. Согласно ГОСТ определение энергетических параметров источников шума может быть выполнено по техническому методу на основе измерений уровней звукового давления в помещении с источником звука при наличии существенно свободного звукового поля над звукоотражающей плоскостью (см. ГОСТ Р ИСО 3744-2013 [102]). Это требование означает, что вблизи источника, для

которого определяются акустические характеристики, звуковое поле в основном определяется прямым звуком и отражением звука от звукоотражающей плоскости (пола). Выполнение этого требования подразумевает соблюдение двух условий: первое условие – низкая величина фонового шума, второе условие – преобладание прямого звука над отраженным в точках измерений.

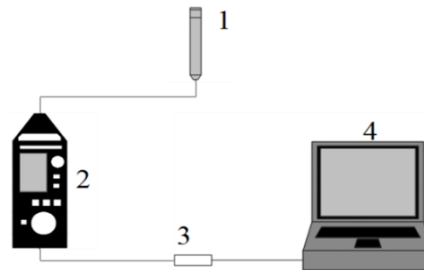


Рисунок 2.3 – Структурная схема измерительной системы:
1 – микрофон; 2 – шумомер; 3 – адаптер; 4 – компьютер

Требования стандарта к фоновому шуму были выполнены в обоих помещениях. В диапазоне 125–8000 Гц измеренные при наличии фонового шума эквивалентные уровни звукового давления, создаваемые испытуемым источником шума, выше эквивалентных уровней звукового давления фонового шума на 15 дБ и более (см. п. 4.2 [102]). Исключение составляют уровни в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31.5 и 63 Гц, на этих частотах акустическая мощность речи, и особенно женской, низкая. Эти частоты были исключены из обработки результатов.

Условие ограничения величины отраженного звука согласно [102, п. А.3.1] проверяется путем сравнения корректирующего коэффициента K_2 с граничным значением

$$K_2 = 10 \lg \left(1 + 4 \frac{S}{A} \right), \quad (2.18)$$

где S – площадь измерительной поверхности; A – эквивалентная площадь звукопоглощения испытательного помещения.

Как сказано ранее, для определения направленности речи при исследованиях, выполняемых в условиях реальных помещений, из результатов измерений уровней звукового давления необходимо исключить влияние отраженного звука. Для этой цели измерения проводились в двух характерных точках помещения: в ближней к источнику звука, где присутствуют обе составляющие звуковой энергии, и в дальней, где преобладает отраженная составляющая звуковой энергии, и, следовательно, прямым звуком

можно пренебречь. Так как в соразмерных помещениях отраженное звуковое поле диффузно и величины отраженной энергии одинаковы по всему объему, из результатов измерений можно вычленить энергию прямого звука в ближней к источнику точке измерения и, соответственно, определить акустическую мощность и фактор направленности речи. Так как громкость речи не остается постоянной во время эксперимента, спаренные измерения позволяют корректировать получаемую акустическую мощность.

Учитывая переменный во времени характер разговора, при измерениях фиксировались эквивалентные уровни звукового давления в октавных полосах нормируемого диапазона частот. Время усреднения составляло 3 минуты.

В каждом помещении проводилось по две серии экспериментов, отличающиеся расстоянием от расчетной точки РТ1 до источника речи (1 серия – 1 м, 2 серия – 0.7 м). Дальняя точка РТ2 оставалась в неизменном положении (см. рис. 2.1, 2.2). Микрофон в ближней точке РТ1 находился в равноудаленном положении от поверхностей помещения на высоте 1.5 м.

Определение круговой диаграммы речи непрерывно говорящего человека выполнялось при измерениях в 5 разных направлениях горизонтальной плоскости (см. рис. 2.1, 2.2), а именно 0° (человек стоит лицом к микрофону), 45° (человек стоит в пол-оборота к микрофону), 90° (человек стоит перпендикулярно микрофону), 135° и 180° (человек стоит спиной к микрофону). В работе Л. И. Макриненко [25] указано, что в вертикальной плоскости можно применять такое же распределение энергии, как в горизонтальной, то есть применять круговую симметрию звукового потока речи относительно центральной оси головы говорящего человека.

При выполнении измерений обеспечивались все перечисленные выше условия ГОСТ [102].

Методика обработки результатов экспериментов и определения энергетических параметров речи (направленности и акустической мощности) показана ниже на конкретном примере для аудитории Е/205.

Пример обработки результатов экспериментов. Расстояние от точки РТ1 до оратора – 1 м. Тип речи – мужской.

Эквивалентные уровни звукового давления, полученные в расчетных точках РТ1 и РТ2, приведены в таблицах 2.7 и 2.8.

Таблица 2.7 – Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии в ближней к говорящему человеку точке РТ1

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L'_{общ}$, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0	66.72	64.18	62.71	52.80	49.61	43.11	38.42
2	45	66.61	63.75	61.28	50.44	46.70	40.39	33.07
3	90	63.70	63.23	62.57	52.09	45.14	36.83	29.86
4	135	64.26	62.51	61.63	51.50	45.51	37.03	29.77
5	180	64.26	61.94	60.67	51.27	47.60	38.58	29.22

Таблица 2.8 – Эквивалентные уровни звукового давления в дальней от говорящего человека точке РТ2

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Эквивалентные уровни звукового давления отраженной звуковой энергии L_{omp} , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0	61.80	61.16	57.98	46.16	42.59	34.16	25.84
2	45	62.11	60.83	57.30	45.51	42.46	34.93	26.73
3	90	61.73	59.76	58.75	48.59	42.55	34.44	27.03
4	135	62.69	60.27	59.40	49.70	44.40	36.19	29.07
5	180	62.03	61.28	58.41	48.20	45.98	36.47	27.32
Средний уровень, $\bar{L}_{omp}$, дБ		62.07	60.66	58.37	47.63	43.60	35.24	27.20

Анализ измеренных уровней звукового давления в расчетной точке РТ2 (табл. 2.8) показал, что на определенных частотах уровни звукового давления изменяются до 3 дБ, а от средних значений отличаются до 2 дБ. Это обстоятельство связано с переменной во времени громкостью речи. Для устранения погрешности использована поправка

$$\Delta L_w = \bar{L}_{omp} - L_{omp,i}, \quad (2.19)$$

где $\bar{L}_{omp}$ – средний эквивалентный уровень звукового давления отраженной звуковой энергии, дБ, определяемый по формуле

$$\bar{L}_{omp} = \sum_{i=1}^n L_{omp,i} / n \quad (2.20)$$

для $n = 5$ экспериментальных замеров.

В таблице 2.10 приведены уровни звукового давления, скорректированные с учетом переменной во времени громкости речи.

Таблица 2.9 – Поправки на переменную во времени громкость речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Поправки ΔL_w , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0	0.27	-0.50	0.39	1.47	1.01	1.08	1.36
2	45	-0.04	-0.17	1.07	2.12	1.14	0.31	0.47
3	90	0.34	0.90	-0.38	-0.96	1.05	0.80	0.17
4	135	-0.62	0.39	-1.03	-2.07	-0.80	-0.95	-1.87
5	180	0.04	-0.62	-0.04	-0.57	-2.38	-1.23	-0.12

Таблица 2.10 – Скорректированные эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии в ближней к говорящему человеку точке РТ1 с учетом поправки на переменную громкость речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L_{общ}$, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0	66.99	63.68	63.10	54.27	50.62	44.19	39.78
2	45	66.57	63.58	62.35	52.56	47.84	40.70	33.54
3	90	64.04	64.13	62.19	51.13	46.19	37.63	30.03
4	135	63.64	62.90	60.60	49.43	44.71	36.08	27.90
5	180	64.30	61.32	60.63	50.70	45.22	37.35	29.10

В расчетной точке РТ2 уровни звукового давления создаются в основном отраженным звуком. Ниже выполнена оценка влияния прямого звука в этой точке. В каждой октавной полосе анализа рассчитаны средние уровни звукового давления. Основной вклад в эти уровни в точке РТ2 вносит отраженная энергия. Для оценки вклада прямого звука в этой точке выполнены расчеты прямого

$$L_{np} = L_w + 10 \lg \left(\frac{1}{2\pi r^2} \right), \quad (2.21)$$

отраженного

$$L_{omp} = L_w + 10 \lg \left(\frac{4(1 - \bar{\alpha})}{\alpha S} \right) \quad (2.22)$$

и суммарного (прямого + отраженного) звука

$$L_{сум} = L_w + 10 \lg \left(\frac{1}{2\pi r^2} + \frac{4(1 - \bar{\alpha})}{\alpha S} \right) \quad (2.23)$$

от точечного источника с условной акустической мощностью $L_w = 100$ дБ. Расчет выполнен методом диффузного поля. Поправка на влияние прямого звука в этом случае

составляет

$$\Delta L_{np} = L_{\text{сум}} - L_{np} = 10 \lg \left(2\pi r^2 \times \frac{4(1 - \bar{\alpha})}{\alpha S} + 1 \right). \quad (2.24)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 2.11. Видно, что влияние прямого звука не превышает $\Delta L_{np} = 0.24$ дБ.

Таблица 2.11 – Результаты расчета прямого, отраженного и суммарного уровня звукового давления в точке РТ2 от источника с фиксированной акустической мощностью

Среднегеометрическая частота f , Гц	Расстояние между расчетной точкой и говорящим r , м	Уровень прямого звука L_{np} , дБ	Уровень отраженного звука L_{omp} , дБ	Суммарный уровень $L_{\text{сум}}$, дБ	Поправка на влияние прямого звука ΔL_{np} , дБ
125	1	92.02	93.81	96.02	-
	6.2	76.17		93.89	0.07
250	1	92.02	92.46	95.25	-
	6.2	76.17		92.56	0.10
500	1	92.02	91.69	94.87	-
	6.2	76.17		91.81	0.12
1000	1	92.02	90.80	94.46	-
	6.2	76.17		90.95	0.15
2000	1	92.02	91.03	94.56	-
	6.2	76.17		91.17	0.14
4000	1	92.02	90.48	94.33	-
	6.2	76.17		90.63	0.16
8000	1	92.02	88.59	93.64	-
	6.2	76.17		88.83	0.24

Уровень прямой звуковой энергии в точке РТ1 на расстоянии 1 м от источника речи в i -ом направлении определяется по формуле

$$L'_{np} = 10 \lg \left(10^{0.1 L_{\text{общ}}} - 10^{0.1 (\bar{L}_{omp} - \Delta L_{np})} \right). \quad (2.25)$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.12.

Уровень, рассчитанный по выражению (2.25) наряду с прямым звуком, содержит и вклад отраженного от пола звука. Поправка, исключая вклад этого звука, рассчитывается по выражению

$$\Delta L_{omp} = 10 \lg \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right) - 10 \lg \left[\frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_{omp}^2} \right) \right] = 10 \lg \left[r^2 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_{omp}^2} \right) \right], \quad (2.26)$$

где $r_{omp}^2 = 1^2 + (1.5 + 1.5)^2 = 10$ м – квадрат расстояния от мнимого изображения источника звука до точки измерения. Поправка на первое отражение составит $\Delta L_{omp} = -0.41$ дБ.

Таблица 2.12 – Уровень звукового давления прямой звуковой энергии в РТ1

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления прямой звуковой энергии L'_{np} , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0	65.34	60.78	61.38	53.25	49.69	43.62	39.55
2	45	64.71	60.58	60.21	50.95	45.87	39.31	32.46
3	90	59.79	61.62	59.94	48.68	42.88	34.10	27.08
4	135	58.63	59.10	56.81	45.01	38.69	29.20	20.80
5	180	60.45	53.38	56.88	47.89	40.44	33.44	25.00

Скорректированные значения уровней звукового давления прямого звука с учетом поправки (2.26) приведены в таблице 2.13. В этой же таблице содержатся значения среднего уровня прямой звуковой энергии на каждой частоте, которая определяется по формуле

$$\bar{L}_{np} = 10 \lg \left[\frac{1}{4\pi} \int_0^\pi 2\pi 10^{0.1L_{np,i}} \sin(\theta) d\theta \right], \quad (2.27)$$

где θ – угол между направлением на точку измерения и центральной осью направления речи.

Акустическая мощность говорящего человека с учетом первого отражения звука от пола, приведенная в табл. 2.13, определена по формуле

$$L_w = \bar{L}_{np} - 10 \lg \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right). \quad (2.28)$$

Таблица 2.13 – Результаты расчета уровней звукового давления прямой звуковой энергии без учета отраженного от пола звука в РТ1 и акустической мощности источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления прямой звуковой энергии L_{np} , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0	64.92	60.36	60.96	52.84	49.27	43.21	39.13
2	45	64.30	60.17	59.79	50.53	45.45	38.89	32.05
3	90	59.37	61.20	59.53	48.26	42.46	33.69	26.66
4	135	58.21	58.68	56.39	44.60	38.27	28.79	20.38
5	180	60.03	52.97	56.47	47.48	40.03	33.03	24.59
Средний уровень звукового давления прямой звуковой энергии $\bar{L}_{np}$, дБ		61.55	60.26	59.05	48.76	43.45	36.19	29.92
Акустическая мощность L_w , дБ		72.54	71.25	70.04	59.76	54.45	47.18	40.91

Средняя акустическая мощность говорящего человека составляет 69.29 дБА, что согласно [95] можно считать, как речь средней громкости.

Направленность речи говорящего человека, определяемая как степень отклонения звуковой энергии от среднего значения, рассчитывается по формуле

$$\Phi = 10^{0.1(L_{np,i} - \bar{L}_{np})}. \quad (2.29)$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0	2.176	1.025	1.554	2.555	3.819	5.031	8.337
2	45	1.883	0.979	1.188	1.503	1.584	1.864	1.631
3	90	0.606	1.243	1.117	0.891	0.796	0.562	0.472
4	135	0.464	0.696	0.543	0.383	0.303	0.182	0.111
5	180	0.706	0.187	0.552	0.743	0.454	0.483	0.293

Пример построения диаграммы фактора направленности для результатов, приведенных в табл. 2.14, дан на рисунке 2.4.

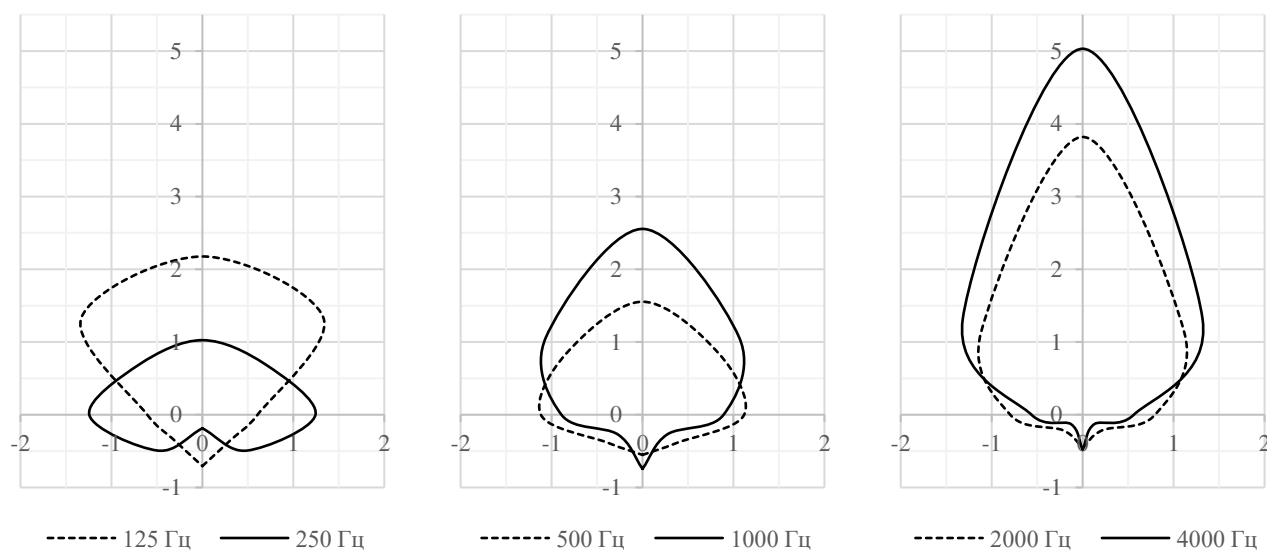


Рисунок 2.4 – Диаграммы фактора направленности мужской речи

2.5 Результаты определения факторов направленности и акустической мощности речи, полученные на основе экспериментальных исследований в помещениях и их последующей обработки

В приложении Б работы приведены результаты полученных в помещениях аудитории Е/205 и кабинете N22 данных измерений и их обработки для мужской, женской и детской речи.

Ниже, в таблице 2.15, приведены сводные результаты измеренных значений параметров направленности речи.

Таблица 2.15 – Усредненные факторы направленности мужской, женской и детской речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
Усредненный фактор направленности мужской речи							
1	0	1.863	1.561	1.317	2.303	3.369	4.013
2	45	1.337	1.410	1.201	1.402	1.777	2.107
3	90	0.802	0.985	1.102	0.963	0.642	0.541
4	135	0.768	0.548	0.592	0.439	0.396	0.136
5	180	0.764	0.253	0.494	0.587	0.402	0.289
Усредненный фактор направленности женской речи							
1	0	0.970	1.429	1.509	1.251	2.128	2.172
2	45	0.782	1.264	1.489	1.265	1.971	1.708
3	90	1.122	1.009	1.017	1.203	0.656	0.908
4	135	0.957	0.646	0.430	0.410	0.382	0.288
5	180	1.034	0.485	0.257	0.376	0.191	0.162
Усредненный фактор направленности детской речи							
1	0	1.621	1.124	2.302	1.485	3.355	2.987
2	45	0.892	1.015	1.681	1.311	1.389	1.813
3	90	1.014	0.997	0.910	1.033	1.067	0.777
4	135	0.938	0.907	0.278	0.545	0.212	0.256
5	180	0.824	0.833	0.275	0.575	0.205	0.146

Как и следовало ожидать, полученные экспериментально значения факторов направленности во многих случаях отличаются от расчетных данных формулы (2.5), которая предложена для частного случая общения оратора со слушающей его публикой [25]. Полученные данные также имеют определенные различия и между собой.

В целом же результаты исследований позволяют получить обобщенные выражения

для фактора направленности. Для этого произведена аппроксимация полученных графиков с использованием функции $\Phi(\theta)$, совпадающей с экспериментальными данными в трех направлениях, а именно в 0° , 90° и 180° :

$$\Phi(\theta) = K_1 + K_2 \cos \frac{\theta}{2} + K_3 \sin \theta, \quad (2.30)$$

где θ – угол между направлением на расчетную точку и центральной осью направления речи; K_1 , K_2 и K_3 – коэффициенты, определяемые системой выражений, соответственно, при $\theta = 180^\circ$, $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 90^\circ$

$$\begin{cases} K_1 = \Phi(180) \\ K_2 = \Phi(0) - K_1 \\ K_3 = \Phi(90) - K_1 - K_2 \cos(90 / 2) \end{cases} \quad (2.31)$$

В случае равномерного распределения аппроксимационных точек и с учетом плавного характера изменения функции (2.30) следует ожидать хорошего совпадения измеренных и рассчитываемых по выражению (2.30) значений фактора направленности.

Коэффициенты, полученные для рассмотренного в п. 2.2 примера (тип речи – мужской, расстояние от говорящего до микрофона – 1 м), приведены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Коэффициенты для определения фактора направленности по формуле (2.30)

Коэффициент	Коэффициенты для теоретического определения фактора направленности в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
K_1	0.706	0.187	0.552	0.743	0.454	0.483
K_2	1.470	0.838	1.002	1.812	3.365	4.548
K_3	-1.139	0.463	-0.144	-1.133	-2.037	-3.137

Сравнение факторов направленности, полученных экспериментально и рассчитанных по формуле (2.30) с использованием коэффициентов из табл. 2.16, дано в таблице 2.17.

Как видно из табл. 2.17 на высоких частотах фактор направленности принимает ярко выраженную вытянутую форму в направлении 0° . Значения фактора достигают 5. На средних частотах фактор направленности колеблется в пределах 0.5–2.5. По этой причине целесообразно усреднить коэффициенты, входящие в формулу (2.30), по двум полосам частот: низким и средним (125–1000 Гц) и высоким (2000–4000 Гц). Полученные

усредненные коэффициенты приведены в таблице 2.18.

Таблица 2.17 – Факторы направленности речи, полученные экспериментально и рассчитанные по формуле (2.30)

Угол θ , °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц					
	125		250		500	
	Φ (по табл. 2.17)	Φ (по форм. (2.30))	Φ (по табл. 2.17)	Φ (по форм. (2.30))	Φ (по табл. 2.17)	Φ (по форм. (2.30))
0	2.176	2.176	1.025	1.025	1.554	1.554
45	1.883	1.259	0.979	1.289	1.188	1.377
90	0.606	0.606	1.243	1.243	1.117	1.117
135	0.464	0.463	0.696	0.835	0.543	0.834
180	0.706	0.706	0.187	0.187	0.552	0.552

Продолжение табл. 2.17

Угол θ , °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц					
	1000		2000		4000	
	Φ (по табл. 2.17)	Φ (по форм. (2.30))	Φ (по табл. 2.17)	Φ (по форм. (2.30))	Φ (по табл. 2.17)	Φ (по форм. (2.30))
0	2.555	2.555	3.819	3.819	5.031	5.031
45	1.503	1.616	1.584	2.122	1.864	2.467
90	0.891	0.891	0.796	0.796	0.562	0.562
135	0.383	0.635	0.303	0.301	0.182	0.005
180	0.743	0.743	0.454	0.454	0.483	0.483

Таблица 2.18 – Усредненные по полосам частот коэффициенты для теоретического определения фактора направленности

Среднее значение коэффициента	Коэффициенты для теоретического определения фактора направленности в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц	
	125–1000	2000–4000
K_{1cp}	0.547	0.469
K_{2cp}	1.281	3.957
K_{3cp}	-0.488	-2.587

Согласно полученным усредненным коэффициентам, выражение (2.30) принимает вид:

- для полос частот с f_{cp} 125–1000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.55 + 1.25\cos(\theta / 2) - 0.49\sin\theta ; \quad (2.32)$$

- для полос частот с f_{cp} 2000–4000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.47 + 3.96\cos(\theta / 2) - 2.59\sin\theta . \quad (2.33)$$

Диаграммы фактора направленности мужской речи для рассмотренного примера, полученные экспериментально и теоретически по формулам (2.32) – (2.33) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–4000 Гц, приведены на рисунке 2.5.

В таблице 2.19 приведены усредненные коэффициенты для определения факторов направленности мужской, женской и детской речи.

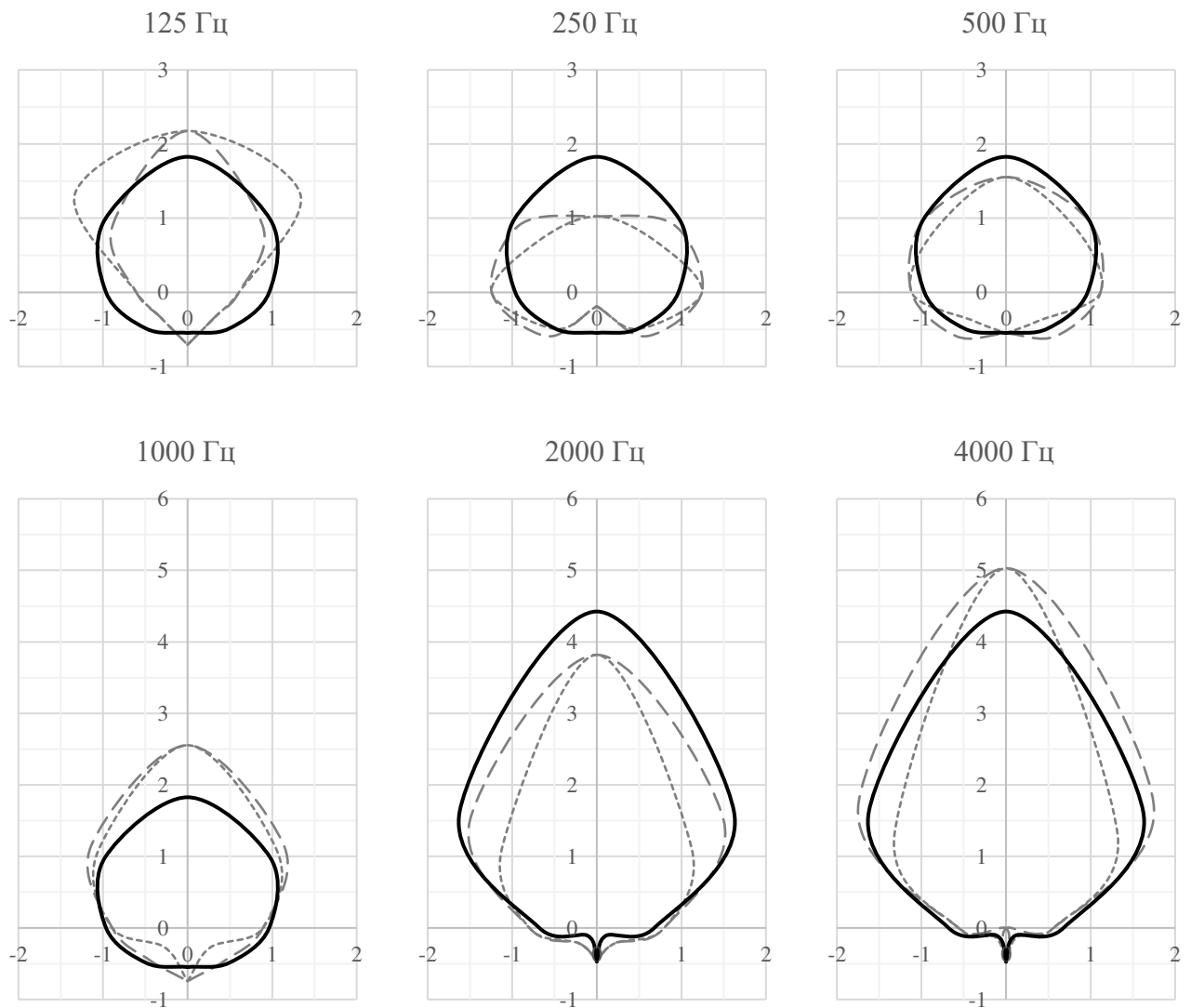


Рисунок 2.5 – Диаграммы фактора направленности мужской речи для рассмотренного примера, полученные экспериментально и теоретически, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–4000 Гц: ----- – экспериментально полученный фактор направленности; — — — — результат аппроксимации экспериментальных значений; ————— – результаты аппроксимации фактора направленности по форм. (2.32) – (2.33)

Таблица 2.19 – Усредненные по полосам частот коэффициенты для теоретического определения фактора направленности по формулам (2.32) и (2.33)

Среднее значение коэффициента	Коэффициенты для теоретического определения фактора направленности в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц	
	125–1000	2000–4000
Коэффициенты для определения фактора направленности мужской речи		
K_{1cp}	0.53	0.35
K_{2cp}	1.24	3.35
K_{3cp}	-0.44	-2.12
Коэффициенты для определения фактора направленности женской речи		
K_{1cp}	0.54	0.18
K_{2cp}	0.75	1.97
K_{3cp}	0.02	-0.79
Коэффициенты для определения фактора направленности детской речи		
K_{1cp}	0.63	0.18
K_{2cp}	1.01	3.00
K_{3cp}	-0.35	-1.37

Согласно полученным усредненным коэффициентам, формула (2.30) принимает вид:

1) для мужского голоса

- для полос частот с f_{cp} 125–1000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.53 + 1.24\cos(\theta / 2) - 0.44\sin\theta ; \quad (2.34)$$

- для полос частот с f_{cp} 2000–4000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.35 + 3.35\cos(\theta / 2) - 2.12\sin\theta ; \quad (2.35)$$

2) для женского голоса

- для полос частот с f_{cp} 125–1000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.54 + 0.75\cos(\theta / 2) + 0.02\sin\theta ; \quad (2.36)$$

- для полос частот с f_{cp} 2000–4000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.18 + 1.97\cos(\theta / 2) - 0.79\sin\theta ; \quad (2.37)$$

3) для детского голоса

- для полос частот с f_{cp} 125–1000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.63 + 1.01\cos(\theta / 2) - 0.35\sin\theta ; \quad (2.38)$$

- для полос частот с f_{cp} 2000–4000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.18 + 3.00\cos(\theta / 2) - 1.37\sin\theta . \quad (2.39)$$

Графики факторов направленности приведены на рисунках 2.6–2.8.

Выполнен сравнительный анализ уровней акустической мощности речи. Согласно

данным, приведенным в таблице 2.20 и представленных в виде усредненных спектров на рисунке 2.9, установлено, что форма спектров мужского и женских голосов в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 500–2000 Гц почти совпадают. В октавной полосе с $f_{cp} = 125$ Гц уровень мощности мужской речи выше на 28.1 дБ, а в полосе с $f_{cp} = 250$ Гц – на 2.1 дБ. На высоких частотах (4000 и 8000 Гц) громкость женской речи выше мужской на 2.8–5.7 дБ.

Спектр детской речи слабо зависит от пола ребенка, формы частотных графиков близки. Уровни акустической мощности речи в диапазоне частот 250–8000 Гц отличается на 2–3 дБ. В октавной полосе со среднегеометрической частотой 125 Гц уровень акустической мощности речи мальчика оказался ниже уровня мощности речи девочки на 3.4 дБ. Это отклонение связано с особенностями речи конкретных детей. При более широкой выборке следует ожидать меньших расхождений.

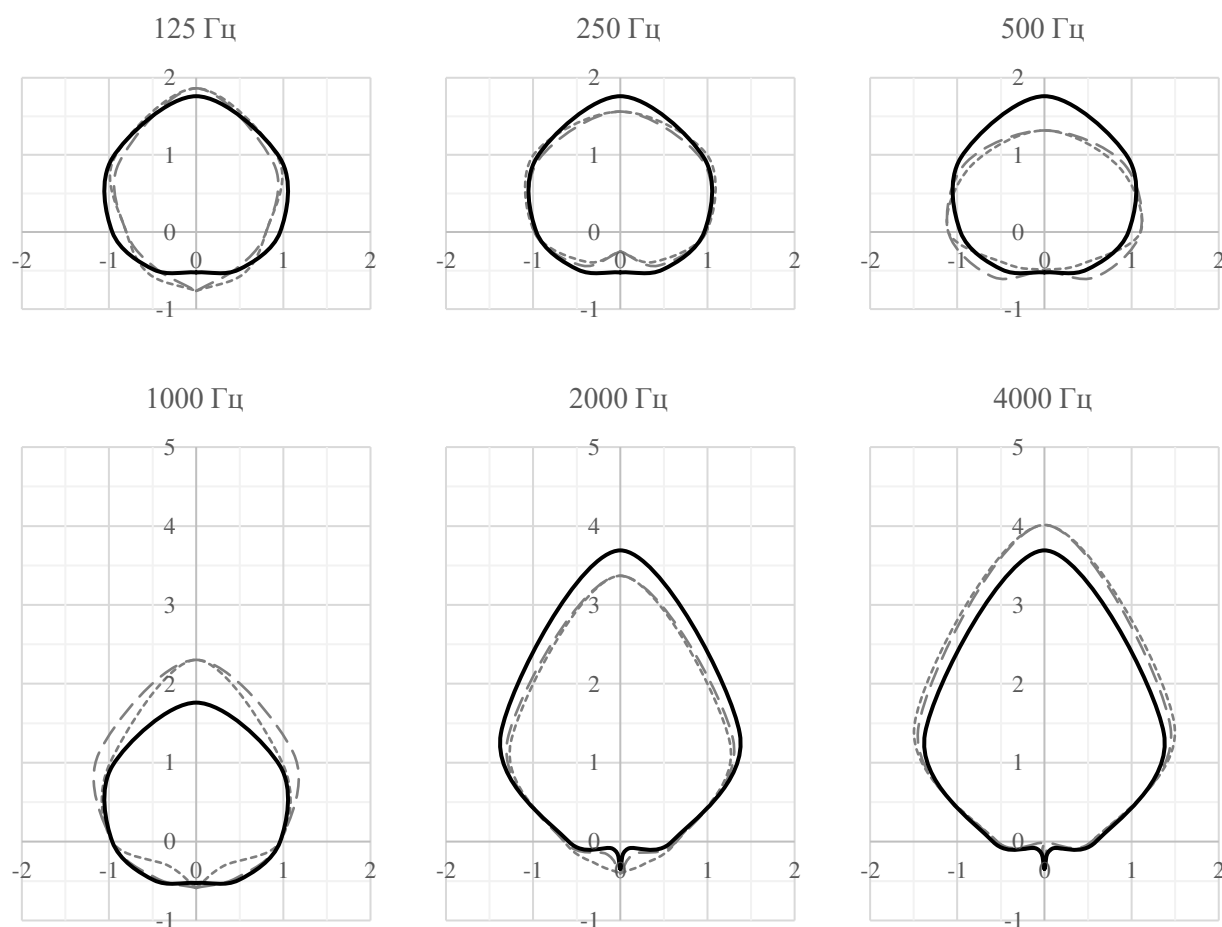


Рисунок 2.6 – Диаграммы фактора направленности мужской речи, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–4000 Гц: ----- – экспериментально полученный фактор направленности; — — — результат аппроксимации экспериментальных значений; ————— – результаты аппроксимации фактора направленности по форм. (2.34) – (2.39)

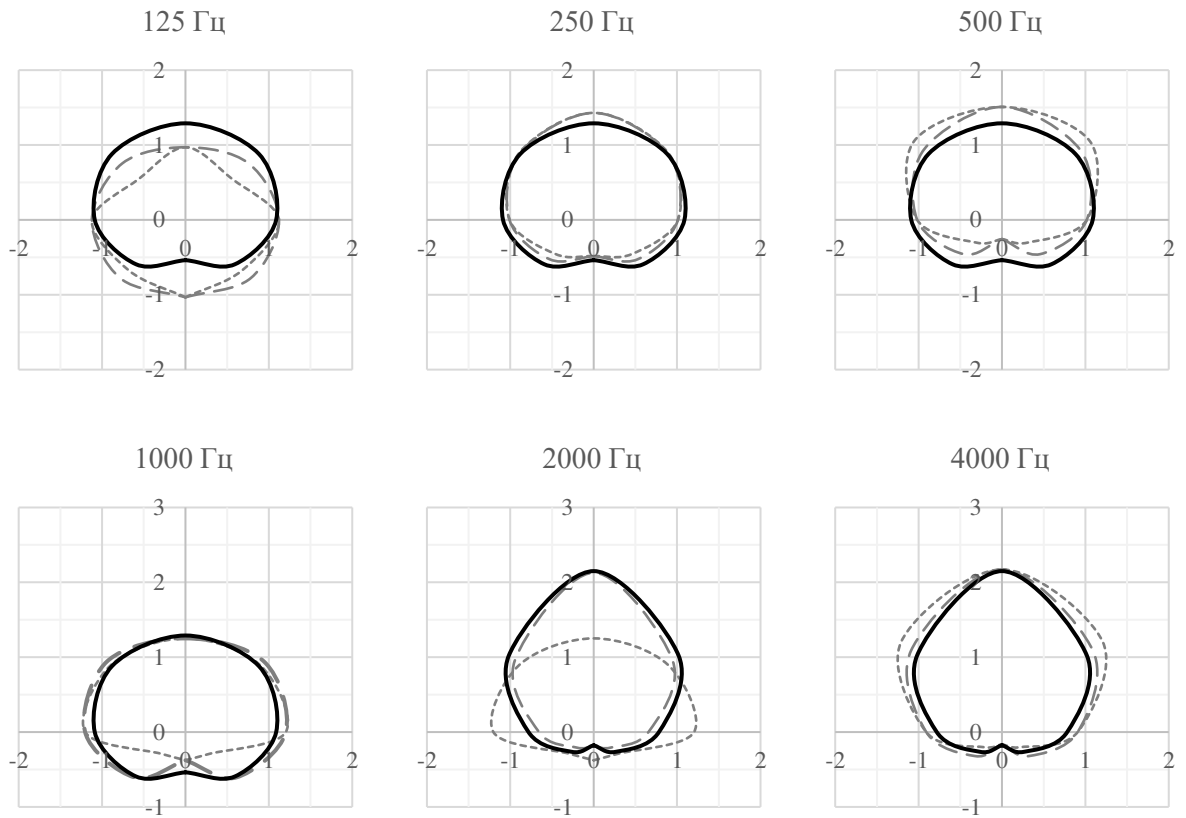


Рисунок 2.7 – Диаграммы фактора направленности женской речи, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–4000 Гц (условные обозначения см. рис. 2.6)

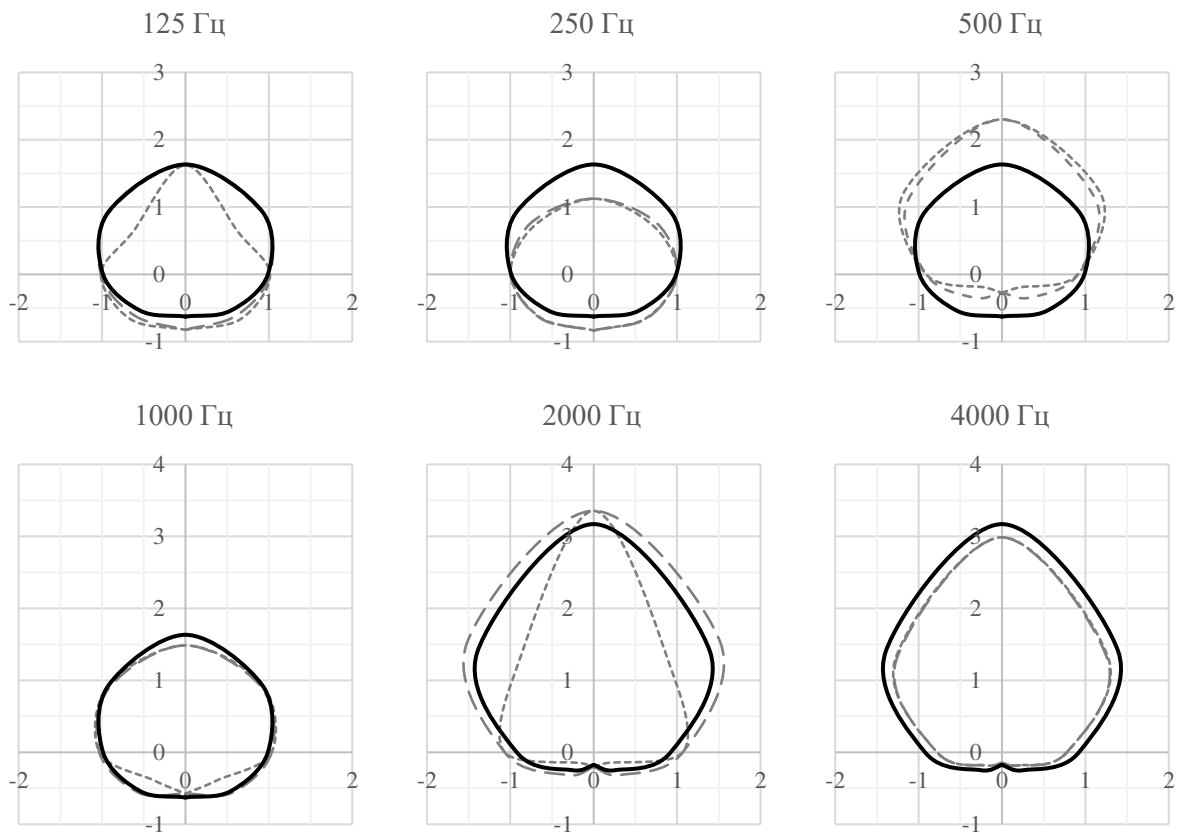


Рисунок 2.8 – Диаграммы фактора направленности детской речи, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–4000 Гц (условные обозначения см. рис. 2.6)

Таблица 2.20 – Акустическая мощность речи людей разного пола и возраста

Тип речи	Уровни акустической мощности речи L_w , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Женский, тип 1	38.0	65.6	66.7	58.2	52.2	49.2	42.7
Женский, тип 2	52.7	68.2	69.2	59.8	54.4	50.4	48.8
Мужской, тип 1	74.5	66.8	67.1	57.2	53.5	46.8	39.3
Мужской, тип 2	72.5	71.2	70.0	59.8	54.4	47.2	40.9
Детский, мальчик	33.3	65.0	67.3	65.0	56.5	50.7	48.4
Детский, девочка	29.9	65.8	63.3	61.8	53.1	50.0	47.8
Женский (средний)	45.4	66.9	68.0	59.0	53.3	49.8	45.8
Мужской (средний)	73.5	69.0	68.6	58.5	54.0	47.0	40.1
Детский (средний)	31.6	65.4	65.3	63.4	54.8	50.3	48.1

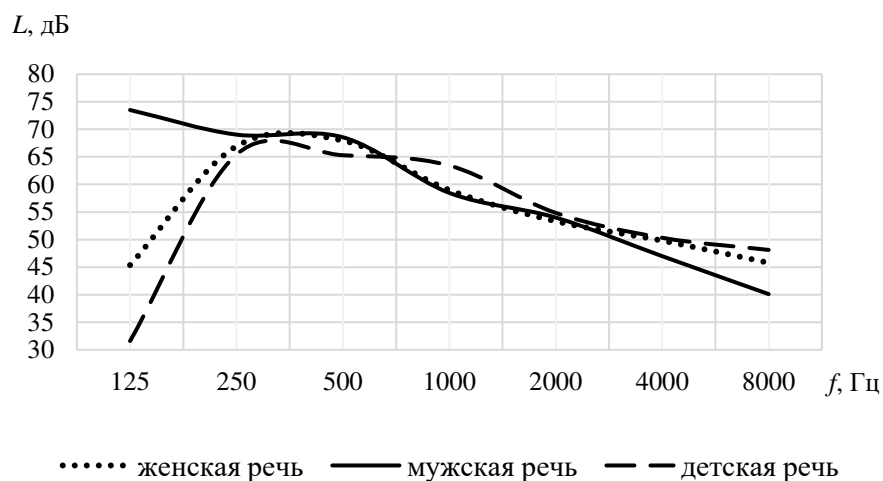


Рисунок 2.9 – Усредненные спектры акустической мощности мужской, женской и детской речи

Имея для мест массового пребывания людей сведения об их распределении по возрасту и полу, можно рассчитать энергетически усредненный спектр акустической мощности массы людей в i -ой частотной полосе по формуле

$$\bar{L}_i = \Delta L_\Gamma + 10 \lg(k_m 10^{0.1L_{w,m}} + k_{жс} 10^{0.1L_{w,жс}} + k_\partial 10^{0.1L_{w,\partial}}), \quad (2.40)$$

где $L_{w,m}$, $L_{w,жс}$, $L_{w,\partial}$ – уровни мужского, женского и детского голосов в определенной частотной полосе; ΔL_Γ – поправка на громкость речи ($\Delta L_\Gamma = -6$ дБ для тихой речи, $\Delta L_\Gamma = 0$ дБ для разговора средней громкости и $\Delta L_\Gamma = 6$ дБ для громкой речи); k_m , $k_{жс}$, k_∂ – коэффициенты, соответствующие долям мужчин, женщин и детей в местах массового пребывания людей, при этом $k_m + k_{жс} + k_\partial = 1$.

2.6 Результаты определения факторов направленности и акустической мощности речи, полученные при экспериментальных исследованиях в заглушенной камере и их последующей обработки

В соответствии с методикой, изложенной в п. 2.3, выполнены исследования речи для трех типов женского голоса и двух типов мужского голоса. Измерения производились на измерительной сфере радиусом 1 м. В приложении А приведены результаты полученных данных для мужской и женской речи. На основе полученных данных произведено определение факторов направленности и акустической мощности речи. Определение производилось в соответствии с методикой обработки данных, использованной в п. 2.5.

Для обобщенного выражения фактора направленности (2.30) определены входящие в него коэффициенты K_1 , K_2 , K_3 . Полученные результаты приведены в таблице 2.21.

Коэффициенты, как и ранее, усреднены по двум группам частот. Полученные средние коэффициенты даны в таблице 2.22.

Таблица 2.21 – Коэффициенты для определения фактора направленности по формуле (2.30)

Коэффициент	Коэффициенты для теоретического определения фактора направленности в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Женская речь						
K_1	0.693	0.668	0.358	0.410	0.222	0.094
K_2	0.392	0.760	0.984	0.793	1.835	1.662
K_3	0.377	-0.248	0.021	0.213	-0.905	-0.424
Мужская речь						
K_1	0.695	0.461	0.423	0.589	0.599	0.095
K_2	1.192	1.171	0.933	1.948	2.747	3.087
K_3	-0.756	-0.368	-0.011	-0.933	-1.725	-1.199

Таблица 2.22 – Усредненные по полосам частот коэффициенты для аналитического определения фактора направленности

Среднее значение коэффициента	Коэффициенты для теоретического определения фактора направленности в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц	
	125–1000	2000–4000
Коэффициенты для определения фактора направленности женской речи		
1	2	3
K_{1cp}	0.53	0.16
K_{2cp}	0.73	1.75

Окончание табл. 2.22

1	2	3
$K_{зср}$	0.09	-0.66
Коэффициенты для определения фактора направленности мужской речи		
$K_{1ср}$	0.54	0.35
$K_{2ср}$	1.31	2.92
$K_{зср}$	-0.52	-1.46

Согласно данным табл. 2.22 выражение (2.30) может быть записано:

1) для мужского голоса

- для полос частот с $f_{ср}$ 125–1000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.54 + 1.31\cos(\theta / 2) - 0.52\sin\theta ; \quad (2.41)$$

- для полос частот с $f_{ср}$ 2000–4000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.35 + 2.92\cos(\theta / 2) - 1.46\sin\theta ; \quad (2.42)$$

2) для женского голоса

- для полос частот с $f_{ср}$ 125–1000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.53 + 0.73\cos(\theta / 2) + 0.09\sin\theta ; \quad (2.43)$$

- для полос частот с $f_{ср}$ 2000–4000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.16 + 1.75\cos(\theta / 2) - 0.66\sin\theta . \quad (2.44)$$

Диаграммы фактора направленности мужской и женской речи, полученные экспериментально и по формулам (2.41) - (2.44), в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–4000 Гц приведены на рисунках 2.10 и 2.11.

Сведения об акустической мощности мужской и женской речи приведены в таблице 2.23, средние спектры мужской и женской речи даны на рисунке 2.12.

Таблица 2.23 – Акустическая мощность речи людей разного пола

Тип речи	Уровни акустической мощности речи L_w , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Женский, тип 1	51.9	64.3	64.9	51.8	48.9	48.7	45.0
Женский, тип 2	55.3	66.2	62.4	56.5	53.9	50.3	51.0
Женский, тип 3	37.6	61.0	64.6	54.0	50.1	46.3	42.0
Мужской, тип 1	64.5	66.0	67.3	53.5	51.7	46.2	43.3
Мужской, тип 2	65.9	65.9	70.6	55.6	54.7	51.5	50.1
Женский (средний)	48.3	63.8	63.9	54.1	51.0	48.4	46.0
Мужской (средний)	65.2	65.9	69.0	54.5	53.2	48.9	46.7

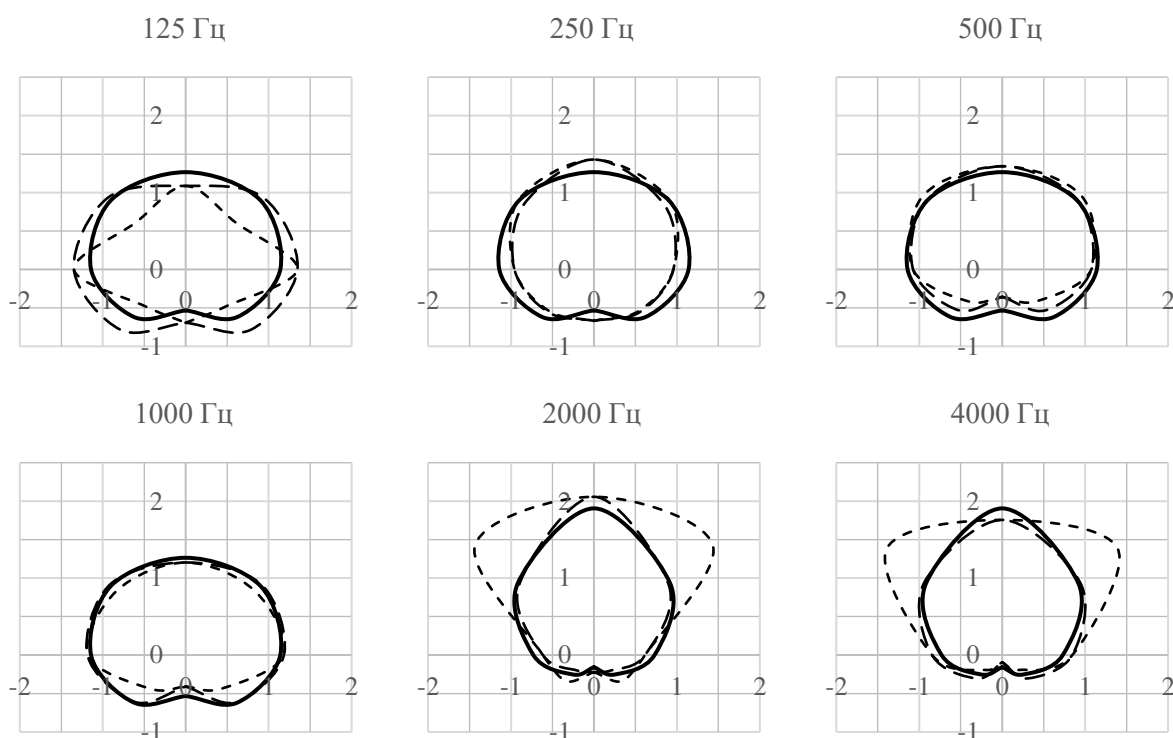


Рисунок 2.10 – Диаграммы фактора направленности женской речи, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–4000 Гц: ----- – экспериментально полученный фактор направленности; — — – результат аппроксимации экспериментальных значений; ——— – результаты аппроксимации фактора направленности по форм. (2.41) – (2.44)

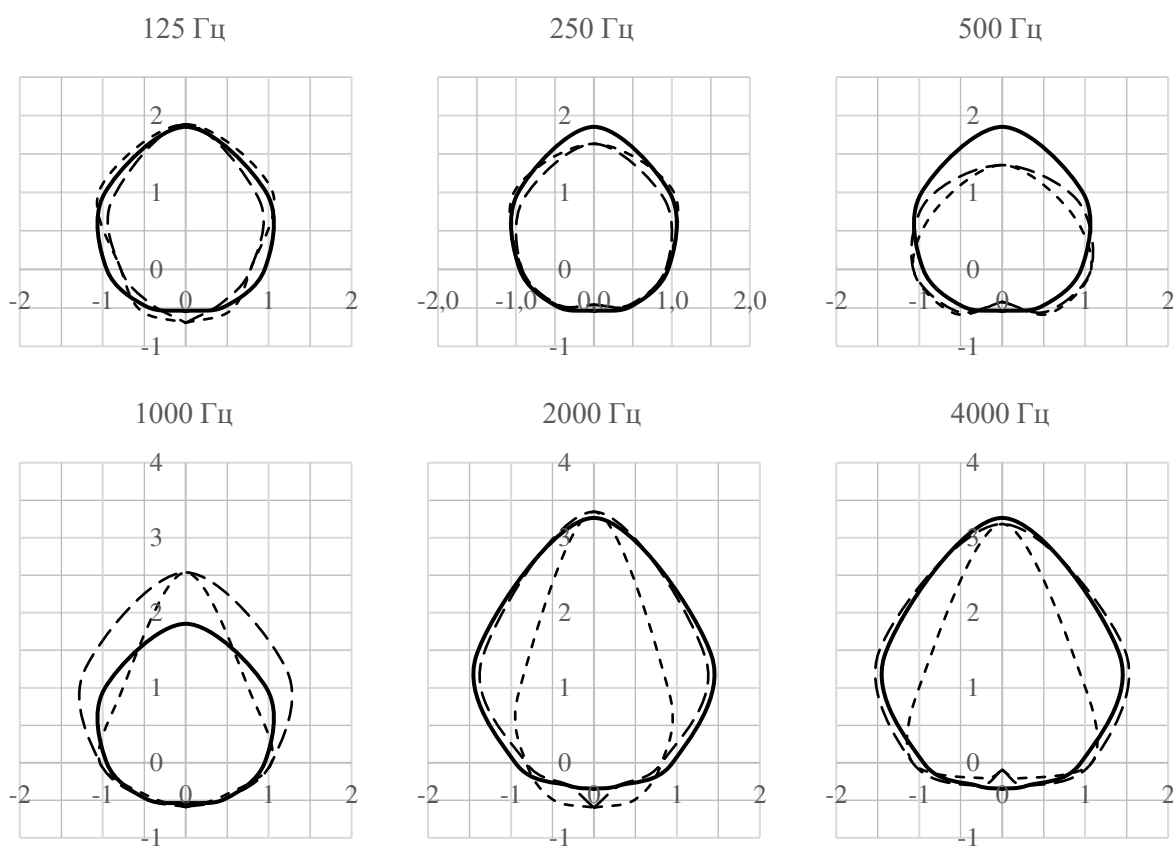


Рисунок 2.11 – Диаграммы фактора направленности мужской речи, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–4000 Гц (условные обозначения см. рис. 2.10)

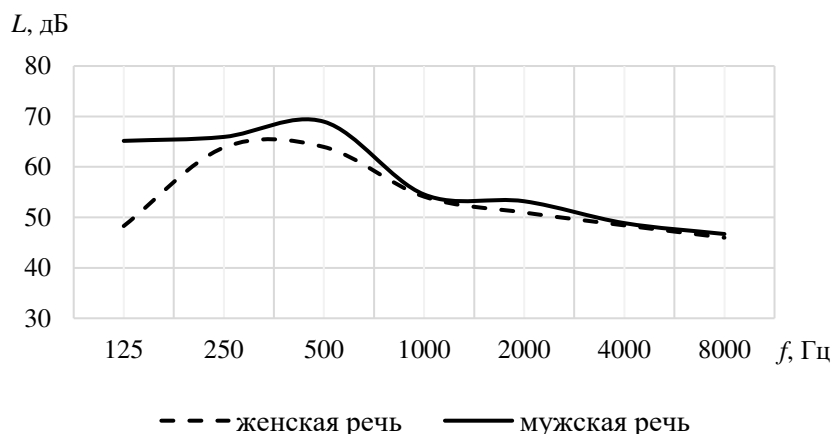


Рисунок 2.12 – Усредненные спектры акустической мощности мужской и женской речи

Ниже приведена таблица с усредненными коэффициентами по двум группам частот, полученными на основе экспериментальных исследований в помещениях и в заглушенной камере (см. табл. 2.24).

Таблица 2.24 – Усредненные по полосам частот коэффициенты для аналитического определения фактора направленности

Среднее значение коэффициента	Коэффициенты для теоретического определения фактора направленности в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц	
	125–1000	2000–4000
Коэффициенты для определения фактора направленности женской речи		
K_{1cp}	0.54	0.17
K_{2cp}	0.74	1.86
K_{3cp}	0.06	-0.73
Коэффициенты для определения фактора направленности мужской речи		
K_{1cp}	0.59	0.27
K_{2cp}	1.16	2.96
K_{3cp}	-0.44	-1.42

Согласно данным табл. 2.24 выражение (2.30) может быть записано:

1) для мужского голоса

- для полос частот с f_{cp} 125–1000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.59 + 1.16\cos(\theta / 2) - 0.44\sin\theta ; \quad (2.45)$$

- для полос частот с f_{cp} 2000–4000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.27 + 2.96\cos(\theta / 2) - 1.42\sin\theta ; \quad (2.46)$$

2) для женского голоса

- для полос частот с f_{cp} 125–1000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.54 + 0.74\cos(\theta / 2) + 0.06\sin\theta ; \quad (2.47)$$

- для полос частот с $f_{\text{ср}}$ 2000–4000 Гц

$$\Phi(\theta) = 0.17 + 1.86\cos(\theta / 2) - 0.73\sin\theta . \quad (2.48)$$

Диаграммы фактора направленности мужской и женской речи, полученные по формулам (2.45) - (2.48), в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–4000 Гц приведены на рисунке 2.13.

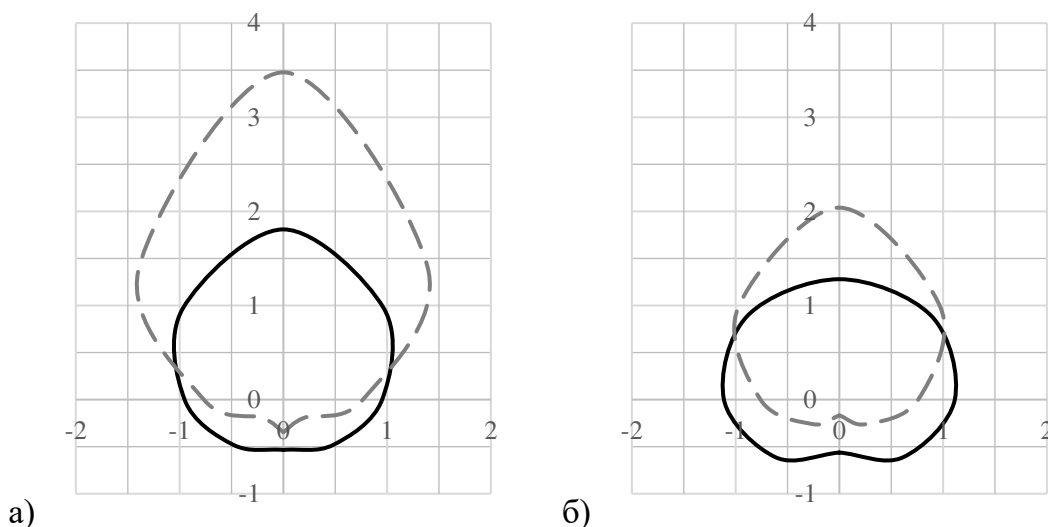


Рисунок 2.13 – Диаграммы фактора направленности мужской (а) и женской (б) речи в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–1000 Гц (сплошная линия) и 2000–4000 Гц (пунктирная линия)

Сравнение результатов исследований, представленных в табл. 2.20 и 2.23 и на рис. 2.9 и 2.12 свидетельствуют об удовлетворительном совпадении полученных данных. Имеющиеся расхождения связаны с тембром голосов, использованных при различных измерениях. Подобные расхождения наблюдаются также и при определении факторов направленности.

В то же время полученные в главе результаты свидетельствуют о возможности применения полученных в условиях реальных помещений данных об акустической мощности и факторах направленности речи людей разного пола и возраста при расчетах шума в местах массового скопления людей.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Выполненный анализ методов оценки шумового режима в местах с массовым скоплением людей показал, что в настоящее время отсутствуют сведения об энергетических параметрах речи говорящих людей, как источников шума.
2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований энергетических параметров голоса и их обработки с учетом специфики речи и особенности объектов, в которых выполнялись измерения. Непостоянный во времени характер речи и наличие отраженного звука в помещениях, где проводились измерения, учитывались с помощью соответствующих поправок к измеренным значениям.
3. Получены экспериментальные значения факторов направленности и акустической мощности женской, мужской и детской речи в октавных полосах частот. Произведена обработка экспериментальных данных с целью установления аналитических выражений для фактора направленности речи с учетом пола и возраста людей. Для практического использования полученных закономерностей выполнено усреднение величин фактора направленности в пределах частотных диапазонов до 1000 Гц и выше 1000 Гц.
4. Результаты исследований могут быть использованы при практических расчетах шума в местах массового скопления людей с учетом структуры людской массы по возрасту и полу.

ГЛАВА 3 МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ШУМА НА ОБЪЕКТАХ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ

Все объекты с массовым пребыванием людей делятся по отношению к окружающей их среде на сооружения открытого типа и здания и сооружения закрытого типа. К открытым сооружениям относятся стадионы, открытые хоккейные и другие спортивные площадки, площадки школьных и детских садов, места для проведения общегородских мероприятий с большим количеством людей и др. Звуковая энергия, излучаемая людьми, находящимися на этих объектах, распространяется от них на значительные расстояния и создает на территории застройки повышенные уровни шума. Шум людей, находящихся на трибунах стадионов и на других объектах с системами речевого оповещения, создает повышенный шумовой фон, ухудшающий восприятие информации. По этим причинам необходимо производить расчеты прямого звука, создаваемого людьми как источниками шума с определенными характеристиками излучаемой звуковой энергии. Для этого необходимо иметь методы расчета прямого звука, учитывающие акустическую мощность и характер излучения звуковой энергии людьми как отдельными одиночными источниками и как распределенными по плоскости источниками, состоящими из набора одиночных источников.

К закрытым относятся здания учебного, торгового, спортивного и зрелищного назначения, вокзалы, пешеходные переходы и т. п. В их помещениях из-за разговоров людей возникают повышенные уровни шума. В помещениях при разговорах кроме прямого звука образуется и отраженный шум. Возникающая при этом суммарная звуковая энергия вызывает ухудшение разборчивости речи и, как следствие, ведет к повышению громкости речи и, соответственно, к дальнейшему ухудшению шумового режима в помещениях. Ухудшение шумового режима особенно неблагоприятно в помещениях, оборудованных информационными системами речевого оповещения. Надежное восприятие речевой информации зависит от ее разборчивости. Разборчивость во многом определяется отношением уровней звукового давления, создаваемых системами оповещения, и, уровней фонового шума, создаваемых разговаривающими людьми. Количество и расположение оповещателей в системе зависит от размеров помещения, от количества находящихся в них посетителей, от акустических характеристик помещения, определяющих его

гулкость, от уровня фонового шума и от других условий, влияющих на процессы формирования шумового режима в помещениях [103, 104, 105]. Поэтому для создания благоприятных акустических условий в таких помещениях и для ограничения негативного воздействия шума на организм человека требуется выполнение расчетов энергетических параметров шума, возникающего в помещениях от разговаривающих людей как от источников шума, имеющих свои характерные особенности. Ниже в главе рассматриваются разработанные методы расчета прямого и отраженного шума, возникающего в помещениях с большим количеством людей, и шума в городской застройке от открытых сооружений с массовым пребыванием в них людей.

3.1 Методы расчета прямого звука на объектах с массовым пребыванием людей

Для расчета прямого звука необходимо иметь данные о разговаривающих людях как источниках шума. Такие данные для людей различного пола и возраста определены во второй главе работы. Кроме того, при разработке методов расчета прямого звука необходимо учитывать особенности источников шума в виде людей, находящихся в местах их скопления. Их положение, ориентация и направленность речи являются неизвестными вероятностными величинами. Случайными являются также продолжительность речи говорящего и количество одновременно разговаривающих. Таким образом, люди, как источники шума, в местах их массового скопления имеют ряд случайных характеристик, требующих в каждом случае своего определения.

При наличии сведений об акустической мощности людей как источников шума в случае учета случайности перечисленных выше факторов расчеты излучаемого прямого звука можно производить методами, основанными на двух разных подходах.

При первом подходе люди в местах их массового пребывания рассматриваются как случайным образом размещенные дискретные источники шума. В этом случае шум можно рассчитывать по отдельности от каждого источника с последующим сложением и усреднением звуковой энергии с учетом вероятности положения и ориентации каждого источника шума. Расчет можно выполнять путем компьютерного моделирования. С увеличением количества источников звука трудоемкость реализации такого подхода к расчету возрастает. В этом случае можно использовать второй подход, когда дискретная

модель, состоящая из большого количества источников, заменяется на сплошную, излучающую звук среду с определенными свойствами и характеристиками [26]. Ниже рассмотрены методы расчета прямого звука от скоплений разговаривающих людей, основанные на указанных выше подходах.

3.1.1 Компьютерное моделирование прямого звука от скопления разговаривающих людей как от точечных источников

В местах массового пребывания людей при относительно небольшом количестве источников шума в виде разговаривающих посетителей, как правило, менее 1000 человек, возможно применять метод компьютерного моделирования акустического процесса для непосредственного расчета прямого шума без перехода к однородной излучающей среде.

Суть метода заключается в следующем. Пусть N_0 людей занимают некоторую область какого-либо пространства. Все N_0 посетителей расставляются по этой области пространства случайным образом M_0 раз пропорционально распределению плотности людей в каждом рассматриваемом случае. Угол между направлением речи и направлением на расчетную точку, в которой определяется уровень звукового давления, также устанавливается случайно [106, 107].

Часть посетителей с коэффициентом одновременности речи $K_{od} < 1$ разговаривает с уровнем излучаемой акустической мощности, равным L_{WP} . В реальных условиях коэффициент одновременности речи K_{od} зависит от назначения объекта (см. п. 2.1). Для говорящего человека принимается $K_0 = 1$ при $RND < K_{od}$, в ином случае $K_0 = 0$. При этом используется функция (генератор) случайных чисел RND с равномерным распределением вероятности событий в диапазоне $\{0...1\}$. Таким образом, коэффициент K_0 учитывает прерывистый во времени характер речи.

Уровни звукового давления в расчетной точке рассчитываются в результате компьютерного моделирования с последующим усреднением на основе выражения

$$L_{np} = L_{WP} + 10 \lg \left[\frac{1}{M_0} \sum_{M_0} \sum_{i=1}^{N_0} \frac{K_0 \Phi_{(\theta)}}{4\pi r_i^2} \right], \quad (3.1)$$

где $\Phi_{(\theta)}$ – фактор направленности речи; r_i – расстояние от разговаривающего человека до расчетной точки.

Следует отметить, что при расчете уровней прямого звука в программе не

учитывается вклад источников шума, находящихся ближе 1 м от расчетной точки.

Для получения достоверной статистической обоснованности расчета количество расстановок или фиксации речи людей M_0 должно быть достаточным. Установлено, что уже при $M_0 = 100$ рассчитанные уровни звукового давления мало отличаются от средних значений. Выполненные нами расчеты показали, что снижение количества вариантов с $M_0 = 1000$ до $M_0 = 100$ приводит к погрешности не более $\Delta L = \pm 0.2$ дБ [106, 107].

Метод компьютерного моделирования имеет не только самостоятельное практическое применение для расчета прямого звука от распределенных источников шума, но также может быть использован и для оценки точности других более упрощенных расчетных методов.

Для расчетов прямого звука рассмотренным методом разработана компьютерная программа (см. п. 3.3).

3.1.2 Расчет прямого звука от разговаривающих людей, как от равномерно излучающей звуковую энергию плоскости

Недостатком метода компьютерного моделирования является значительная трудоемкость расчетов при скоплении в одном месте более 1000 человек. В этом случае для расчетов прямого звука в работе предложен метод расчета прямого звука от большого количества людей как от однотипных стохастических источников шума [109].

При таком подходе использован принцип замены локальных точечных источников шума (людей) на плоский источник с соответствующими энергетическими характеристиками по акустической мощности и направленности излучения [106].

Наиболее подробно данный подход к оценке излучения звуковой энергии скоплением людей и реализующий его метод рассмотрены в статье [108]. Удельная акустическая мощность источника в виде разговаривающих людей, приходящаяся на единицу излучающей плоскости, согласно [109], определяется выражением

$$W'' = \frac{W_0 N K_{od} \cdot 10^{0.1 L_{wp}}}{S_0}, \quad (3.2)$$

где $W_0 = 10^{-12}$ Вт – пороговое значение акустической мощности; S_0 – площадь, занятая N -м количеством посетителей; K_{od} – коэффициент, определяющий одновременность речи N посетителей, находящихся в пределах плоскости с площадью S_0 ; L_{wp} – уровень

акустической мощности одного разговаривающего человека.

Величина L_{WP} зависит от частоты акустической энергии и уровня звукового давления, создаваемого речью человека. Уровни в свою очередь зависят от пола и возраста людей и степени их возбуждения во время разговоров. Подробно эти зависимости рассмотрены в главе 2.

Для плоского источника с удельной акустической мощностью W'' плотность прямой звуковой энергии в расчетной точке согласно [27] определяется выражением

$$\varepsilon_{np} = \int_{S_0} \frac{W'' \Phi}{\Omega \cdot r^2 c} dS, \quad (3.3)$$

где r – расстояние от элемента dS плоскости S_0 до расчетной точки; c – скорость звука в воздушной среде; Ω – пространственный угол излучения звуковой энергии плоскостью S_0 ; Φ – фактор направленности речи.

Пространственный угол излучения в пределах плоскости для каждого отдельного источника можно принять равным $\Omega = 4\pi$. Тогда выражение (3.3) будет иметь вид

$$\varepsilon_{np} = \frac{W''}{4\pi c} \int_{S_0} \frac{\Phi}{r^2} dS. \quad (3.4)$$

Величина фактора направленности речи Φ зависит от многих условий. Результаты подробного исследования его зависимости от разных условий приведены в главе 2. В случае помещений с массовым пребыванием людей, когда говорящие люди имеют случайную ориентацию в плоскости их нахождения (например, перемещение детей в рекреационных помещениях школы), величину Φ с достаточной точностью можно принимать равные $\Phi = 1$.

Величина уровня прямого звука в этом случае будет определяться в соответствии с выражением

$$L_{np} = L_{WP} + 10 \lg \left(\frac{NK_{od}}{S_0} \right) + 10 \lg \left(\int_{S_0} \frac{1}{\Omega \cdot r^2} dS \right). \quad (3.5)$$

Расчет величины ε_{np} по выражению (3.4) при $\Phi = 1$ производится численным методом. При расчете вся изучающая звук плоскость S_0 делится на M одинаковых элементов. Излучение энергии от каждого такого элемента рассчитывается как от точечных источников звука. Полученные значения от каждого источника суммируются в расчетных точках.

Решение задачи выполняется с использованием компьютерной программы. Величина плотности звуковой энергии определяется на основе суммирования ряда

$$\varepsilon_{np} = \sum_{m=1}^M \frac{NK_{od}W_0 10^{0.1L_{WP}}}{4\pi r_m^2 cM}, \quad (3.6)$$

где r_m – расстояние от центра m -го элемента до расчетной точки.

В случае рассмотрения каждого элемента m в качестве точечного источника звука уровень звукового давления вычисляется по формуле

$$L_{np} = L_{WP} + 10\lg\left(\frac{NK_{od}}{4\pi M}\right) + 10\lg\left(\sum_{m=1}^M \frac{1}{r_m^2}\right). \quad (3.7)$$

Предложенный метод расчета рассмотрен нами в работах [107, 108, 109].

Следует отметить, что для некоторых частных случаев представления стохастических источников в виде излучающей звуковую энергию поверхности при расчетах прямого звука можно использовать аналитические выражения, предложенные в работах [40, 41].

3.1.3 Сравнение точности методов расчета прямого звука, основанных на компьютерном моделировании и на представлениях об излучающей звуковую энергию плоскости

Метод, в основе которого лежит представление о возможной замене каждого отдельного источника шума в месте массового скопления людей равномерно излучающей звуковую энергию плоскостью, может иметь определенные погрешности. В работе [109] нами произведен сравнительный анализ результатов расчета прямого звука, полученных двумя рассмотренными выше методами.

Сравнительный расчет произведен для типичного помещения, характерного для железнодорожных вокзалов, размерами 12 x 12 x 3(h) м, в котором одновременно находятся 36 человек. Учитывая, что коэффициент одновременности разговора $K_{од} = 0.5$ (см. главу 2), одновременно общаются между собой $N = 18$ человек. Речь средней громкости с линейным по энергии уровнем $L_s = 70$ дБ. Согласно [95] на частоте $f = 500$ Гц $L_p = 66$ дБ. Тогда согласно [106] можно принять, что мощность речи равна $L_{WP} = L_p + 9.5 = 66.0 + 9.5 = 75.5$ дБ. Схема помещения с указанием расчетных точек дана на рисунке 3.1. Результаты расчета уровней прямого звука двумя методами показаны на рисунке 3.2.

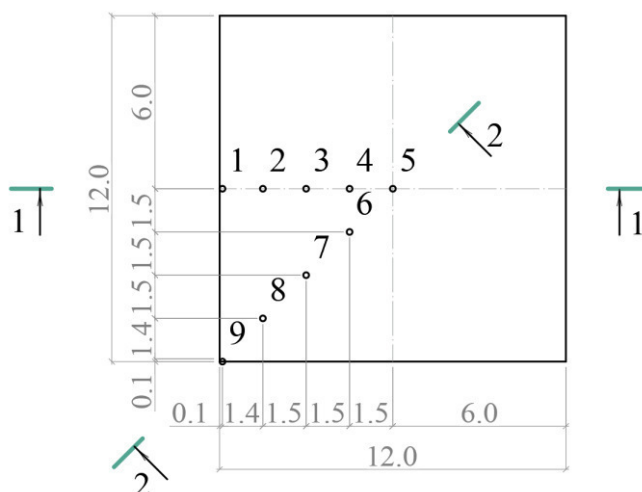


Рисунок 3.1 – Расчетная схема помещения с положением расчетных точек (1÷9 – номера расчетных точек)

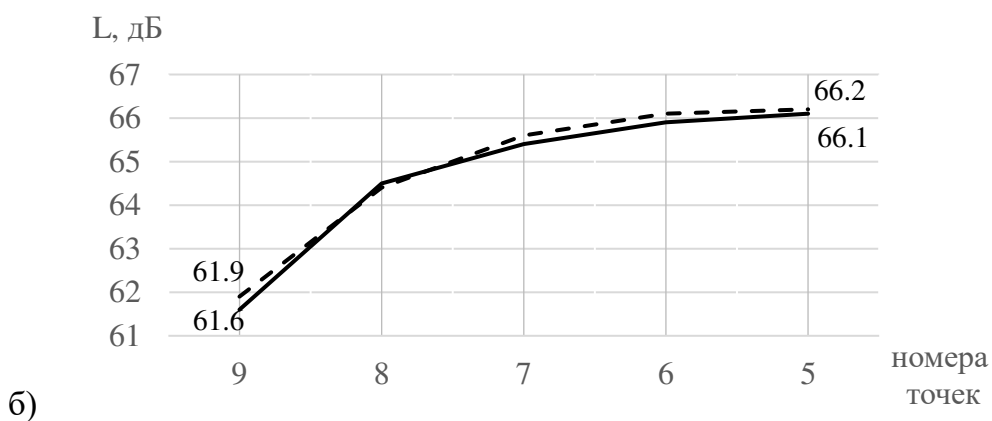
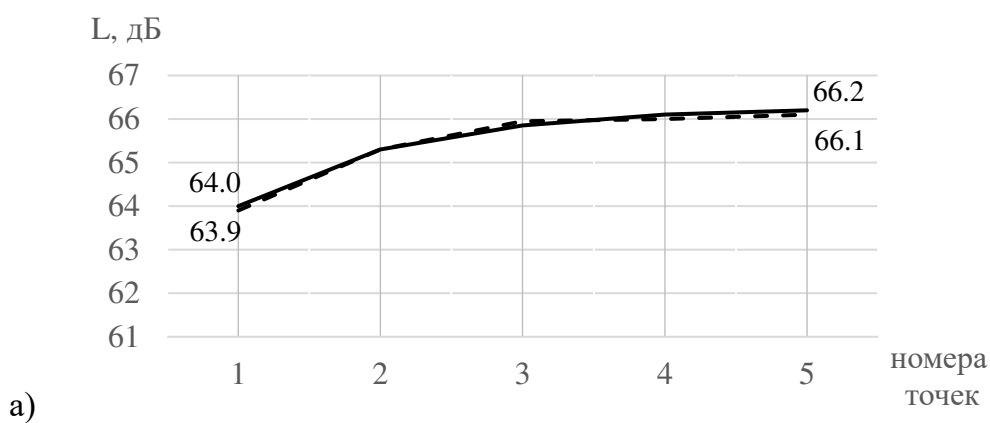


Рисунок 3.2 – Графики рассчитанных уровней давления прямого звука: сплошная линия – численный метод; пунктирная линия – метод прямого компьютерного моделирования
а) сечение 1-1; б) сечение 2-2 (положение сечений 1 и 2 показано на рис. 3.1)

Максимальная разница уровней прямого звука в расчетных точках помещения, полученных данными методами, составляет 0.3 дБ, что говорит о достаточной точности предложенного численного метода расчета.

3.2 Методики расчета шума в помещениях с распределенными источниками звука в виде разговаривающих людей

Как показано ранее, в помещениях с массовым пребыванием людей образуются два звуковых поля: поле прямого звука и отраженное поле, возникающее за счет отражений прямого звука от ограждений. Два этих поля взаимосвязаны между собой. Поэтому при расчетах суммарного уровня звукового давления вначале определяется энергетические характеристики прямого звука, а затем на их основе вычисляются энергетические параметры отраженного звука. Определение энергии прямого звука может производиться методами, предложенными в п. 3.1. При этом для расчета прямого звука в помещениях при большом скоплении разговаривающих людей во многих случаях наиболее приемлем метод, рассмотренный в п. 3.1.2.

Выбор методов расчета отраженного шума в помещениях во многом зависит от характера отражения звука от ограждений [33]. Виды моделей отражения звука приведены на рис. 1.4. При расчетах могут быть приняты зеркальная, диффузная и зеркально-диффузная модели отражения. Принятый характер отражения определяет выбор метода расчета шума в помещении.

При зеркальном отражении используются расчетные модели, основанные на геометрической теории акустики. В этом случае при расчетах используются методы мнимых источников и прослеживания лучей. При диффузном отражении применяются методы, основанные на классической теории диффузного поля и на статистическом энергетическом подходе к оценке отраженных звуковых полей. В случае зеркально-диффузного отражения при расчетах используются комбинированные расчетные модели [36].

Ниже предложены методики расчета шума в помещениях с массовым пребыванием людей, основанные на указанных выше расчетных моделях.

3.2.1 Расчет шума в помещении на основе метода мнимых источников

В помещениях правильной прямоугольной формы в случае зеркального отражения звука для расчета отраженного от ограждений звука удобно использовать метод мнимых источников. Следует отметить, что при его применении расчет прямого отраженного звука может выполняться в рамках одной расчетной модели. Это связано с тем, что в

правильных по форме прямоугольных помещениях прямой и отраженный звук имеют одинаковую упорядоченную структуру [36]. Ниже рассмотрена методика использования метода мнимых источников при определении плотности отраженной к суммарной звуковой энергии применительно к оценке шума в помещениях с массовым пребыванием разговаривающих людей.

В работе [110] Л. Д. Розенбергом было представлено решение для расчета прямого звука от равномерно распределенных излучателей. Решение может быть использовано и для расчета прямого и отраженного звука от равномерно распределенных в месте скопления разговаривающих людей.

В соответствии с предложениями Л. Д. Розенберга расчет прямого звука от разговаривающих людей производится как от плоскости круговой формы. Величина плотности прямой звуковой энергии в расчетной точке в этом случае будет определяться выражением

$$\varepsilon_{np} = \frac{w''}{4c} \ln \frac{R^2 + h^2 - r^2 + \sqrt{(R^2 + h^2 - r^2)^2 + 4r^2 h^2}}{h^2 - r^2 + \sqrt{(h^2 - r^2)^2 + 4r^2 h^2}}. \quad (3.8)$$

Обозначения переменных, входящих в формулу (3.8), приведены на рисунке 3.3.

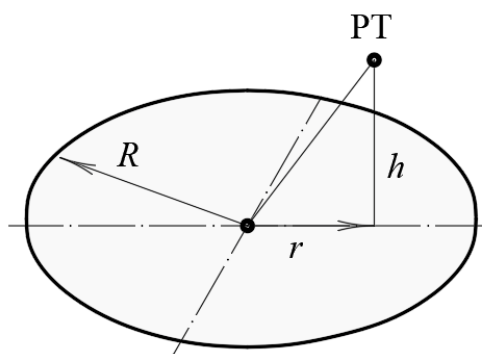


Рисунок 3.3 – Схема к расчету прямого звука от плоского источника шума круговой формы

В работе [110] приводятся более сложные формулы для расчета прямого звука от круглых источников при произвольном положении расчетной точки.

По выражению (3.8) определяется плотность прямой звуковой энергии от кругового источника. При других формах плоских источников их также можно аппроксимировать источниками круговой формы. При этом эквивалентный радиус $R_{экв}$ будет определяться по формуле

$$R_{\text{экв}} = \sqrt{S / \pi}, \quad (3.9)$$

где S – площадь аппроксимируемой плоскости.

Для помещения, рассмотренного в пункте 3.1.3, произведен расчет прямого звука с использованием выражения (3.8) при тех же условиях, которые приняты ранее. Эквивалентный радиус в этом случае согласно с (3.9) составил величину

$$R_{\text{экв}} = \sqrt{12 \cdot 12 / 3.14} = 6.77 \text{ м.}$$

Результаты расчета приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Уровни прямого звука в помещении, рассчитанные с использованием выражения (3.8) в расчетных точках 1-9 (см. рис. 3.1)

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровень звукового давления, дБ	64.3	65.6	66.1	66.2	66.3	66.2	65.7	64.1	60.5

Расчеты выполнены при высоте $h = 1$ м.

В таблице 3.2 для сравнения приведены результаты расчетов с использованием формулы (3.8) и методами, рассмотренными в п. 3.1.1 и п. 3.1.2. Видно, что результаты расчетов по формуле (3.8) имеют наибольшую погрешность по сравнению с результатами компьютерного моделирования в точке N 9. Расхождение составляет 1.1 дБ. Погрешность связана с аппроксимацией квадратной плоскости помещения круговой плоскостью.

Таблица 3.2 – Сравнительная таблица расчетов прямого звука различными методами

Номера расчетных точек	Уровни звукового давления, дБ		
	компьютерное моделирование	численный метод	расчеты по выражению (3.8)
1	63.8	64.0	64.3
2	65.3	65.3	65.6
3	66.0	66.0	66.1
4	66.2	66.2	66.2
5	66.2	66.2	66.3
6	66.1	66.1	66.2
7	65.7	65.7	65.7
8	64.5	64.4	64.1
9	61.6	61.9	60.5

В такой постановке метод может быть использован для расчета отраженной и суммарной плотности звуковой энергии. В этом случае в качестве мнимых источников

следует рассматривать поверхности, в пределах которых находятся равномерно распределенные посетители, рассматриваемые как источники шума. Расчет энергии от каждой действительной и мнимой поверхностей можно производить на основе выражения (3.8)

$$\varepsilon_t = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{w''(1-\alpha)^{(i+j+k)}}{4c} \ln \frac{R^2 + h^2 - r^2 + \sqrt{(R^2 + h^2 - r^2)^2 + 4r^2 h^2}}{h^2 - r^2 + \sqrt{(h^2 - r^2)^2 + 4r^2 h^2}}, \quad (3.10)$$

где i, j, k – номера мнимых источников в направлении осей координат x, y, z .

Для упрощения записи в выражении (3.10) коэффициенты звукопоглощения всех поверхностей приняты одинаковыми, а излучающей поверхностью является один круговой элемент радиусом R .

В выражении (3.10) приняты следующие обозначения: h – разность координат Z мнимого источника и расчетной точки; $r = \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_j)^2}$ – расстояние в плане от расчетной точки с координатами (x_t, y_t) до центра мнимого источника с координатами (x_i, y_j) ; w'' – удельная акустическая мощность плоского источника, определяемая в соответствии с формулой (3.2).

Координаты мнимых источников определяются по правилам аналитической геометрии для зеркального характера отражения звука от ограждений.

Преимуществом метода мнимых источников является неразрывный характер звукового поля и отсутствие ошибок расчета за счет лучевого представления процесса формирования отраженного звукового поля в методе прослеживания лучей.

Метод в рассмотренной выше постановке может использоваться только в помещениях правильной геометрической формы и при равномерном распределении источников по всей излучающей плоскости.

Для расчета отраженной и суммарной плотности звуковой энергии, излучаемой людьми как плоскостью, можно принять несколько другой подход. В этом случае плоский источник шума, каким являются разговаривающие люди в местах их массового скопления, заменяется на систему точечных источников звука. Для этого, как в п. 3.1.2, весь плоский источник делится на M одинаковых элементов. Излучение энергии от каждого такого элемента принимается как от точечного источника. Для уменьшения ошибок дискретизации количество точечных источников должно быть достаточно большим.

Расчет плотности звуковой энергии производится следующим образом.

Определяется акустическая мощность каждого условного точечного источника

звука

$$W_{ycl} = \frac{W_0 N K_{od} 10^{0.1 L_{wp}}}{M}, \quad (3.11)$$

где M – количество точечных источников звука, на которые разбивается плоский источник шума.

Для каждого m -го точечного источника в i -ой расчетной точке определяется плотность прямой и отраженной энергии. Расчет производится методом мнимых источников в постановке, предложенной в [27].

В этом случае для расчета используется выражение

$$\varepsilon_i = \frac{W_{ycl}}{4\pi c} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{\prod_{j=1}^6 (1 - \alpha_j)^{k_j} \cdot \exp(-m_a r_{mnq})}{r_{mnq}^2}, \quad (3.12)$$

где W_{ycl} – звуковая мощность точечного источника; α_j – коэффициент звукопоглощения j -ой поверхности; k_j – число отражений звука от j -ой поверхности; r_{mnq} – расстояние от действительного (при $m = 0, n = 0, q = 0$) источника и мнимых источников (при $m \neq 0, n \neq 0, q \neq 0$) $|m| + |n| + |q|$ порядков до i -ой расчетной точки; m_a – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе.

Как видно, выражение (3.12) позволяет определить отдельно плотность прямого звука (при $m = 0, n = 0, q = 0$) и плотность отраженной энергии (при $m \neq 0, n \neq 0, q \neq 0$), а также суммарную плотность прямой и отраженной энергии.

Плотность звуковой энергии в расчетной точке от всех M точечных источников определяется суммой плотности полученных от отдельных источников

$$\varepsilon_{сум,i} = \sum_{m=1}^M \varepsilon_i \quad (3.13)$$

и, соответственно, уровень звукового давления будет определяться по формуле

$$L_{сум,i} = 10 \lg(c \varepsilon_{сум,i} / I_0), \quad (3.14)$$

где $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² – интенсивность звука на пороге слышимости.

Достоинством такого решения по сравнению с предыдущим случаем является возможность решения задачи при размещении плоскости излучения на части помещения, а также при нахождении в помещении плоскости излучения с разными по мощности излучения участками. Как и в предыдущем случае, метод может использоваться в помещениях только правильной геометрической формы.

3.2.2 Расчет шума методом прослеживания лучей

В помещениях сложной формы расчет шума удобнее производить методом прослеживания лучей [111]. В этом случае плоский источник шума сложной формы, каким являются посетители в местах массового пребывания людей, заменяется на систему точечных источников звука.

Как и ранее в п. 3.2.1, мощность каждого отдельного точечного источника определяется по выражению (3.11).

Отличием метода прослеживания лучей от метода мнимых источников является то, что расчет плотности прямого и отраженного звука выполняется раздельно.

При выполнении расчетов методом прослеживания лучей принимается, что каждый m -й точечный источник излучает N лучей в соответствии с диаграммой излучения энергии источником. В данном случае принимается, что источник излучает энергию равномерно в сферу.

Плотность энергии прямого звука, создаваемого k -ом лучом, приходящим в i -ю расчетную точку помещения, определяется по формуле

$$\varepsilon_{ki}^{np} = \frac{W_{ysl}}{cNS_{np}} \exp(-m_a r_{knp i}). \quad (3.15)$$

Плотность зеркально отраженной звуковой энергии, приносимой k -м лучом в i -ю расчетную точку помещения, определяется по формуле

$$\varepsilon_{ki}^z = \frac{W_{ysl}}{cNS_{np}} \exp(-m_a r_{kzi}) \prod_{p=1}^P (1 - \alpha_p)^{D_p}. \quad (3.16)$$

В формулах (3.15) и (3.16) приняты следующие обозначения: W_{ysl} – акустическая мощность m -го точечного источника звука, определяемая по формуле (3.11); D_p – количество актов падения луча на p -ю поверхность в процессе распространения его на расстояние r_{kzi} до i -й расчетной точки; N – количество лучей, исходящих от источника; $r_{knp i}$ – расстояние, прошедшее k -м прямым лучом от источника до i -й расчетной точки; r_{kzi} – расстояние, прошедшее k -м зеркально отраженным лучом от источника до i -й расчетной точки; α_p – коэффициент звукопоглощения p -ой поверхности ограждения, на которую падал прослеживаемый луч; S_{np} – площадь поперечного сечения приемника звуковой энергии, который может приниматься в виде сферы с центром в расчетной точке.

Суммарная плотность звуковой энергии в i -й расчетной точке помещения от m -го

точечного источника в этом случае будет находиться по формуле

$$\varepsilon_i^{сум} = \frac{W_{усл}}{cNS_{np}} \left\{ \sum_{k=1}^{K_{np}} \exp(-m_a r_{knp i}) + \sum_{k=1}^{K_z} \left[\exp(-m_a r_{kzi}) \prod_{p=1}^P (1 - \alpha_p)^{D_p} \right] \right\}, \quad (3.17)$$

где K_{np} – количество прямых лучей, приходящих в расчетную точку от m -го точечного источника; K_z – количество зеркально отраженных лучей, приходящих в расчетную точку от m -го точечного источника.

Плотность звуковой энергии в i -й расчетной точке от всех M точечных источников определяется по формуле

$$\varepsilon_{сум i} = \sum_{m=1}^M \varepsilon_i^{сум}. \quad (3.18)$$

Расчет уровня звукового давления производится по формуле (3.14).

Расчет методом прослеживания лучей позволяет определять суммарную плотность звуковой энергии, а также вычислять в каждой точке помещения прямую и отраженную составляющие суммарной плотности. Это дает возможность производить оценку разборчивости речи говорящих людей методом реверберационных помех [22].

Так как методика расчетов плотности звуковой энергии методами мнимых источников и прослеживания лучей требуют достаточно трудоемких расчетов, разработаны компьютерные программы для их реализации.

Ниже приведен пример расчета уровней звукового давления с использованием компьютерной программы, реализующей метод прослеживания лучей.

Расчет выполнен для ранее рассмотренного помещения размерами 12 x 12 x 3(h) м, в котором находится 36 человек, 18 человек из которых общаются между собой. Коэффициент звукопоглощения был принят для стен $\alpha = 0.1$, пола $\alpha = 0.15$, потолка $\alpha = 0.5$. Средний коэффициент звукопоглощения ограждений равен $\alpha = 0.25$.

При расчете равномерно распределенные источники шума были заменены на 70 точечных источников шума с равномерной по пространству диаграммой излучения. Каждый точечный источник излучал 500 лучей, которые прослеживались до уменьшения их энергии в 10^6 раз.

Полученная при расчетах карта уровней звукового давления дана на рисунке 3.4. На карте видны локальные провалы и увеличения уровней звукового давления. Неравномерности связаны с дискретностью принятой модели метода прослеживания лучей. В то же время звуковое поле можно считать равномерным. Уровни звукового давления

изменяются в диапазоне величин от 74.2 до 74.6 дБ.

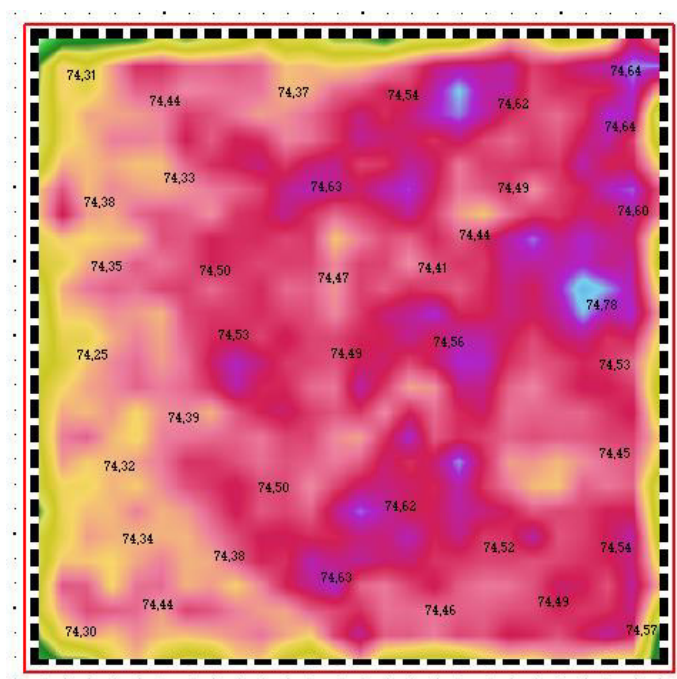


Рисунок 3.4 – Шумовая карта помещения с равномерно распределенными источниками шума, рассчитанная методом прослеживания лучей при зеркальном отражении звука от ограждений

3.2.3 Расчет отраженного шума в соразмерных помещениях при диффузном отражении звука от ограждений

В соразмерных помещениях в случае диффузного отражения звука при близких по величине коэффициентах звукопоглощения ограждений образуются диффузные звуковые поля. Расчет уровней звукового давления отраженного шума в условиях диффузного звукового поля будет производиться на основе выражения

$$L_{om} = L_{wp} + 10 \lg \left(\frac{4NK_{od}(1 - \bar{\alpha})}{\bar{\alpha}S} \right), \quad (3.19)$$

где $\bar{\alpha}$ – средний по помещению коэффициент звукопоглощения поверхностей помещения; S – площадь внутренних поверхностей ограждений помещения.

Для рассмотренного выше помещения на основе выражения (3.19) выполнен расчет уровней отраженного звукового давления для условий диффузного звукового поля. Величина уровня отраженного звукового давления при площади поверхности ограждений $S = 2 \cdot (12 \cdot 12 + 2 \cdot 12 \cdot 3) = 432 \text{ м}^2$ составила

$$L_{om} = 75.5 + 10 \lg \left(\frac{4 \cdot 36 \cdot 0.5 \cdot (1 - 0.25)}{0.25 \cdot 432} \right) = 72.4 \text{ дБ.}$$

С учетом прямого звука (см. табл. 3.2) уровень звукового давления в центре помещения равен

$$L = 10 \lg(10^{0.166.2} + 10^{0.172.4}) = 73.3 \text{ дБ.}$$

Полученное значение согласуется с расчетом методом прослеживания лучей при зеркальном отражении звука от ограждений. Расхождение не превышает 1.0 дБ. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что в соразмерных помещениях расчеты уровней звукового давления геометрическими методами согласуются с методами расчета на основе диффузного звукового поля.

3.2.4 Численный статистический энергетический метод расчета шума в помещениях с массовым пребыванием разговаривающих людей

Рассмотренный в п. 3.2.3 диффузный метод расчета отраженного шума обладает достаточной точностью при расчетах в соразмерных помещениях. Большинство помещений, в которых находятся люди, относится к несоразмерным помещениям. В таких помещениях образуются квазидиффузные отраженные поля, в которых распределение отраженной энергии неоднородно [27]. В то же время в таких помещениях при диффузном отражении звука соблюдается признак диффузности по изотропности прихода звуковой энергии в расчетные точки помещения [27].

В квазидиффузном звуковом поле существуют потоки отраженной звуковой энергии и имеется связь между плотностью потока отраженной энергии $\bar{q}$ и ее плотностью ε_{om} в виде уравнения

$$\bar{q} = -\eta \cdot \text{grad} \varepsilon_{om}, \quad (3.20)$$

где η – коэффициент связи плотности потока и градиента плотности отраженной звуковой энергии в помещении.

В [26] было показано, что среднее значение коэффициента η в квазидиффузных шумовых полях помещений при диффузном отражении звука от ограждений может определяться как

$$\eta \approx 0.5cl_{cp}, \quad (3.21)$$

где l_{cp} – длина среднего пробега звука в помещении.

Величина числового коэффициента формулы (3.21) подтверждена в работе [112].

На основе (3.20) в [26] было получено уравнение распределения плотности отраженной звуковой энергии в квазидиффузном поле в виде

$$\eta \nabla^2 \varepsilon_{om} - c m_a \varepsilon_{om} = 0, \quad (3.22)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа.

Уравнение (3.22) в случае помещений с массовым пребыванием людей решается при граничных условиях, имеющих вид

$$\bar{q}|_{ds} = \frac{-c\alpha_s}{2(2-\alpha_s)} \varepsilon_{om} \Big|_{ds} + (1-\alpha_s) I_{np} \Big|_{ds}, \quad (3.23)$$

где α_s – коэффициент звукопоглощения на рассматриваемом участке поверхности ds ; I_{np} – суммарная интенсивность прямой звуковой энергии, падающей на элемент ds со всей излучающей звуковую энергию плоскости разговаривающих людей.

Уравнение (3.22) при граничных условиях (3.23) может решаться численным методом. В этом случае расчет распределения плотности отраженной энергии может выполняться как в соразмерных, так и в несоизмерных помещениях, а также в помещениях других сложных форм.

Алгоритм расчета численным методом применительно к ситуации с массовым пребыванием в помещении разговаривающих людей дан нами в статье [113]. Алгоритм включает в себя следующие операции:

1. Весь объем помещений делится на элементарные объемы $V_{i,j,k}$ (см. рис. 3.5).
2. Для каждого i,j,k -го объема составляется баланс отраженной энергии. Выражение для уравнения баланса в общем случае имеет вид

$$\sum_{n=1}^N q_n S_n + \sum_{d=1}^{6-N} |\bar{q}|_d S_d - c m_a \varepsilon_{ompi,j,k} V_{i,j,k} = 0, \quad (3.24)$$

где q_n – плотности потоков диффузной энергии между i,j,k -м объемом и соседними с ним объемами через поверхности S_n ; $|\bar{q}|_d$ – модуль плотности потока диффузной энергии на d -ой поверхности элементарного объема, являющейся поверхностью ограждения помещения с площадью S_d ; $\varepsilon_{ompi,j,k}$ – плотность отраженной энергии в i,j,k -м объеме; N – количество объемов, контактирующих с i,j,k -м объемом; $6 - N$ – количество граней i,j,k -го объема, являющихся поверхностями ограждения; $V_{i,j,k}$ – объем элементарного

параллелепипеда; $\varepsilon_{i,j,k}$ – плотность диффузно отраженной энергии в i,j,k -м объеме.

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

$$\sum_{n=1}^6 q_n S_n - c m_a \varepsilon_{i,j,k} V_{i,j,k} = 0. \quad (3.25)$$

Плотности потоков энергии q_n определяются как

$$q_n = -\eta(\varepsilon_{i,j,k} - \varepsilon_n) / h_n, \quad (3.26)$$

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

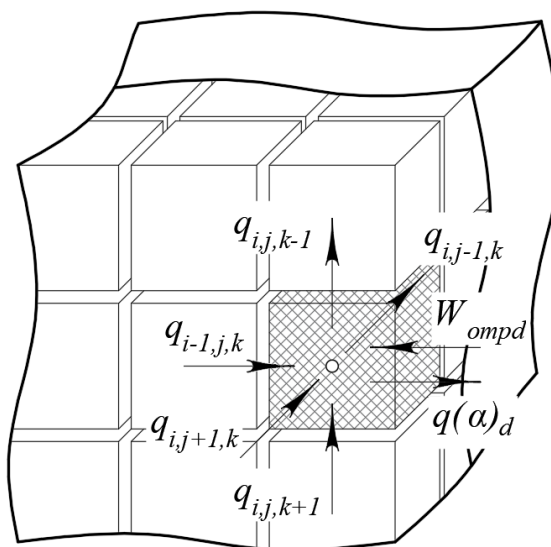


Рисунок 3.5 – Схема разбиения помещения на элементарные объемы

3. Производится расчет интенсивности прямой энергии, приходящей на поверхность S_d элементарного объема i,j,k от всех участков m , на которые разделена излучающая звуковую энергию плоскость, и определяется интенсивность приходящей в элементарный объем i,j,k энергии после отражения падающего на ограждение прямого звука. Расчет производится по формуле

$$I_{np,d} = (1 - \alpha_d) \sum_{m=1}^M \frac{NK_{od} W_0 10^{0.1L_{wp}}}{4\pi r_d^2 M} \cos \theta_d, \quad (3.27)$$

где r_d – расстояние от центра излучающего звук участка m до центра поверхности S_d ограждения в пределах i,j,k -го объема; θ_d – угол направления от центра излучающей поверхности элемента m до центра элемента ограждения d ; α_d – коэффициент

звукопоглощения на элементе поверхности ограждения d .

4. Выполняется расчет величины $|\bar{q}|_d$ для каждой поверхности ограждения в пределах i, j, k -го объема и затем определяется суммарная величина от всех поверхностей $6 - N$ с учетом поглощения прямой и отраженной звуковой энергии на ограждениях (см. формулу (3.23)).

$$\sum_{d=1}^{6-N} |\bar{q}|_d S_d = \sum_{d=1}^{6-N} \left[(1 - \alpha_d) \sum_{m=1}^M \frac{NK_{od} W_0 10^{0.1L_{wp}}}{4\pi r_d^2 M} \cos \theta_d - \frac{\alpha_d c \varepsilon_{i,j,k}}{2(2 - \alpha_d)} \right] S_d. \quad (3.28)$$

5. Производится решение полученной системы уравнений баланса отраженной энергии и определяются плотности отраженной энергии в каждом элементарном объеме.

6. Выполняется расчет уровней звукового давления, создаваемых разговаривающими людьми в расчетных точках помещения. Расчет производится по формуле

$$L_i = 10 \lg \left[(\varepsilon_{np,i} + \varepsilon_{omp,i}) c / I_0 \right], \quad (3.29)$$

где $\varepsilon_{np,i}$ – плотность энергии прямого звука в i -ой расчетной точке помещения, создаваемая при массовом скоплении разговаривающих людей; $\varepsilon_{omp,i}$ – плотность отраженной звуковой энергии в i -ой расчетной точке, полученная в результате решения системы уравнений.

Плотность прямой энергии ε_{np} в этом случае определяется как от равномерно излучающей звуковую энергию плоскости. Методика ее расчета подробно рассмотрена в пункте 3.1.2. Величина ε_{np} определяется на основе решения численного ряда в соответствии с выражением (3.6).

Для реализации представленного численного метода решения дифференциального уравнения (3.22) при граничных условиях (3.23) разработана компьютерная программа, с помощью которой выполнены расчеты уровней для рассматриваемого в работе примера помещения.

На рисунке 3.6 приведена шумовая карта, рассчитанная численным статистическим энергетическим методом для помещения, рассматриваемого ранее.

Выполнен также расчет уровней в помещении для случая, когда посетители располагаются только в одной части помещения (см. рис. 3.7, а). На рисунке 3.7, б дана рассчитанная для этого случая шумовая карта помещения. Видно, что уровни в части помещения с посетителями на 1.5 дБ выше, чем при равномерном их расположении по всей площади. Это связано с более высокими уровнями прямого звука за счет большей плотности людей.

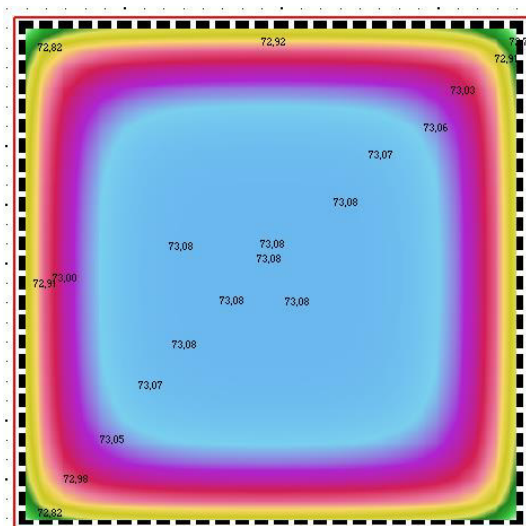


Рисунок 3.6 – Шумовая карта помещения, рассчитанная численным статистическим энергетическим методом с равномерно распределенными источниками шума

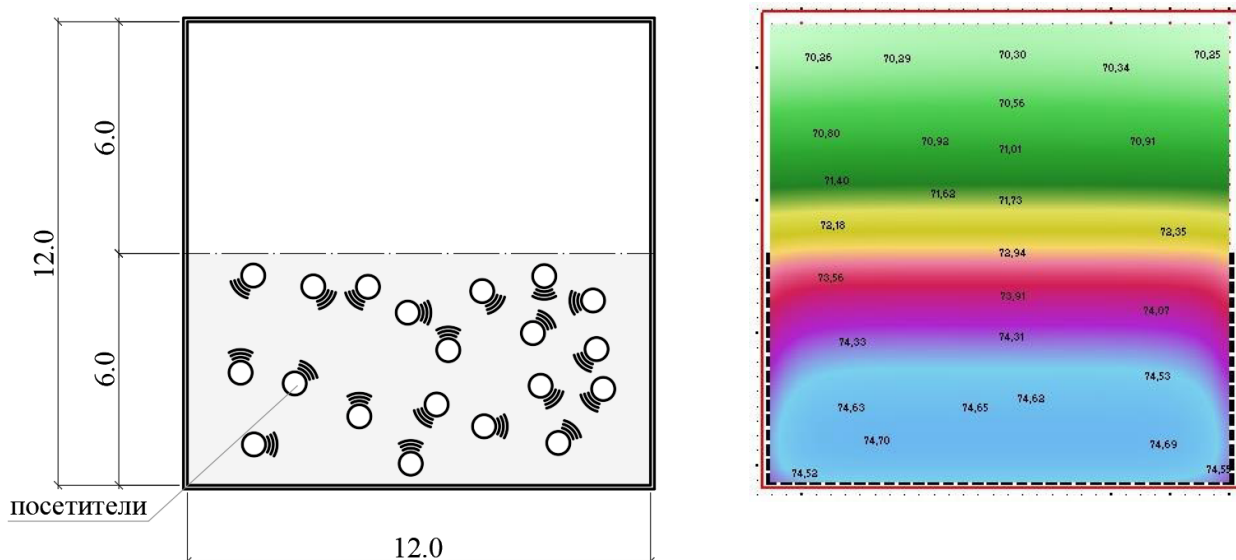


Рисунок 3.7 – К расчету численным статистическим энергетическим методом уровней звукового давления при расположении посетителей в одной части помещения: а) план помещения с указанием зоны расположения посетителей; б) шумовая карта помещения

Рассмотренный численный метод расчета может быть использован и при расчетах в системах, связанных открытыми проемами помещениями при нахождении в них посетителей.

Ниже приведен пример оценки шумового режима в помещении клиентского зала размерами $18 \times 6 \times 3.9(h)$ м и в акустически связанных с ним рабочих помещениях с размерами $6 \times 3 \times 3.9(h)$ м (см. рис. 3.8).

Связь помещений осуществляется через открытые проемы шириной 1.2 м. Посетители располагаются в клиентском зале с плотностью 1 человек на 4 м^2 , коэффициент

одновременности речи равен 0.4. Расчет выполнен для октавной полосы со среднегеометрической частотой 500 Гц. Плотность акустической мощности речи составляет 69.2 дБ/м². Средний коэффициент звукопоглощения ограждений равен 0.1. Рассматривается также вариант устройства на потолке звукопоглощающей облицовки с коэффициентом звукопоглощения 0.7. Компьютерная форма к расчету приведена на рисунке 3.9.

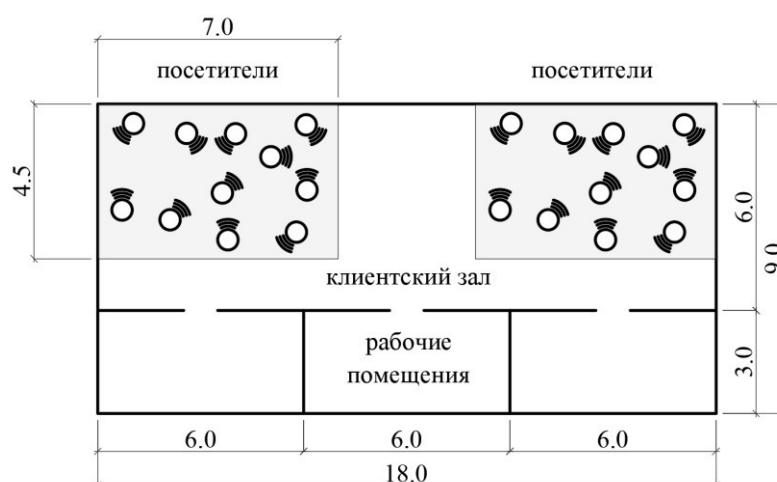


Рисунок 3.8 – Схема помещения к расчету шумового режима. Размеры даны в м

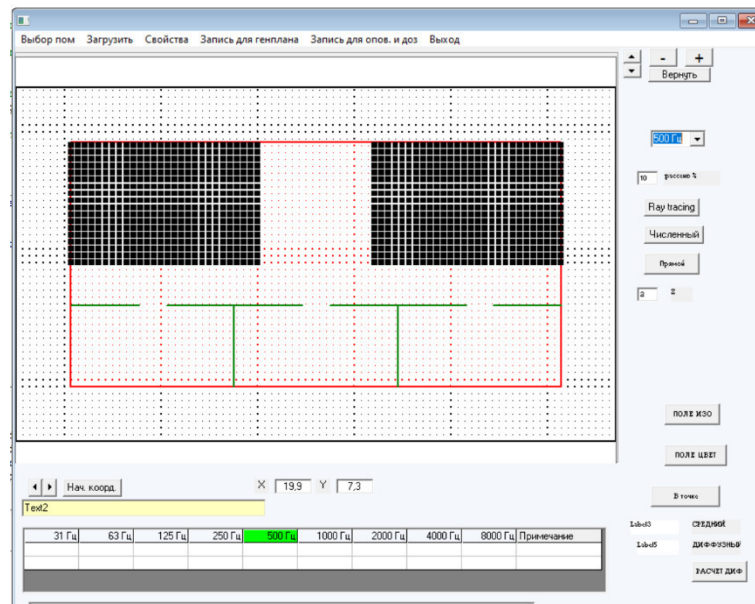


Рисунок 3.9 – Компьютерная форма помещения с исходными данными для расчета.
В заштрихованной зоне зала находятся посетители

На рисунке 3.10 показано распределение уровней звукового давления прямого звука от посетителей. Видно проникновение звука в акустически связанные рабочие помещения. В зоне посетителей уровень прямого звука достигает 59 дБ, что соответствует тихой речи.

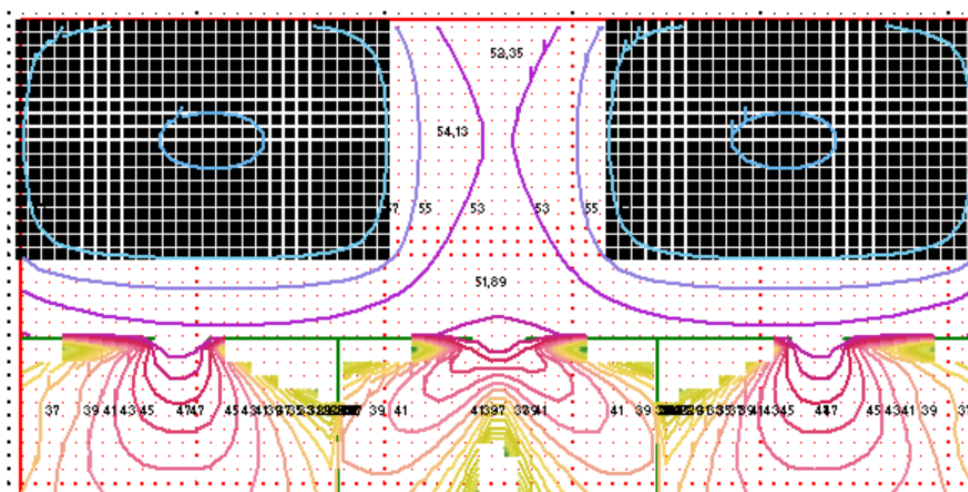


Рисунок 3.10 – Распределение уровней звукового давления (дБ) прямого звука в помещениях в форме изодецибел

С учетом отраженного звука в помещениях без акустической облицовки потолка (см. рис. 3.11) уровень шума составляет от 62–65 дБ. Отраженное звуковое поле от разговаривающих посетителей близко к диффузному. Шум в рабочих помещениях мало отличается от шума в клиентском зале. Очевидно, что акустические условия работы персонала учреждения в таких условиях являются неудовлетворительными, и особенно, за счет отраженного шума.

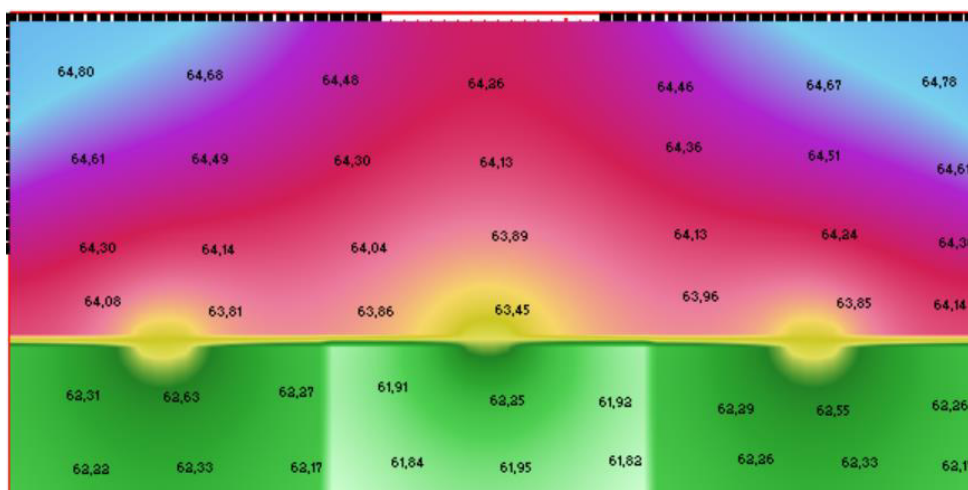


Рисунок 3.11 – Распределение уровней звукового давления (дБ) суммарной (прямой и отраженной) звуковой энергии в помещениях при коэффициентах звукопоглощения поверхности 0.1

Для снижения отраженного шума применена звукопоглощающая облицовка потолка. Это привело к снижению общих уровней шума в клиентском зале на 3-6 дБ, а в рабочих помещениях до 8 дБ (см. рис. 3.12). Устройство облицовки приведет к улучшению слышимости и к повышению разборчивости речи.

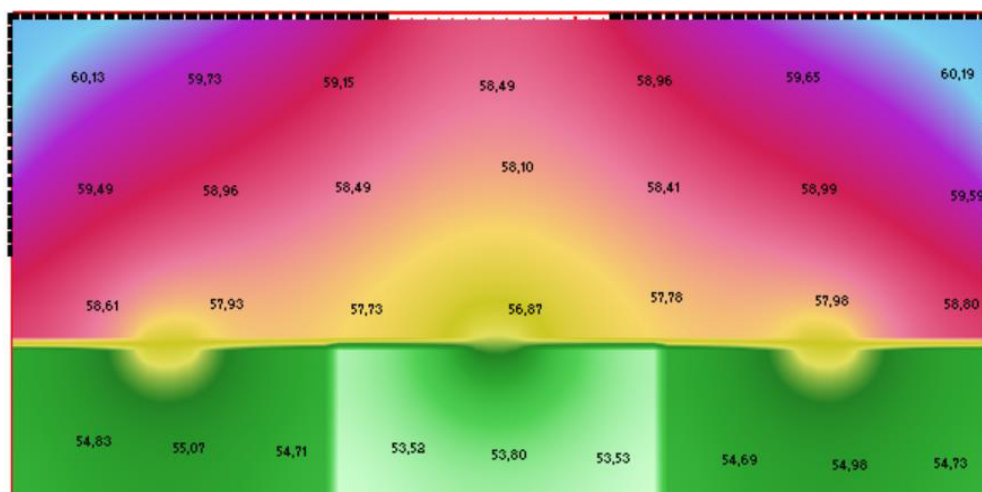


Рисунок 3.12 – Распределение уровней звукового давления (дБ) суммарной (прямой и отраженной) звуковой энергии в помещениях при устройстве звукопоглощающей облицовки потолка

В целом следует отметить, что достоинством разработанного численного метода является возможность его применения в помещениях любой сложной формы, а также при размещении разговаривающих людей как по всему объему помещения, так и на его отдельных участках. По этой причине численный метод может быть принят в качестве основного метода при диффузном характере отражения звука от ограждений.

3.2.5 Комбинированный метод расчета шума в помещениях с массовым пребыванием разговаривающих людей при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений

При зеркально-диффузном характере отражения звука в помещении образуется сложное отраженное звуковое поле, включающее в себя зеркальную и диффузную составляющие.

В настоящее время имеются методы расчета такого отраженного поля, построенные на различных подходах к оценке распределения зеркальной и диффузной составляющих. Методы рассмотрены в работах [26, 27, 36]. При этом в работах подробно отмечены их достоинства и недостатки.

Основываясь на результатах анализа этих методов, установлено, что наиболее приемлемой в случае оценки шума в помещениях с массовым пребыванием разговаривающих людей является комбинированная расчетная модель, включающая в себя метод прослеживания лучей и численный статистический энергетический метод. Метод прослеживания лучей в расчетной модели используется для вычисления прямой энергии и зеркальной

составляющей отраженного шума. При этом он позволяет также определять энергию, переходящую при отражениях зеркальных лучей в диффузную энергию. Образующаяся диффузная энергия определяется затем численным статистическим энергетическим методом.

Достоинством такой модели является возможность использования ее для расчетов в простых и сложных по форме помещениях. Оба входящих в расчетную модель метода позволяют выполнять расчеты не только при равномерном распределении разговаривающих людей, но и при их размещении только в части помещения.

Ниже рассмотрена методика использования комбинированной расчетной модели применительно к случаю массового размещения в помещениях разговаривающих людей. Алгоритм расчета включает в себя следующие операции.

1. Разговаривающие люди рассматриваются как равномерно излучающая звуковую энергию плоскость. Как и ранее в п. 3.2.2, плоский источник простой или сложной формы заменяется на систему точечных источников. Мощность каждого условного точечного источника определяется по формуле (3.11).

2. Весь объем помещения делится на отдельные элементарные объемы, как это было принято в п. 3.2.4. Схема для данного случая приведена на рисунке 3.13.

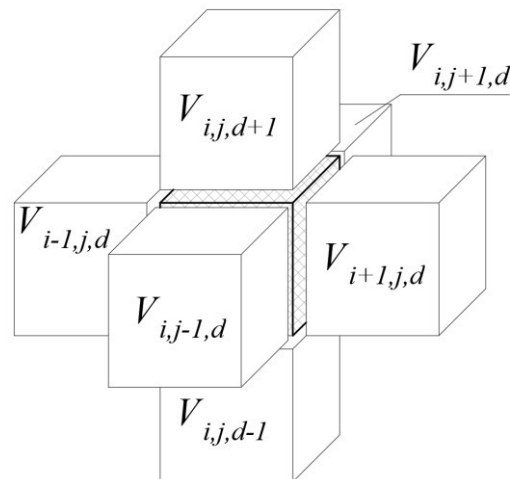


Рисунок 3.13 – Схема разбиения помещения на элементарные объемы

3. Определяется методом прослеживания лучей плотность прямой звуковой энергии, приходящей в каждый i -й элементарный объем от m -го источника. При этом, как в п. 3.2.2, считается, что каждый m -й источник излучает равномерно N лучей. Расчет производится по формуле

$$\varepsilon_i^{np} = \sum_{m=1}^M \frac{W_{ycl}}{cNS_{np}} \left\{ \sum_{k=1}^{K_{np}} \exp(-m_a r_{knp i}) \right\}, \quad (3.30)$$

где S_{np} – приведенная площадь сечения i -го элементарного элемента, определяемая как площадь поперечного сечения сферы, равная по объему элементу. Остальные обозначения в формуле (3.30) те же, что и формулах (3.15) и (3.17).

4. Методом прослеживания лучей определяется плотность зеркальной составляющей отраженного шума, приходящей в i -й элементарный объем от m -го источника. Расчет зеркальной составляющей производится с учетом потерь звуковой энергии лучей в воздухе, поглощения на ограждении и рассеяния ее части при отражении лучей. Расчет плотности зеркальной составляющей от всех M источников производится по формуле

$$\varepsilon_i^3 = \sum_{m=1}^M \frac{W_{ycl}}{cNS_{np}} \left\{ \sum_{k=1}^{K_z} \left[\exp(-m_a r_{kzi}) \prod_{p=1}^P \left[(1 - \alpha_p)(1 - \beta_p) \right]^{D_p} \right] \right\}, \quad (3.31)$$

где β_p – коэффициент рассеяния энергии каждого зеркального луча после его отражения от p -й поверхности ограждения. Остальные обозначения те же, что и в формулах (3.16) и (3.17).

5. Численным методом, реализующим уравнение (3.22), производится расчет плотности диффузной энергии, образующейся при частичном рассеянии отражаемых от ограждений зеркальных лучей. В этом случае граничные условия имеют вид

$$\bar{q}|_{dS} = \beta_s (1 - \alpha_s) I|_{dS} - \frac{c\alpha_s}{2(2 - \alpha_s)} \varepsilon^\partial \Big|_{dS}, \quad (3.32)$$

где α_s, β_s – коэффициенты звукопоглощения и рассеяния зеркальной энергии на элементе dS ограждения; I – интенсивность прямой и отраженной зеркальной энергии с учетом угла падения звуковых лучей, приходящих на элемент dS .

Баланс диффузно отраженной энергии для i, j, d -го объема в общем случае записывается в виде выражения

$$\sum_{n=1}^N q_n S_n + \sum_{d=1}^{6-N} W_d^\partial - \sum_{d=1}^{6-N} q_d S_d - cm_6 \varepsilon_{i,j,d}^\partial V_{i,j,d}, \quad (3.33)$$

где W_d^∂ – диффузная составляющая звуковой энергии, приходящая в i, j, d -й объем после отражения лучей от d -й поверхности этого объема площадью S_d , являющейся поверхностью ограждения помещения; q_d – плотность потока диффузной энергии, поглощаемой на m -й поверхности i, j, d -го объема, являющейся поверхностью ограждения помещения с

площадью S_d ; N – число элементарных объемов, контактирующих с i, j, d -м объемом; $6 - N$ – число граней i, j, d -го объема, являющихся поверхностями ограждения помещения; $V_{i,j,d}$ – объем элементарного параллелепипеда; $\mathcal{E}_{i,j,d}^{\partial}$ – плотность диффузно отраженной энергии в i, j, d -м объеме.

Для внутренних объемов баланс диффузно отраженной энергии определяется аналогично выражению (3.25).

6. Производится вычисление входящих в выражение (3.33) величин q_d и W_d^{∂} .

Расчет величины плотности потока q_d диффузной энергии, поглощаемой на поверхности d i, j, d -го объема, являющейся поверхностью ограждения, производится по формуле

$$q_d = \frac{\alpha_d c \mathcal{E}_{i,j,d}^{\partial}}{2(2 - \alpha_d)}, \quad (3.34)$$

где α_d – коэффициент звукопоглощения d -й поверхности.

Расчет W_d^{∂} производится с учетом суммы энергии лучей, перешедших в отраженную диффузную энергию при отражении прямых и отраженных зеркальных лучей от d -й поверхности i, j, d -го объема. Расчет выполняется для суммы всех M источников, на которые разбита излучающая плоскость. Величина W_d^{∂} в этом случае определяется по выражению

$$W_d^{\partial} = \beta_d (1 - \alpha_d) \left\{ \sum_{m=1}^M \frac{NK_{od} W_0 10^{0.1L_{wp}}}{M} \left[\sum_{k=1}^K \exp(-m_a R_{knp,i,j,d}) \cos \theta_{di,j,d} + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{k=1}^K \exp(-m_a R_{kzi,j,d}) \cos \theta_{di,j,d} \prod_{p=1}^P [(1 - \alpha_p)(1 - \beta_p)]^{D_p} \right]^{K=1} \right\}, \quad (3.35)$$

где K – количество прямых лучей или зеркально отраженных лучей, упавших на d -ю поверхность i, j, d -го объема, являющейся поверхностью ограждения; β_d – коэффициент рассеяния энергии k -го луча после его отражения от d -й поверхности ограждения в i, j, d -м объеме; $\theta_{di,j,d}$ – угол падения k -го луча на d -ю поверхность в i, j, d -м объеме; $R_{knp,i,j,d}$, $R_{kzi,j,d}$ – расстояния, прошедшие k -м прямым и зеркальным лучами соответственно от m -го источника до поверхности i, j, d -го объема. Остальные обозначения те же, что и формулах (3.30), (3.31), (3.11).

7. Производится решение полученной системы уравнений баланса для плотности

диффузной составляющей отраженной энергии и определяются ее величины в каждом элементарном объеме.

8. Выполняется расчет уровней звукового давления, создаваемых разговаривающими людьми, в расчетных точках помещения. Расчет производится по формуле

$$L_i = 10 \lg \left[(\varepsilon_i^{np} + \varepsilon_i^3 + \varepsilon_i^{\partial}) c / I_0 \right]. \quad (3.36)$$

В формуле (3.36): ε_i^{np} – плотность энергии прямого звука в i -ой расчетной точке помещения, создаваемая при массовом скоплении разговаривающих людей, определяемая по формуле (3.30); ε_i^3 – зеркальная составляющая отраженной звуковой энергии, определяемая по формуле (3.31); ε_i^{∂} – диффузная составляющая плотности отраженной энергии, определяемая в результате решения системы уравнений.

Достоинством рассмотренной расчетной модели является, как отмечено ранее, возможность ее использования при расчетах в помещениях любой сложной формы при размещении разговаривающих людей не только равномерно по всей площади помещения, но и на отдельных его участках. Существенным преимуществом модели является ее быстрое действие, которое достигается за счет одновременного получения сведений о распределении диффузной составляющей по всему объему помещения. Входящие в расчетную модель методы хорошо алгоритмируются и позволяют быстро выполнять по отдельности построение шумовых карт для прямого звука, зеркальной и диффузной составляющих отраженного шума, а также карты суммарных уровней шума.

Предложенный алгоритм расчета позволяет производить с использованием компьютерной программы определение энергетических характеристик шума в местах массового скопления разговаривающих людей при зеркальном отражении звука (при $\beta=0$), при диффузном отражении звука (при $\beta=1$), и при зеркально-диффузном отражении, когда $0 < \beta < 1$.

Таким образом, в настоящее время на основе рассмотренных выше численных методов создана эффективная методика оценки энергетических параметров шума, изучаемого людьми, и акустического комфорта в местах их массового пребывания.

Предложенные численные методы расчета прямого звука и его отраженные составляющие требуют применения вычислительной техники для их реализации. Далее в п. 3.3 главы приведено описание разработанных компьютерных программ и выполнена экспериментальная проверка точности расчетных методов.

3.3 Компьютерная реализация и экспериментальная проверка методов расчета шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей

Для повышения точности расчетов в работе предложены расчетные методы, учитывающие факторы, влияющие на формирование звуковых полей. С ростом числа учитываемых факторов возрастает сложность математического аппарата для оценки шумовых полей, формирующихся в помещениях и в городской застройке. Реализация таких расчетных методов возможна с привлечением современных вычислительных систем на основе компьютерных программ, использующих эффективные вычислительные алгоритмы [94, 114].

Среди преимуществ компьютеризации проектирования можно назвать возможность многовариантных разработок и получения эффективных проектных решений на основе обоснованного сравнительного технико-экономического анализа [92, 93].

Ниже приведено описание компьютерных программ, на основе которых в п. 3.4 выполнена экспериментальная проверка точности разработанных расчетных методов и методик их практической реализации.

3.3.1 Общие принципы построения компьютерных программ для расчета шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей

Для реализации разработанных в работе методов расчета шума разработаны компьютерные программы. В качестве среды для разработки программ приняты продукты фирмы Microsoft. В частности, программирование и отладка кода программ выполнена на языке программирования Visual Basic версии 5.0 и 6.0 [115], который отличается простотой и широкими возможностями.

Программные продукты построены на основе блочно-модульного принципа, который характеризуется иерархической структурой, т.е. для решения поставленной задачи необходимо выполнить ряд действий в определенной последовательности. Особенностью структуры является возвращение после каждого выполненного действия в основное меню программы. Блочно-модульный принцип обеспечивает многогранность программной среды и удобство в разработке и отладке каждого нового блока. Кроме того, этот принцип позволяет накапливать отлаженные универсальные блоки, которые могут в различных

комбинациях использоваться для решения широкого круга научных и практических задач. Например, блоки задания цифровой модели помещения и ввода акустических параметров помещений могут использоваться для расчета постоянных звуковых полей и полей, переменных во времени. В разработанных программах частично реализован объектный принцип программирования [115].

Каждая программа имеет определенный набор блоков, а именно, блок ввода исходных геометрических и акустических данных объекта и источника шума, расчетный блок и блок вывода полученных результатов [117].

Исходными данными для программы являются: объемно-планировочное решение помещения или геометрические параметры объекта; размещение на объекте источников звука с известными геометрическими и акустическими характеристиками; акустические свойства поверхностей ограждений при расчете звуковых полей внутри помещений. Источник звука в виде большого количества людей (толпы) на открытом пространстве в условиях городской застройки представляется как плоский источник с заданными характеристиками, такими как плотность размещения людей, акустическая мощность и коэффициент одновременности разговора. Внутри помещений зона массового нахождения людей имеет произвольную форму. Люди могут находиться в одном или нескольких помещениях или занимать отдельные участки помещений.

Основным результатом работы программы является представление сведений о распределении звуковой энергии на объекте в удобной для пользователя форме графиков, таблиц или шумовых карт. В программе имеется возможность загрузки исходных данных из файлов формата MS Excel, а также записи результатов расчета в файлы-шаблоны для формирования отчетов.

При создании нового проекта формируется папка с заданным пользователем именем, где хранятся все данные о проекте в файлах последовательного доступа с расширением .dat (см. табл. 3.3). Это позволяет просматривать файлы и вносить требуемые изменения вручную, не запуская повторно основные программы.

В настоящее время для решения различных задач на объектах с массовым пребыванием людей разработаны 4 компьютерные программы [118, 119, 120, 121]. Программы использованы при решении различных акустических задач по исследованию шумового режима помещений [12, 122, 123, 124, 125]. Они дают возможность оценивать шумовой режим на объектах с массовым пребыванием людей с различными акустическими и

геометрическими параметрами и при различных сочетаниях источников звука (линейных, точечных или плоских, в виде людской толпы).

Таблица 3.3 – Характеристика файлов последовательного доступа

Имя	Содержание
Гран-дан.dat	Граничные данные объекта исследования, а именно, коэффициенты звукопоглощения ограждающих поверхностей, звукоизоляция перегородок и дверей, высота помещений и перегородок, площадь дверей, параметры конечно-разностной сетки
Массивы.dat	Массивы, характеризующие в каждой узловой точке сетки звукопоглощение потолка, пола и стен, геометрические параметры помещения
Массивы-ист.dat	Массивы, характеризующие в каждой узловой точке сетки наличие толпы и значения фонового шума
Пом-ист.dat	Акустические параметры источников звука: фактор направленности, коэффициент одновременности речи, акустическая мощность
Рис-пом.dat	Геометрические параметры объекта исследования
Застройка.dat	Цифровая модель застройки
Тер-ист.dat	Геометрические и акустические параметры источников звука на территории застройки

3.3.2 Комбинированная компьютерная программа по расчету шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей

Все указанные выше четыре компьютерные программы для удобства их использования объединены в единую компьютерную программу, построенную по блочному принципу (см. рис. 3.14).

Первым этапом при создании проекта и, следовательно, первым блоком программы является блок рисования – описание геометрических параметров открытого объекта или формирования цифровой модели помещения. Программа имеет встроенный графический редактор, в котором выполняется чертеж помещения (рис. 3.15). Для описания открытого пространства в графический редактор загружается рисунок формата .jpg с планом исследуемой застройки, который является основой для прорисовки зданий на участке застройки, что значительно облегчает ввод данных. С помощью функций данного блока описывается исходная застройка, а именно, вводятся геометрические параметры зданий и задается масштаб.

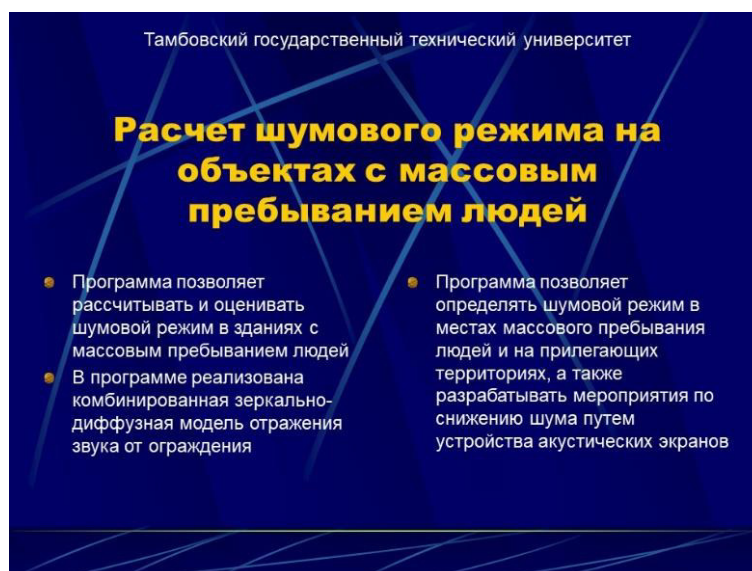


Рисунок 3.14 – Начальная форма программы по расчету шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей

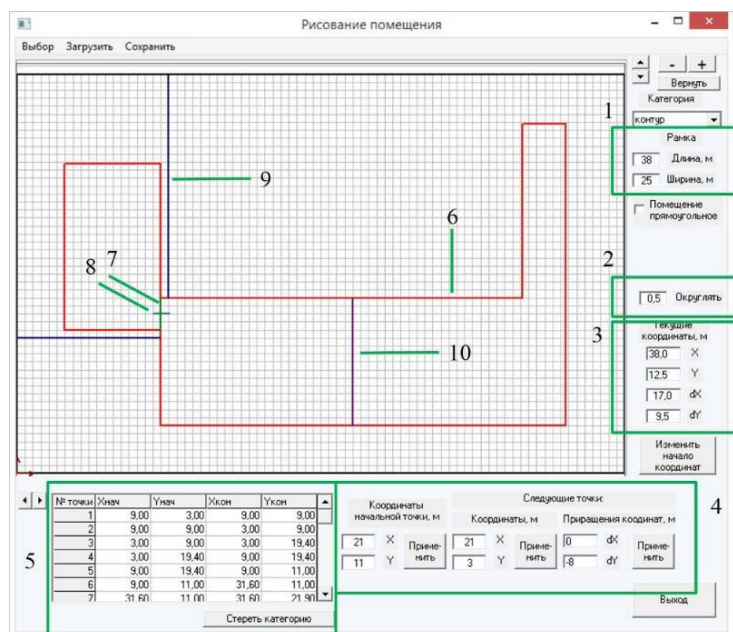


Рисунок 3.15 – Форма ввода исходных данных: 1 – параметры рабочего поля; 2 – параметр точности; 3 – текущие координаты мышки; 4 – ввод координат точек; 5 – координаты описанных точек; 6 – стены помещения; 7 – перегородка; 8 – дверь; 9 – граница разных акустических характеристик стен («внешняя категория»); 10 – граница разных акустических характеристик пола («внутренняя категория»)

Перед началом работы задаются параметры рабочего поля (длина и ширина), в котором будет выполняться чертеж, и параметр точности (округления). Характерные точки контура объекта задаются либо путем нажатия левой кнопки мыши в области рисования, либо вводом координат точек и величиной их приращения. Также имеется упрощенная возможность ввода параметров прямоугольного помещения, а именно его ширины и

длины. Аналогично задаются геометрические параметры внутренних ограждающих конструкций перегородок и дверей. В графическом редакторе также предусмотрена возможность разделения внутренней и внешней среды помещения на зоны с различными акустическими характеристиками. Рисунок можно сохранить, или загрузить уже имеющуюся ситуацию для ее редактирования.

Вторым блоком программы является ввод акустических параметров ограждающих конструкций. Блок предназначен для расчетов в замкнутых объемах. Перед началом работы с данным блоком задается высота помещений и параметры конечно-разностной сетки, которая в последующем используется при численном статистическом энергетическом и комбинированном методах расчета (см. п. 3.2.4 и п. 3.2.5). Опыт работы с программой показал, что в большинстве случаев оптимальным количеством узлов сетки является 1000-2000 элементов. Коэффициенты звукопоглощения ограждений задаются либо из имеющейся в программе базы, либо вводятся вручную (рис. 3.16).

Третий блок – ввод параметров источников звука. Программа позволяет вводить различные виды источников звука: точечные, линейные, плоские, в виде людской толпы, а также задавать параметры фонового шума.

Для каждого вида источника задаются: фактор направленности и акустическая мощность источника звука, выбираемые из базы данных либо вводимые вручную; геометрические параметры; координаты привязки источника к принятой системе координат объекта (рис. 3.17, а).

Четвертый блок – расчетный, в котором производится расчет прямого звука, отраженной составляющей и суммарного шума. При расчете отраженной составляющей могут использоваться рассмотренные выше методы. Выбор конкретного метода производится с учетом характера отражения звука от ограждений. В программе можно использовать три расчетных метода: метод прослеживания лучей (ray tracing) при зеркальном отражении звука от ограждений; численный статистический энергетический метод при диффузном отражении звука; комбинированный метод, объединяющий оба предыдущих метода при зеркально-диффузном отражении звука (рис. 3.17, б).

Вывод результатов расчета с помощью программы (на примере здания) показан на рисунке 3.18 в виде шумовой карты и таблицы.

Форма расчетного блока программы для объекта в виде открытого пространства приведена на рисунке 3.19.

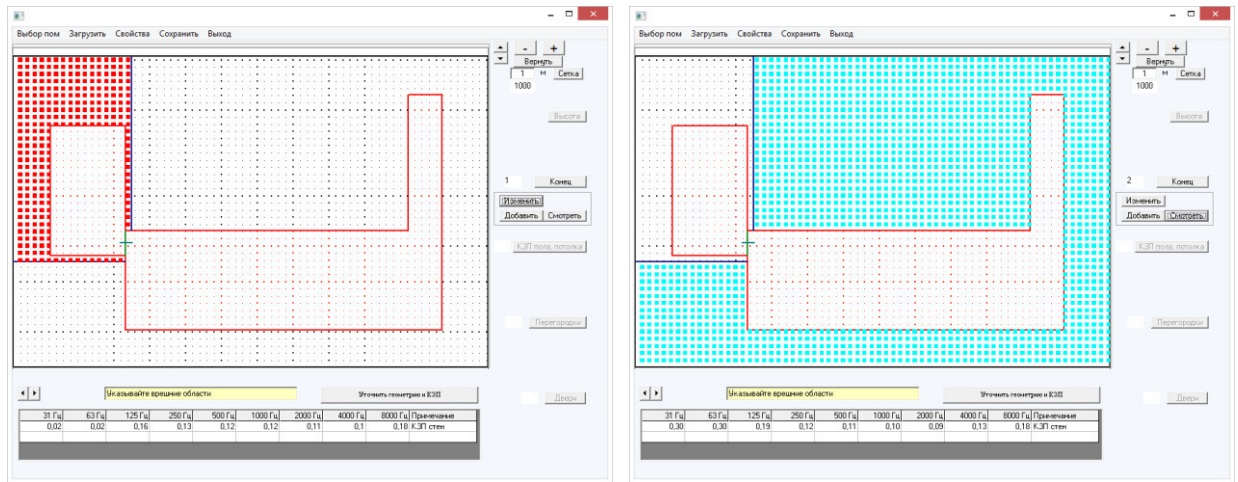


Рисунок 3.16 – Форма ввода акустических параметров различных участков ограждающих конструкций

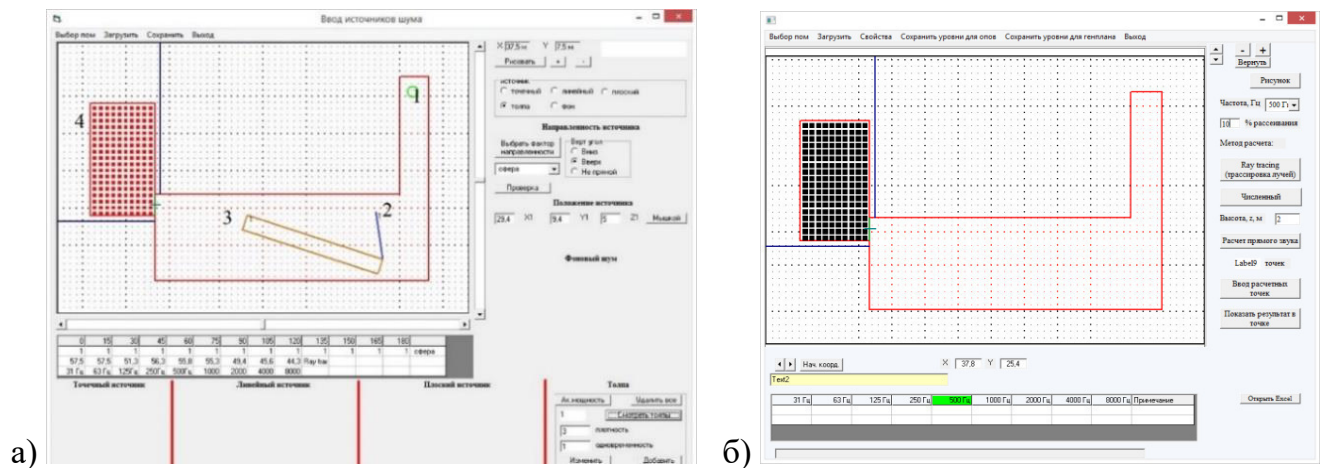


Рисунок 3.17 – Третий и четвертый блоки программы (на примере здания): а) форма ввода параметров источников шума: 1 – точечный, 2 – линейный, 3 – плоский, 4 – источник в виде толпы; б) расчетная форма программы

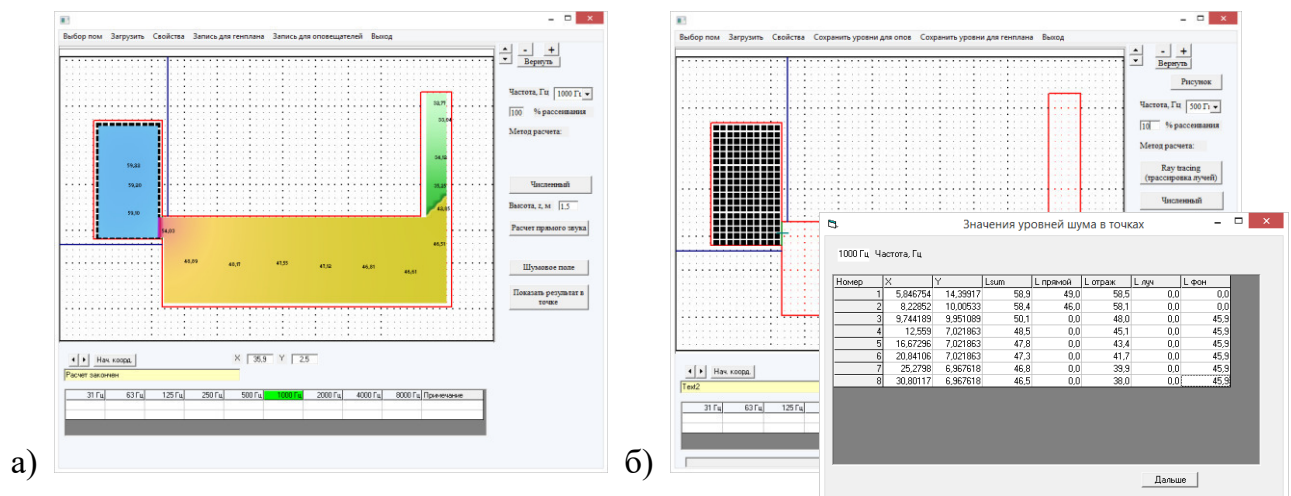


Рисунок 3.18 – Формы вывода результатов расчета в контрольных точках: а) в виде шумовой карты; б) в виде таблицы

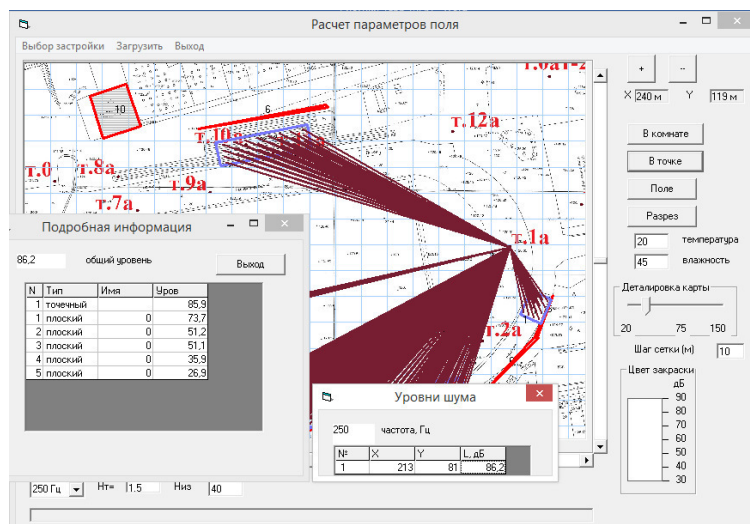


Рисунок 3.19 – Форма расчетного блока программы (на примере открытого пространства) и вывода результатов расчета в виде таблиц со значениями уровней звукового давления в точках

На рисунке 3.20 приведены формы вывода результатов расчета на открытом пространстве. Результаты могут быть даны в виде шумовых карт и на характерном разрезе объекта.

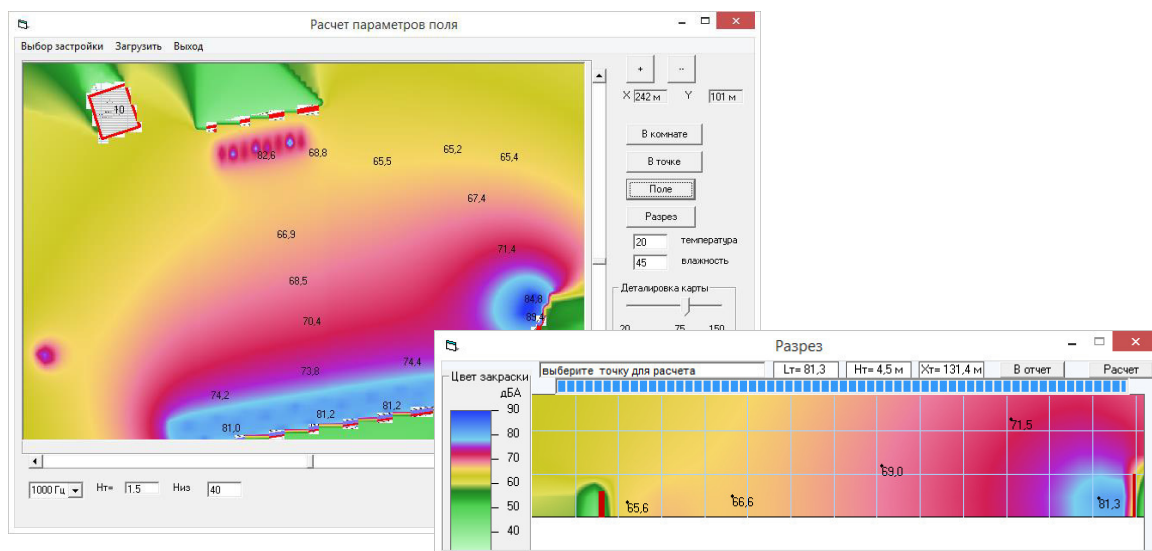


Рисунок 3.20 – Форма вывода результатов программы в виде шумовой карты плана и разреза со значениями уровней шума в контрольных точках

3.4 Экспериментальная проверка методов расчета шума на объектах с массовым пребыванием людей

В данном пункте работы представлены результаты сравнения экспериментальных и рассчитанных параметров звуковых полей. Требовалось проверить достоверность и точность рассмотренных методов расчета шума. Экспериментальная проверка точности

Методика расчета прямого звука от распределенных источников шума изложена в п. 3.1.1 и п. 3.1.2 работы. В данном разделе определены распределенные уровни звуковой мощности трибун и выполнено сравнение измеренных и рассчитанных уровней звукового давления на территории стадиона.

Объект исследования. Стадион «Спартак» находится в центральной части г. Тамбова на пересечении улиц им. Карла Маркса и Студенечкой набережной. Стадион предназначен для проведения игр чемпионата футбольной национальной лиги России, а также других спортивных мероприятий. Для этой цели на стадионе имеется шесть беговых дорожек, тренировочное поле и другие спортивные площадки (см. рис. 3.21). Размеры футбольного поля – 105 x 68 м.

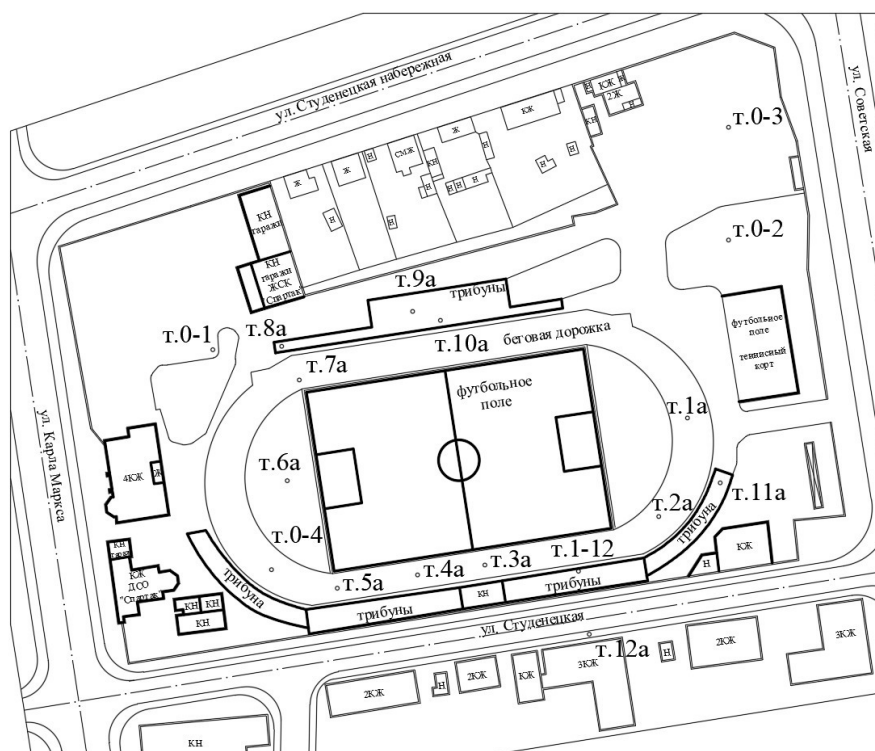


Рисунок 3.21 – Схема стадиона Спартак (г. Тамбов) с указанием точек измерения

Исследования шумового режима данного объекта выполнены по просьбе ООО «ТНТЦСА». Конечной целью являлось установление влияния спортивных мероприятий на шумовую обстановку прилегающей к стадиону застройки и оценка возможности увеличения вместимости стадиона на перспективу.

Измерения уровней шума от трибун стадиона выполнены 29.04.2017 г. с 13 до 15 часов во время футбольного матча «Тамбов» (Тамбов) - «Луч-Энергия» (Владивосток). На матче присутствовало 1650 болельщиков.

Положение расчетных точек показано на рисунке 3.212. До начала матча были выполнены измерения фонового шума от городского транспорта в точках т. 0, т.0-1 - т.0-2 (см. табл. 3.4).

Таблица 3.4 – Уровни фонового городского шума от транспорта в расчетных точках стадиона

N точки	Уровни фонового шума $L_{фон}$, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
т.0-1	73.3	66.9	59.6	51.7	51.2	44.8	34.4
т.0-2	68.8	61.0	54.8	50.4	53.7	45.1	34.6
т.0-3	72.1	65.1	57.3	53.6	55.2	53.7	46.1
т.0-4	63.5	56.3	50.2	47.2	47.2	40.9	29.8

Основная масса болельщиков (около 1500 человек) находилась на главной трибуне под навесом. На противоположной трибуне располагалось 60 человек. Наибольший уровень шума создавал фанатский сектор ФК «Тамбов», состоящий из 70 болельщиков, который располагался рядом с главным входом на стадион. На противоположной стороне трибун относительно фанатов Тамбова располагались болельщики ФК «Луч-Энергия» в количестве 20 человек.

Методика измерений. Экспериментальные измерения проводились одновременно двумя шумомерами в различных точках стадиона. Продолжительность временного усреднения в каждой точке составляло 3 минуты. Первый шумомер находился в фиксированной точке на главной крытой трибуне стадиона (т.1 – т.12). В связи с этим можно считать, что измерения в данной точке усреднялись в течение всех 12 измерений, т.е. за интервал времени в 36 минут. Мобильные точки измерения т.1а – т.11а находились на территории стадиона, т.12а – на территории жилой застройки со стороны ул. Студенческая.

Результаты измерения и их обработки

Спаренные измерения с постоянным фиксированием шума в определенной точке позволяют определить и учесть степень отклонения акустической мощности источников звука от среднего значения, а также получить сопоставимые значения уровней звукового давления в различных точках стадиона при разновременных измерениях. Уровни звукового давления в точках измерения с учетом поправки ΔL_w на переменный во времени характер источников шума приведены в таблице 3.5. Поправки учитывают переменный во времени шум трибун, как источника шума. Для точки т.11а такие поправки не вычислялись, так как в ней шум определяется криками находящихся поблизости фанатов, а также барабана, рассматриваемого как точечный источник шума. Влияние шума от остальных болельщиков в этой точке можно считать несущественным.

Таблица 3.5 – Уровни звукового давления в точках измерения с учетом поправки ΔL_w на переменный во времени характер источников шума

N точки (см. рис. 3.22)		Эквивалентные уровни суммарной звуковой энергии L , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	т.1а	74.14	71.80	68.62	70.50	69.41	65.09	53.84	42.78
2	т.2а	71.21	71.22	74.73	73.36	74.12	67.90	61.71	48.58
3	т.3а	72.01	67.26	70.08	75.10	78.00	75.91	66.68	51.55
4	т.4а	66.56	61.23	67.25	72.51	74.84	68.69	60.60	50.39
5	т.5а	65.07	60.65	61.99	64.29	66.26	59.89	58.72	46.74
6	т.6а	67.80	62.90	61.98	69.80	67.88	63.33	60.21	45.04
7	т.7а	77.45	76.11	68.39	63.26	62.57	56.21	47.13	34.68
8	т.8а	76.01	74.25	67.22	67.03	66.01	58.97	50.08	30.46
9	т.9а	69.38	66.70	68.74	67.53	71.38	66.45	55.35	40.84
10	т.10а	75.16	70.37	67.65	68.48	67.25	65.90	58.31	42.36
11	т.11а	76.03	90.94	97.62	89.01	87.70	78.50	71.45	64.71
12	т.12а	62.64	57.44	60.52	61.57	59.08	58.10	51.31	35.93

Результаты расчета акустической мощности и проверка метода расчета прямого звука на открытой территории

Расчет прямого звука от плоских источников, которыми являются трибуны стадиона, осуществляется по методике, изложенной в разделах 2 и 3 работы. Факторы направленности речи болельщиков принимались как для мужского голоса (см. результаты раздела 2) на частотах до 1000 Гц включительно

$$\Phi(\theta) = 0.59 + 1.16\cos(\theta / 2) - 0.44\sin\theta, \quad (3.37)$$

а на частотах 2000 Гц и выше по выражению

$$\Phi(\theta) = 0.27 + 2.96\cos(\theta / 2) - 1.42\sin\theta, \quad (3.38)$$

где θ – угол между направлением центральной оси речи и направлением на расчетную точку.

На низких частотах в фанатском секторе оказывает влияние барабанный бой, основная энергия которого направляется параллельно трибунам. Барабан рассматривается как точечный источник шума с фактором направленности

$$\Phi_{\theta} = |2\cos\theta|, \quad (3.39)$$

где θ – угол между направлением на расчетную точку и осью, перпендикулярной к мембране барабана (см. рис. 3.22).

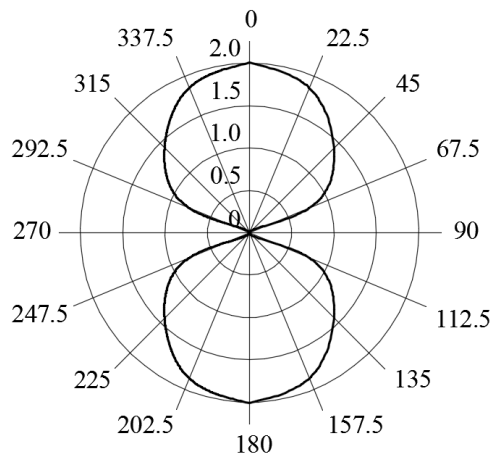


Рисунок 3.22 – Фактор направленности барабана

Над главной трибуной имеется козырек, который оказывает влияние на распределение энергии прямого сигнала. Влияние козырька в программе расчета уровней звукового давления учитывается вводом зеркального источника звука (см. рис. 3.23).

Расчет уровней акустической мощности источников шума и определение уровней звукового давления в расчетных точках производился с использованием компьютерной программы, описание которой приведено в п. 3.3.2. На рисунке 3.24 показана исходная форма с расчетными точками и источниками звука (прямоугольники синего цвета) для расчета уровней звукового давления. В секторе с фанатами из Тамбова есть точечный источник шума в виде барабана.

Учитывая соотношение фонового шума и шума от зрителей на стадионе определен диапазон обработки результатов измерений уровней звукового давления. Диапазон составляют октавные полосы частот от 250 до 4000 Гц.

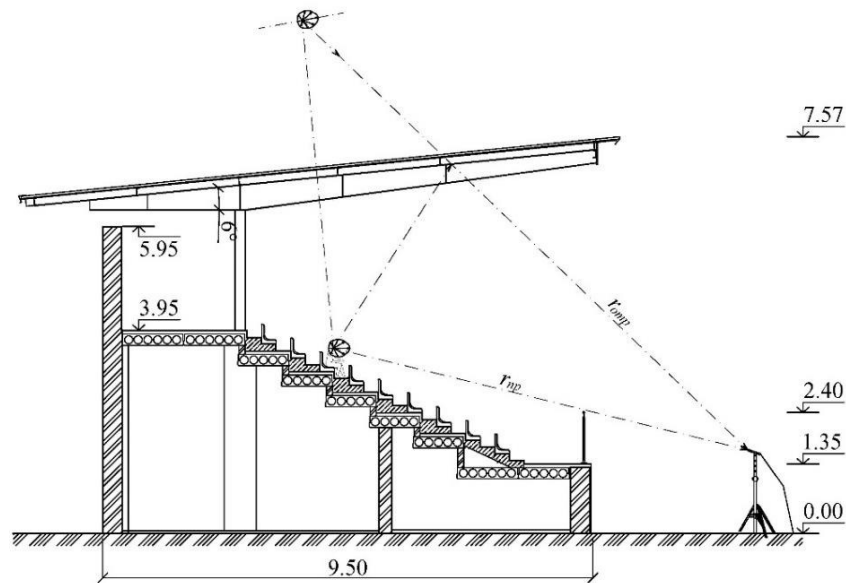


Рисунок 3.23 – Схема образования зеркального источника за счет отражения звука от козырька

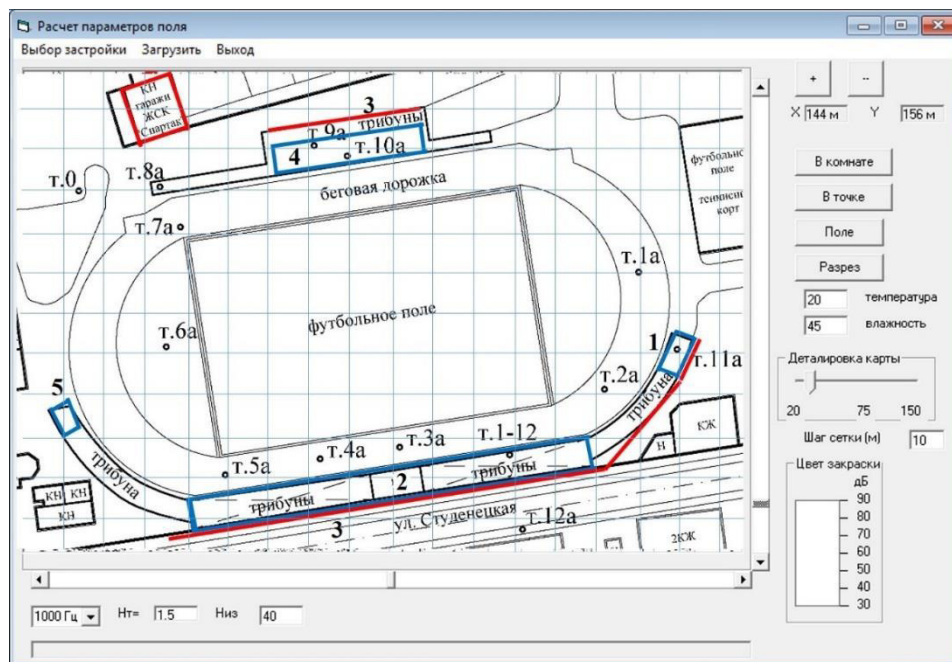


Рисунок 3.24 – Компьютерная форма с исходными данными для расчета уровней звукового давления: 1 – фанатский сектор болельщиков ФК «Тамбов» (70 человек); 2 – зрители матча (1500 человек); 3 – мнимый источник звука за счет отражения сигнала от козырька; 4 – зрители матча (60 человек); 5 – фанатский сектор болельщиков ФК «Луч-Энергия» (20 человек)

Определение акустической мощности болельщика и фаната производилось на основе сравнения измеренных и рассчитанных уровней звукового давления в характерных точках, в которых уровень шума определяется ближайшим источником шума. Так по точкам т.1 – т.12 устанавливалась акустическая мощность болельщиков, по точке т.11а рассчитывалась акустическая мощность фанатов. Результаты расчетов уровней акустической мощности источников звука приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты расчета акустической мощности шума, излучаемого болельщиками в фанатском секторе стадиона

Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц	При расчете в точке т.11а			При расчете в точках т.1а-т.10а, т.12а		
	L_w , дБ	L_{wp} , дБ	L_b , дБ	L_w , дБ	L_{wp} , дБ	L_b , дБ
125	115.0	96.5	-	113.0	94.5	-
250	121.6	95.5	121.6	118.6	93.5	118.6
500	113.0	94.5	-	111.0	92.5	-
1000	112.0	93.5	-	110.0	91.5	-
2000	101.5	82.0	-	99.5	80.0	-
4000	91.5	75.0	-	91.5	73.0	-

В табл. 3.6 приняты обозначения: L_w – общий уровень акустической мощности сектора; L_{wp} – уровень акустической мощности одного болельщика; L_b – уровень акустической мощности барабана. Акустическая мощность одного болельщика рассчитывалась по формуле

$$L_{wp} = L_w - 10\lg(N), \quad (3.40)$$

где $N = 70$ – количество болельщиков для фанатской трибуны. При этом $10\lg(70) = 18.5$ дБ.

В таблице 3.7 приведены уровни акустической мощности основной трибуны стадиона и каждого болельщика. При расчетах учитывались 1500 болельщиков на трибуне.

Таблица 3.7 – Результаты расчета акустической мощности шума, излучаемого болельщиками

Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц	Уровень акустической мощности	
	L_w , дБ	L_{wp} , дБ
125	95.8	63.8
250	100.0	68.0
500	105.6	73.6
1000	109.6	77.6
2000	102.3	70.3
4000	95.1	63.1

Акустическая мощность других трибун определялась исходя из данных табл. 3.6 и количества болельщиков: $N = 60$ человек для малой трибуны (напротив основной трибуны под навесом); $N = 20$ для поклонников команды из г. Владивостока.

Выполнены расчеты уровней звукового давления во всех расчетных точках. В качестве примера на рисунке 3.25 приведена форма по расчету уровня звукового давления

в конкретной расчетной точке. Рассчитанные уровни звукового давления во всех точках приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты расчета и измерения уровней звукового давления в точках измерения

N точки	Уровни, дБ на октавной частоте 250 Гц			Уровни, дБ на октавной частоте 500 Гц			Уровни, дБ на октавной частоте 1000 Гц			Уровни, дБ на октавной частоте 2000 Гц			Уровни, дБ на октавной частоте 4000 Гц		
	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL
т.1а	68.6	73.6	-5.0	70.5	72.8	-2.3	69.4	72.3	-2.9	65.1	61.9	3.2	53.8	55.2	-1.4
т.2а	74.7	75.2	-0.5	73.4	74.5	-1.1	74.2	74.7	-0.5	67.9	66.3	1.6	61.7	59.1	2.6
т.3а	70.0	72.6	-2.6	75.1	72.7	2.4	78.0	76.8	1.2	75.9	70.4	5.5	66.7	63.5	3.2
т.4а	67.2	70.6	-3.4	72.5	72.5	0	74.8	76.1	-1.3	68.7	70.3	-1.6	60.6	63.6	-3.0
т.5а	62.0	65.3	3.3	64.3	67.8	-3.5	66.3	72.2	-5.9	60.0	64.2	-4.2	58.7	59.2	-0.5
т.6а	62.0	61.7	-0.3	69.8	63.2	6.6	67.9	66.2	1.7	63.3	60.3	3.0	60.2	53.2	7.0
т.7а	68.4	64.9	3.5	63.3	61.7	0.6	62.6	64.0	-1.4	56.2	58.6	-2.4	47.1	51.4	-4.3
т.8а	67.2	65.1	2.1	67.0	60.8	6.2	66.0	63.1	2.9	59.0	57.5	1.5	50.1	50.4	-0.3
т.9а	68.7	69.4	0.7	67.5	67.0	0.5	71.4	71.3	0.1	66.4	63.1	3.3	55.3	57.9	-2.6
т.10а	67.7	70.8	3.1	68.5	68.4	0.1	67.2	71.5	-4.3	65.9	64.0	1.9	58.3	58.1	0.2
т.11а	97.6	96.7	0.9	89.0	88.7	0.3	87.7	87.7	0	78.5	77.5	1.0	71.5	72.7	-0.2

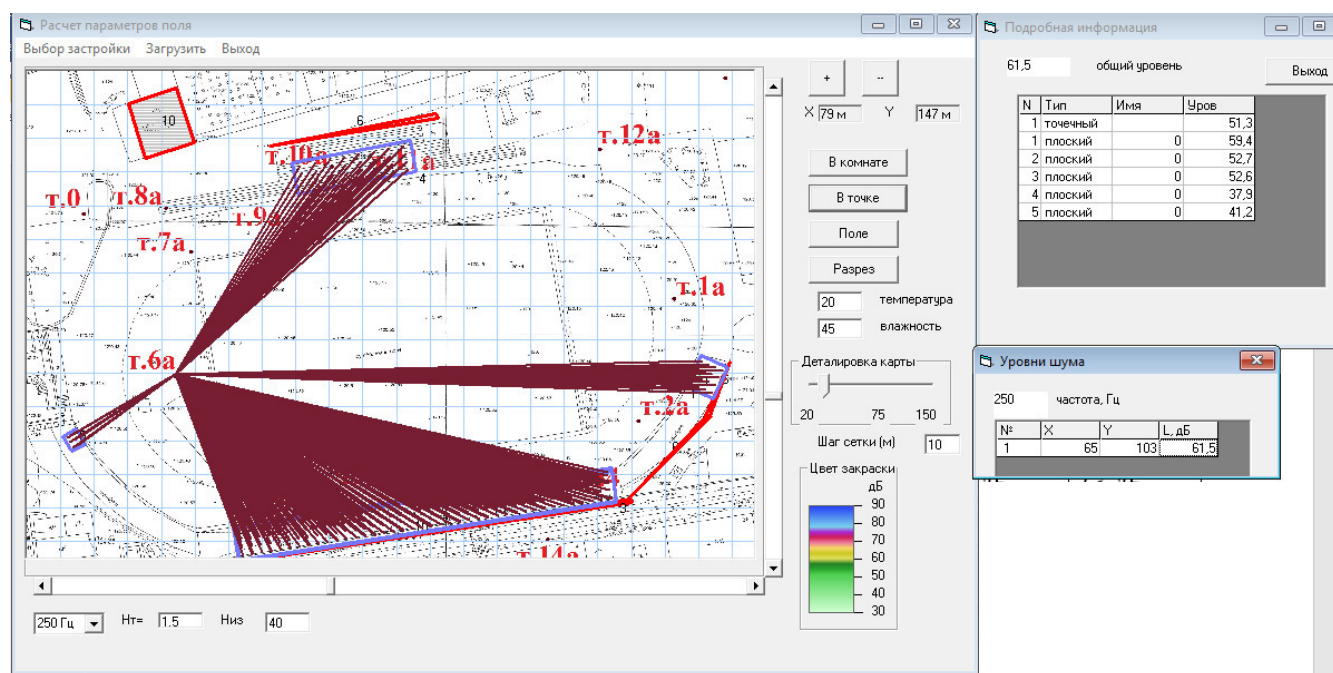


Рисунок 3.25 – Компьютерная форма с результатами расчета уровня звукового давления в расчетной точке т.6а

Результаты расчета, в частности, показали, что в октавной полосе со среднегеометрической частотой 250 Гц уровни звукового давления в значительной степени зависят от наличия или отсутствия барабанного боя на фанатской трибуне. Барабан повышает

уровни звукового давления в ближайших к нему точках на 18 дБ.

На рисунках 3.26–3.28 показаны рассчитанные шумовые карты в плане и на разрезах, проходящих через центральные зоны трибун, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 250 и 1000 Гц.

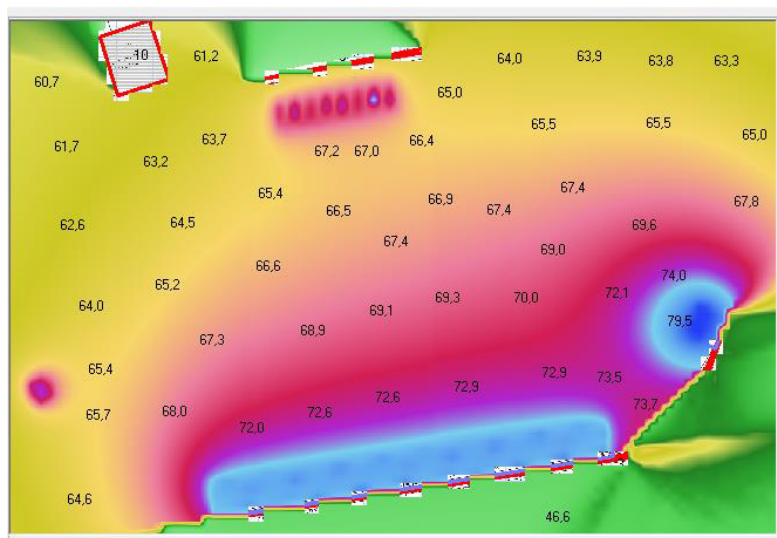


Рисунок 3.26 – Шумовая карта стадиона на среднегеометрической частоте 1000 Гц

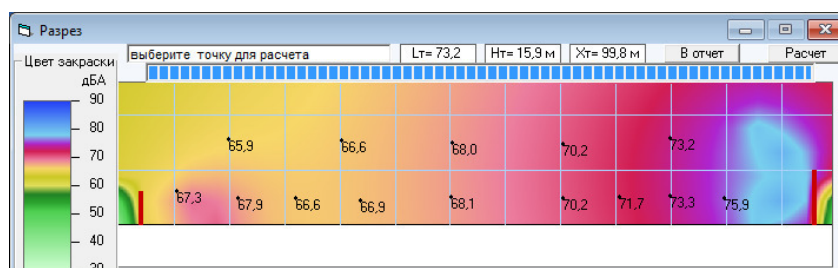


Рисунок 3.27 – Шумовая карта на поперечном разрезе стадиона (среднегеометрическая частота 1000 Гц)

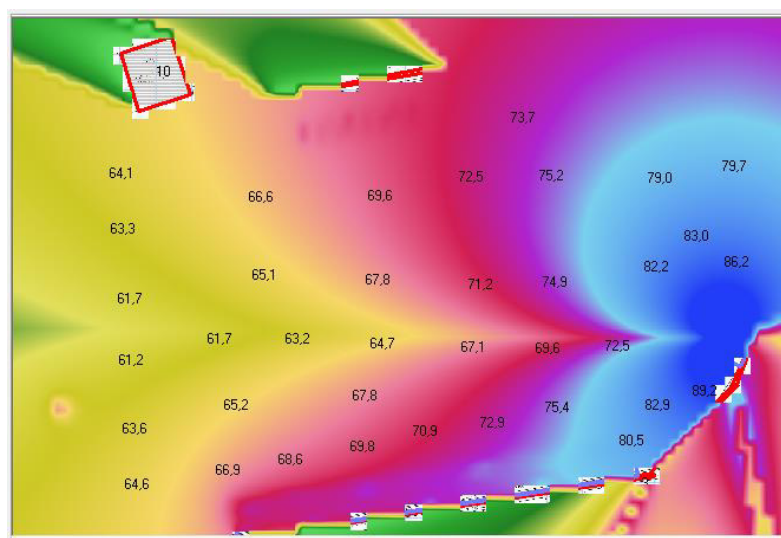


Рисунок 3.28 – Шумовая карта стадиона на среднегеометрической частоте 250 Гц

Сравнение измеренных и рассчитанных уровней в целом показывает удовлетворительное совпадение результатов (см. табл. 3.8). Следует отметить, что в т. ба расхождение между рассчитанными и измеренными уровнями в октавных полосах с f_{cp} 500 и 4000 Гц достигает 7 дБ. Это связано со спонтанной активностью фанатов ФК «Луч-Энергия», трибуна которых располагалась рядом с расчетной точкой т.ба.

3.4.2 Исследование шумового режима в помещениях школы как в местах с массовым пребыванием людей

На объектах образования, которые относятся к местам с массовым пребыванием людей, в большинстве помещений создается шумовой режим с высокими уровнями звука. В этом случае при оценке их шумового режима необходимо знать акустическую мощность источников шума, в данном случае речи учащихся, и иметь надежный метод расчета, который позволил бы грамотно проектировать эти объекты с учетом мероприятий по снижению шума в них.

Объектом исследования являлась школа № 3 г. Рассказово, которая находится по адресу ул. Академика Маркова, д. 27. Здание школы двухэтажное с подвалом, общей площадью 2406.40 м². Стены кирпичные, фундаменты бутовые ленточные, перекрытия из железобетонных плит, перегородки кирпичные и деревянные, окна двухстворчатые пластиковые. Схема плана 2-го этажа, на котором проводились исследования, представлен на рисунке 3.29.

Измерения проводились в разных условиях выполнения образовательного процесса, а именно при учебных занятиях в кабинете физики и в спортзале, а также в фойе школы.

Расчет уровней акустической мощности источников шума и определение уровней звукового давления в расчетных точках произведены с помощью компьютерной программы, рассмотренной в п. 3.3 работы. Расчет прямого звука в программе производился методом, рассмотренным в п. 3.1.2. Расчет отраженной составляющей шума выполнялся численным статистическим энергетическим методом.

Задачами исследования являлись: оценка шумового режима внутри объекта с массовым пребыванием людей; определение акустической мощности речи учащихся в разное время образовательного процесса; сравнение результатов расчетов и экспериментальных

данных.

Расчет распределения отраженного шума в помещениях производился как в системе акустически связанных открытыми проемами воздушных объемов.

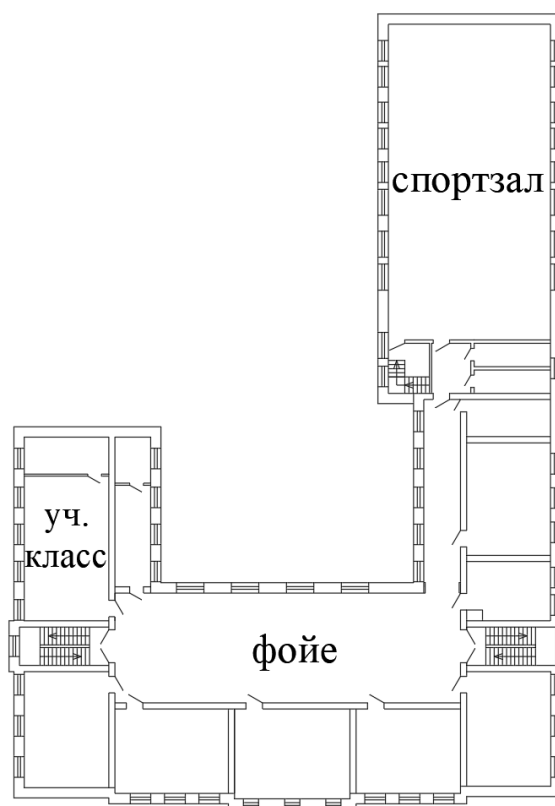


Рисунок 3.29 – Схема плана 2-го этажа школы

Методика измерений определялась поставленными задачами.

Выполненные экспериментальные измерения в зависимости от поставленных задач делятся на две группы. Для оценки шумового режима в отдельных помещениях и определения акустической мощности находящихся в них людей измерения выполнялись одним шумомером. Расчетные точки на схемах обозначены арабскими цифрами. Во втором случае ставилась задача сравнения результатов экспериментального и теоретического исследования распределения звуковой энергии по помещению. В этом случае для учета временных колебаний акустической мощности и определения поправки на переменные параметры источников шума измерялись значения уровней звукового давления двумя шумомерами: в фиксированной и в расчетной точках. Точки обозначены арабскими цифрами с добавлением буквы «а». Продолжительность временного усреднения каждого измерения составляла от 3 до 5 минут. Методика измерения и используемая аппаратура описаны в разделе 2.

Ниже приведены *результаты измерений* и их последующей обработки. При этом с

использованием компьютерной программы на основе выполненных экспериментальных исследований были решены следующие задачи:

- определены уровни акустической мощности речи школьников во время урока физкультуры для младших и средних классов;
- выполнен расчет распространения звуковой энергии через открытую дверь спортзала в фойе во время урока физкультуры для средних классов, и произведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными;
- определены уровни акустической мощности речи школьников во время урока физики для старших классов;
- определены уровни акустической мощности речи школьников во время перемены в фойе школы и в кабинете физики;
- выполнен расчет распространения звуковой энергии через открытую дверь кабинета физики в фойе во время урока, и произведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Определение уровней акустической мощности для учащихся младших и средних классов во время урока физкультуры в спортзале

Спортзал имеет следующие размеры: 23.2 x 11.8 x 5.65(h) м. Отделка помещения: полы дощатые, потолки бетонные, окрашенные, стены оштукатуренные и окрашенные водоземulsionной краской. Средние коэффициенты звукопоглощения спортзала, полученные на основе обработки времени реверберации, приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Время реверберации и средние коэффициенты звукопоглощения спортзала

Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц	Время реверберации T , с	Пространственный коэффициент затухания звука в воздухе, m_a , м ⁻¹	$\bar{\alpha}$ по формуле Сэбина	$\bar{\alpha}$ по формуле Эйринга
125	0.60	0	0.443	0.356
250	0.95	0	0.280	0.243
500	1.79	0	0.148	0.137
1000	2.45	0	0.108	0.102
2000	2.25	0.01	0.118	0.050
4000	1.43	0.02	0.186	0.052
8000	0.65	0.03	0.409	0.189

Перед началом занятий выполнены измерения фонового шума в спортзале. Данные

измерений приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Уровни фонового шума в спортзале

Уровни фонового шума $L_{фон}$, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
36.5	30.3	23.0	17.5	17.0	18.4	21.0	23.1

Измерения проводились по три раза во время урока физкультуры в младших классах (количество учеников – 31; т. 1–3) и в средних классах (количество учеников – 25; т. 4–6). Общее время измерений составило 9 минут. Во время эксперимента двери в спортзал были закрыты. Расчетная точка находилась на расстоянии 2 м от продольной стены.

Результаты измерения приведены в таблице 3.11. В таблице также приведены средние значения уровней $\bar{L}$, дБ.

Таблица 3.11 – Эквивалентные уровни звукового давления в точках т.1 – 6

N точки	Эквивалентные уровни звукового давления L , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	63.97	66.02	64.07	74.76	83.06	79.98	69.14	54.14
2	64.58	67.41	65.86	72.17	78.25	74.60	66.05	52.06
3	68.27	70.04	68.34	75.38	85.31	84.45	73.61	58.23
$\bar{L}_{1-3}$	65.61	67.82	66.09	74.10	82.21	79.68	69.60	54.81
4	66.97	76.02	64.07	65.76	73.06	71.98	69.14	54.14
5	69.18	78.13	66.37	67.31	75.63	73.23	71.48	55.68
6	64.01	71.54	72.51	73.09	71.90	72.05	61.85	55.81
$\bar{L}_{4-6}$	66.72	75.23	67.65	68.72	73.53	72.42	67.49	55.21

Акустическая мощность речи школьников во время урока физкультуры определялась на основе решения обратной задачи. В этом случае с помощью компьютерной программы выполнялся расчет прямого звука в расчетной точке, а затем, исходя из условия совпадения измеренных и рассчитанных уровней звукового давления, подбирались акустическая мощность плоского источника шума, которым является вся группа школьников. Результаты определения акустической мощности речи школьников приведены в таблице 3.12. Из табл. 3.12 видно, что акустическая мощность речи учеников младших классов выше мощности речи ученика средних классов в среднем на 4–5 дБ, а на частоте 2000 Гц – на 7.7 дБ.

Таблица 3.12 – Результаты расчета акустической мощности речи учащихся младшего (т. 1–3) и среднего (т. 4–6) классов

Время образовательного процесса	Уровни акустической мощности речи L_{WP} , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Во время урока младших классов	-	73.0	70.2	75.2	82.0	80.2	72.7	62.1
Во время урока средних классов	-	78.9	69.8	68.0	73.3	72.5	68.5	60.5

Сравнение измеренных и рассчитанных уровней звукового давления в смежных помещениях (спортзал и коридор)

Измерения проводились во время урока для средних классов (количество учеников составляло 25 человек) одновременно двумя шумомерами. Расчетные точки показаны на рисунке 3.30. Также были выполнены измерения фонового шума в коридоре, примыкающем к фойе школы (см. табл. 3.13). Двери во все помещения были закрыты. Результаты измерений в точках 7, 7а, 8, 8а, а также средние значения уровней в т. 7–8, приведены в таблице 3.14.

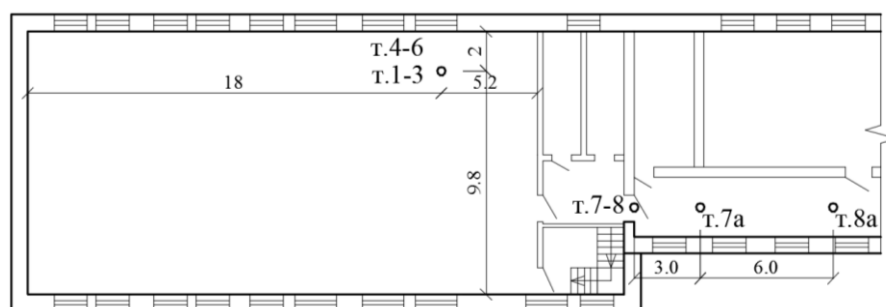


Рисунок 3.30 – План спортзала и смежных помещений с расчетными точками (повернут на 90° влево относительно рис. 3.29)

Таблица 3.13 – Уровни фонового шума в коридоре

Уровни фонового шума $L_{фон}$, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
49.2	43.4	49.6	49.5	46.1	41.0	34.4	23.7

Перед началом расчета были скорректированы значения звукового давления в расчетных точках с поправкой на различия во времени шумового режима в контрольных точках. Корректирующая поправка находилась по данным таблицы 3.14, как степень отклонения уровня звукового давления в заданный момент времени от среднего значения в определенной фиксированной точке.

Таблица 3.14 – Эквивалентные уровни звукового давления во время урока в спортзале в расчетных точках т. 7–8 и т. 7а–8а

N точки	Эквивалентные уровни звукового давления L , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
7	64.01	60.77	59.79	62.20	67.99	68.75	62.46	42.27
8	61.37	57.72	55.05	57.78	66.96	67.23	57.56	37.55
$\bar{L}_{7-8}$	62.69	59.25	57.42	59.99	67.48	67.99	60.01	39.91
7а	61.23	54.61	51.80	55.15	59.61	59.23	52.21	33.05
8а	61.82	54.75	50.43	52.64	54.72	53.75	43.65	32.21

Во время эксперимента двери в помещение, соединяющее спортзал и коридор, были открыты. Коридор и фойе оставались пустыми.

При расчетах принято, что школьники в спортзале представляют собой плоский источник с равномерно распределенными акустическими характеристиками акустической мощности, который можно разбить на ряд точечных источников. При выполнении расчетов плоскость источника представлялась в виде 905 точечных источников звука, располагающихся равномерно на плоскости в ячейках 0.5 x 0.5 м. Акустическая мощность речи школьников задавалась согласно табл. 3.12 как для учеников средних классов.

Расчет в коридоре был выполнен в диапазоне частот от 250 до 8000 Гц. Частоты 63 и 125 Гц не учитывались в связи с тем, что наблюдались локальные колебания звукового давления от шума спортзала из-за значительных длин волн на этих частотах, сопоставимых с характерными размерами коридора.

Значения рассчитанных уровней и результаты их сравнения с данными измерений приведены в таблице 3.15.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных в точках т. 7, т. 8 и т. 7а показало хороший результат. Расхождения не превышают 2.5 дБ во всем частотном диапазоне. В то же время, в наиболее удаленной от источника шума расчетной точке т.8а в октавной полосе со среднегеометрической частотой 8000 Гц наблюдается расхождение до 5.9 дБ между рассчитанным и измеренным значениями уровней. Это связано с влиянием высокого уровня фонового шума.

На рисунке 3.31 показана шумовая карта распределения звуковой энергии от спортзала по коридору и фойе школы на частоте 1000 Гц, построенная с помощью компьютерной программы.

Таблица 3.15 – Результаты измерений расчета уровней звукового давления в исследуемых точках помещений

N точки	Уровни, дБ, на октавной частоте 250 Гц			Уровни, дБ, на октавной частоте 500 Гц			Уровни, дБ, на октавной частоте 1000 Гц		
	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL
т.7-8	57.4	59.9	-2.5	60.0	62.1	-2.1	67.5	67.4	0.1
т.7а	49.4	51.5	-2.1	52.9	53.9	-1.0	59.1	59.1	0.0
т.8а	52.8	49.1	3.7	54.9	51.6	3.3	55.2	56.7	-1.5

Окончание табл. 3.15

N точки	Уровни, дБ, на октавной частоте 2000 Гц			Уровни, дБ, на октавной частоте 4000 Гц			Уровни, дБ, на октавной частоте 8000 Гц		
	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL
т.7-8	68.0	66.4	1.6	60.0	59.8	0.2	39.9	44.2	-4.3
т.7а	58.5	58.2	0.3	49.8	50.2	-0.4	30.7	33.1	-2.4
т.8а	54.5	55.8	-1.3	46.1	46.9	-0.8	34.6	28.7	5.9

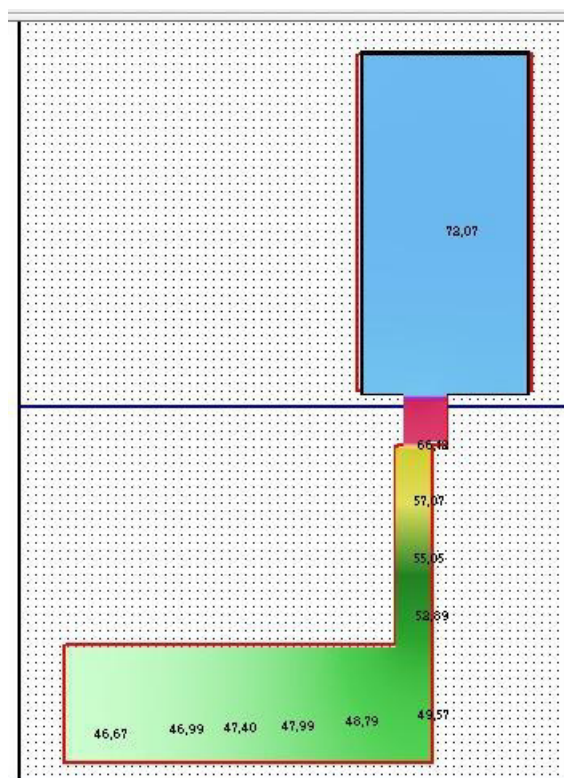


Рисунок 3.31 – Шумовая карта смежных помещений школы (спортзала и фойе) от шума спортзала во время урока физкультуры на среднегеометрической частоте 1000 Гц

Расчет уровней акустической мощности речи учащихся средних классов во время урока физики и во время перемены в кабинете физики

Кабинет имеет размеры 10.7 x 6.1 x 3.45(h) м. Отделка помещения: полы дощатые,

потолки беленные, стены оштукатуренные, окрашенные водоэмульсионной краской. Средние коэффициенты звукопоглощения помещения приведены в таблице 3.16.

Перед началом занятий было выполнено определение фонового шума в кабинете физики. Результаты измерений приведены в таблице 3.17.

Измерения проводились во время урока физики для учеников 7 класса (количество учеников – 22; т.9) и во время перемены (количество учеников – 8; т.10). точки измерения показаны на рисунке 3.32. Время усреднения измерений составило 5 минут. Во время измерений все двери в кабинет были закрыты. Расчетная точка находилась в центре помещения. Результаты измерения уровней звукового давления в расчетных точках приведены в таблице 3.18.

Акустическая мощность речи школьников определялась по алгоритму, приведенному выше для спортзала. Результаты расчета уровней акустической мощности речи приведены в таблице 3.19.

Таблица 3.16 – Время реверберации и средние коэффициенты звукопоглощения помещения кабинета физики

Среднегеометрическая частота f , Гц	Время реверберации T , с	Пространственный коэффициент затухания звука в воздухе, m_a , м ⁻¹	$\bar{\alpha}$ по формуле Сэбина	$\bar{\alpha}$ по формуле Эйринга
125	0.92	0	0.16	0.15
250	1.12	0	0.13	0.12
500	1.25	0	0.12	0.11
1000	1.28	0	0.12	0.11
2000	1.36	0.01	0.11	0.10
4000	1.49	0.02	0.10	0.09
8000	0.81	0.03	0.18	0.17

Таблица 3.17 – Уровни фонового шума в кабинете физики

Уровни фонового шума $L_{фон}$, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
37.3	28.9	32.1	30.8	30.7	27.1	17.7	15.6

Таблица 3.18 – Эквивалентные уровни звукового давления в точках т.9 – 10

N точки	Эквивалентные уровни звукового давления L , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
9	57.11	54.19	60.16	59.98	59.40	54.25	49.73	44.79
10	69.29	62.09	67.91	70.21	70.25	64.01	58.23	50.20

Таблица 3.19 – Результаты расчета акустической мощности речи учащихся 7-го класса во время урока (т.9) и во время перемены (т.10)

N точки	Уровни акустической мощности речи L_{WP} , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
9	-	51.3	56.3	55.8	55.3	49.4	45.6	44.3
10	-	63.7	68.5	70.5	70.7	63.6	58.5	54.1

Из табл. 3.19 видно, что акустическая мощность речи ученика во время урока меньше, чем во время перемены в среднем на 10–15 дБ.

Расчет уровней акустической мощности речи учащихся во время перемены в фойе школы

Фойе имеет размеры 25.2 x 8.0 x 3.95(h) м. Отделка помещения: полы дощатые, потолки беленые, стены оштукатуренные, окрашенные водоэмульсионной краской. Средние коэффициенты звукопоглощения помещения фойе, полученные на основе обработки времени реверберации, приведены в таблице 3.20.

Таблица 3.20 – Время реверберации и средние коэффициенты звукопоглощения фойе

Среднегеометрическая частота f , Гц	Время реверберации T , с	Пространственный коэффициент затухания звука в воздухе, m_a , м ⁻¹	$\bar{\alpha}$ по формуле Сэбина	$\bar{\alpha}$ по формуле Эйринга
125	1.02	0	0.19	0.17
250	1.56	0	0.12	0.12
500	1.74	0	0.11	0.11
1000	1.99	0	0.10	0.09
2000	2.11	0.01	0.09	0.04
4000	1.47	0.02	0.13	0.04
8000	1.11	0.03	0.18	0.03

Перед началом занятий были выполнены измерения фонового шума в фойе школы. Результаты измерений фонового шума даны в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Уровни фонового шума в фойе

Уровни фонового шума $L_{фон}$, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
35.5	29.5	22.0	16.8	16.0	17.4	19.9	22.3

Измерения проводились во время перемены (количество учеников – 50; т.11 – 12). Время усреднения измерений составило 8 минут. Расчетная точка находилась в центре

помещения. Результаты измерения уровней звукового давления в расчетных точках приведены в таблице 3.22. В табл. 3.22 также приведены средние значения $\bar{L}$, дБ.

Таблица 3.22 – Эквивалентные уровни звукового давления в точках т.11 - 12

N точки	Эквивалентные уровни звукового давления L , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
11	68.52	63.23	69.76	75.90	74.16	69.39	61.67	49.48
12	73.64	66.72	70.58	75.77	74.64	68.51	61.63	50.65
$\bar{L}_{11-12}$	71.08	64.98	70.17	75.84	74.40	68.95	61.65	50.07

Результаты расчета уровней акустической мощности речи школьников во время перемены приведены в таблице 3.23.

Таблица 3.23 – Результаты расчета акустической мощности речи учащихся во время перемены (т.11 – 12)

N точки	Уровни акустической мощности речи L_{wp} , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
11-12	-	63.5	66.5	71.8	70.0	64.4	59.3	50.4

Сравнение измеренных и рассчитанных уровней звукового давления в смежных помещениях (кабинет и фойе)

Измерения производились во время урока учащихся 7-го класса (количество учеников составляло 22 человека) одновременно двумя шумомерами. Расчетные точки показаны на рисунке 3.32. Во время проведения эксперимента дверь в кабинет была открытой, а в остальные классы закрыты. Фойе на протяжении эксперимента оставалось пустым. Результаты измерений, а также среднее значение в т.13 – 15, приведены в таблице 3.24. во время проведения уроков перед началом эксперимента также были выполнены измерения фонового шума в фойе. При определении фонового шума двери в кабинеты были закрыты. Результаты определения фонового шума даны в таблице 3.25.

Корректирующая поправка находилась аналогично, как и при измерениях в спортзале и коридоре.

При выполнении расчетов плоскость источника представлялась в виде 180 точечных источников звука, равномерно располагающихся на плоскости с ячейкой 0.5x0.5 м. Расчет проводился при помощи компьютерной программы. Акустическая мощность речи

школьников задавалась согласно табл. 3.18.

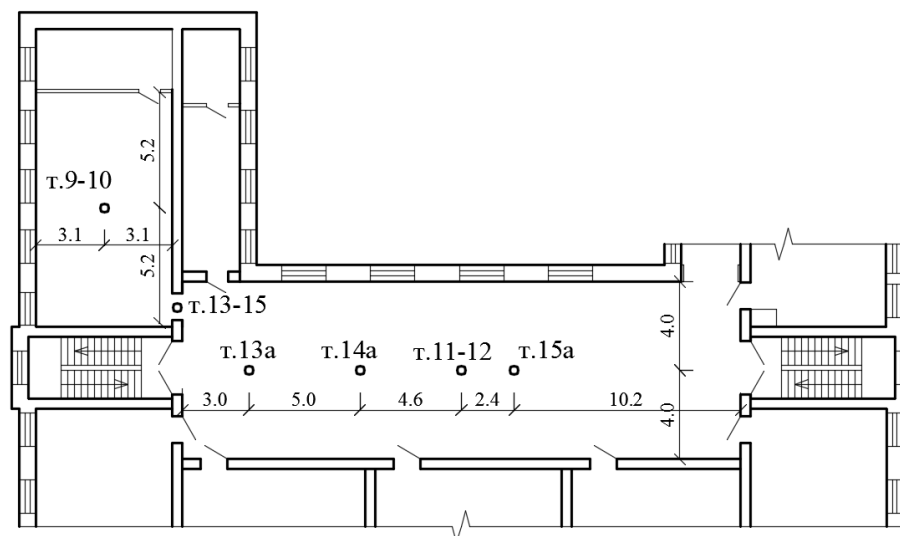


Рисунок 3.32 – План кабинета физики и смежных помещений с расчетными точками

Таблица 3.24 – Эквивалентные уровни звукового давления в расчетных точках во время урока в фойе (т.13а – 15а) и кабинете физики (т.13 – 15), дверь в кабинет открыта

N точки	Эквивалентные уровни звукового давления L , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
13	45.84	44.45	53.11	52.80	52.27	46.37	42.88	38.26
14	51.29	46.19	55.74	56.30	56.40	49.36	44.23	39.79
15	49.69	48.81	55.83	58.00	55.20	52.08	50.02	43.44
$\bar{L}_{13-15}$	48.94	46.48	54.89	55.70	54.62	49.27	45.71	40.50
13a	44.06	39.67	47.62	48.03	47.56	42.16	34.39	27.73
14a	52.08	40.91	48.12	48.97	48.80	42.91	35.65	24.68
15a	51.45	43.04	47.81	49.20	46.07	41.63	36.51	26.64

Таблица 3.25 – Уровни фонового шума в фойе

Уровни фонового шума $L_{фон}$, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
48.1	42.3	48.5	48.4	45.1	40.0	33.4	22.6
50.0	38.2	41.9	45.4	45.5	39.0	31.0	24.7

Расчеты выполнены в октавных полосах частот в диапазоне от 125 до 8000 Гц. Значения рассчитанных уровней звукового давления и их сравнение с данными измерений приведены в таблице 3.26.

На рисунке 3.33 приведена шумовая карта распространения звуковой энергии от кабинета в фойе школы на частоте 1000 Гц.

Уровни звукового давления, полученные экспериментально и путем расчета,

имеют хорошее согласование. Расхождения не превышают 2.8 дБ. Результаты свидетельствуют о надежности выбранного метода расчета. Уровни звуковой энергии, создаваемые во время урока физики в помещении фойе на расстоянии до 8 м от кабинета, сопоставимы с фоновым шумом, а на расстоянии более 8 м совсем не оказывают влияния на шумовой режим.

Таблица 3.26 – Результаты измерений и расчета уровней звукового давления в исследуемых точках фойе

N точки	Уровни, дБ, на октавной частоте 125 Гц			Уровни, дБ, на октавной частоте 250 Гц			Уровни, дБ, на октавной частоте 500 Гц			Уровни, дБ, на октавной частоте 1000 Гц		
	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL
13-15	46.5	48.0	-1.5	54.9	54.1	0.8	55.7	54.3	1.4	54.6	53.6	1.0
13a	39.7	41.9	-2.2	47.6	48.6	-1.0	48.0	49.5	-1.5	47.6	48.6	-1.0
14a	40.9	40.9	0.0	48.1	47.6	0.5	49.0	48.7	0.3	48.8	47.8	1.0
15a	43.0	40.2	2.8	47.8	46.6	1.2	49.2	48.0	1.2	46.1	46.9	-0.8

Окончание табл. 3.26

N точки	Уровни, дБ, на октавной частоте 2000 Гц			Уровни, дБ, на октавной частоте 4000 Гц			Уровни, дБ, на октавной частоте 8000 Гц		
	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL	$L_{изм}$	$L_{рас}$	ΔL
13-15	49.3	48.3	1.0	45.7	43.1	2.6	40.5	38.4	2.1
13a	42.2	43.3	-1.1	34.4	36.1	-1.7	27.7	28.7	-1.0
14a	42.9	42.4	0.5	35.7	34.5	1.2	24.7	26.6	-1.9
15a	41.6	41.5	0.1	36.5	32.9	3.6	26.6	24.9	1.7

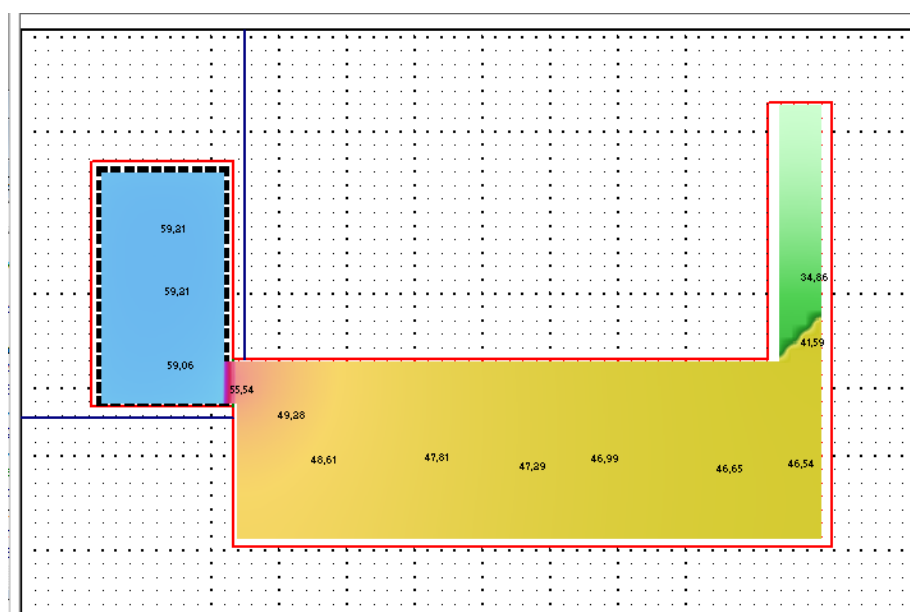


Рисунок 3.33 – Шумовая карта смежных помещений (кабинета и фойе) при шуме в кабинете во время урока физики на среднегеометрической частоте 1000 Гц

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Разработаны два новых метода расчета прямого звука на объектах с массовым нахождением на них разговаривающих людей, а именно, метод компьютерного моделирования прямого звука, излучаемого разговаривающими людьми как точечными источниками и метод расчета прямого звука от разговаривающих людей как от равномерно излучающей звуковую энергию плоскости. Анализ расчетов прямого звука разработанными методами в тестовом помещении показал, что результаты расчетов хорошо согласуются между собой. При этом второй метод при определенных условиях обладает меньшей трудоемкостью.

2. Разработаны методики расчета шума в помещениях с массовым пребыванием людей при различном характере отражения звука от ограждений. Для расчетов при зеркальном отражении звука предложены методики оценки отраженной составляющей шума на основе геометрических методов мнимых источников и прослеживания лучей. Для расчетов при диффузном отражении звука предложена методика расчета отраженной составляющей шума на основе численного статистического энергетического метода. Для расчетов при зеркально-диффузном отражении звука предложена методика определения отраженного шума на основе комбинированной расчетной модели, в которой расчет зеркальной составляющей отраженного шума выполняется методом прослеживания лучей, а диффузной составляющей численным статистическим энергетическим методом. Анализ расчетов с использованием разработанных методик для тестового помещения показал, что при одинаковых условиях результаты расчетов хорошо согласуются между собой.

3. Разработанные методы и методики расчета шумовых полей объектов с массовым пребыванием людей алгоритмизированы и реализованы в виде компьютерных программ. Компьютерные программы построены по модульному принципу с элементами объектно-ориентированного программирования. Программы предназначены для расчета энергетических параметров шума и проектирования архитектурно-планировочных и конструктивных средств защиты от шума.

4. Для удобства использования все программы объединены в общую комбинированную программу. Программа позволяет производить оценку распространения энергии прямого звука от источников шума в виде скопления людей при различных геометрических формах источников и направленности их излучения. При расчете отраженной составляющей шума в помещениях в программе реализованы зеркальный, диффузный и

зеркально-диффузный характер отражения звука от ограждений.

5. Разработанные методы и методики расчета дают возможность производить оценку распространения звуковой энергии на объектах с массовым пребыванием людей. Компьютерное моделирование позволяет выполнять оценку акустической эффективности принимаемых мер снижения шума и производить целенаправленный выбор и проектирование наиболее экономичных средств акустического благоустройства.

6. Экспериментальные проверки предложенных методов расчета прямого звука на стадионе во время футбольного матча и разработанных методик оценки шумового режима в помещениях с массовым пребыванием людей показали их достаточную для практических расчетов точность. Расхождение экспериментальных и расчетных данных в большинстве случаев не превышает ± 3 дБ.

ГЛАВА 4 РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ПОМЕЩЕНИЙ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕГОРОДОК НЕПОЛНОЙ ВЫСОТЫ

В современном строительстве торговых и офисных зданий широко используются универсальные объемно-планировочные решения со свободной планировкой. Свободная планировка обеспечивается за счет применения мобильных или легко монтируемых перегородок. За счет таких перегородок (см. рис. 4.1) создаются локальные рабочие пространства с необходимой степенью изолированности и конфиденциальности. Легкая перепланировка позволяет быстро подстраивать процесс под изменяющиеся условия или под новые функциональные процессы.



Рисунок 4.1 – Пример помещения с мобильными перегородками неполной высоты

4.1 Использование перегородок неполной высоты для обеспечения акустического комфорта в помещениях с массовым пребыванием людей

Перегородки неполной высоты используются в офисных, торговых помещениях, вокзалах, выставочных залах и т.п. В таких помещениях, как правило, одновременно находится большое количество персонала и посетителей, обменивающихся речевой информацией, в связи с чем их можно отнести к сооружениям с массовым пребыванием людей.

Открытая планировка внутренних объемов зданий без выгораживания части

пространства имеет ряд недостатков: персонал часто отвлекается от выполнения своих обязанностей; шумовая нагрузка снижает производительность труда и приводит к снижению качества работы; шум различных источников беспрепятственно распространяется по всему пространству, снижая слышимость и разборчивость полезных сигналов; снижается конфиденциальность общения. Эти недостатки устраняются в случае **кабинетной** (в офисных) (см. рис. 4.1) или **боксовой** (в торговых помещениях, см. рис. 4.2, г) планировки. На рис. 4.2,в показана планировка выставочного зала, а на рис. 4.2,б - классическая планировка картинной галереи анфиладного типа с перегородками неполной высоты. В торговых помещениях роль перегородок часто выполняют стеллажи с товарами. Широко распространена **смешанная** система планировки, когда наряду с открытым пространством, залом или клиентской зоной имеются отгороженные пространства (рис. 4.2, а). Такой тип планировки используется в многофункциональных центрах, на вокзалах, в офисах, где происходит работа с клиентами. Все перечисленные типы планировок встречаются и в промышленных помещениях.

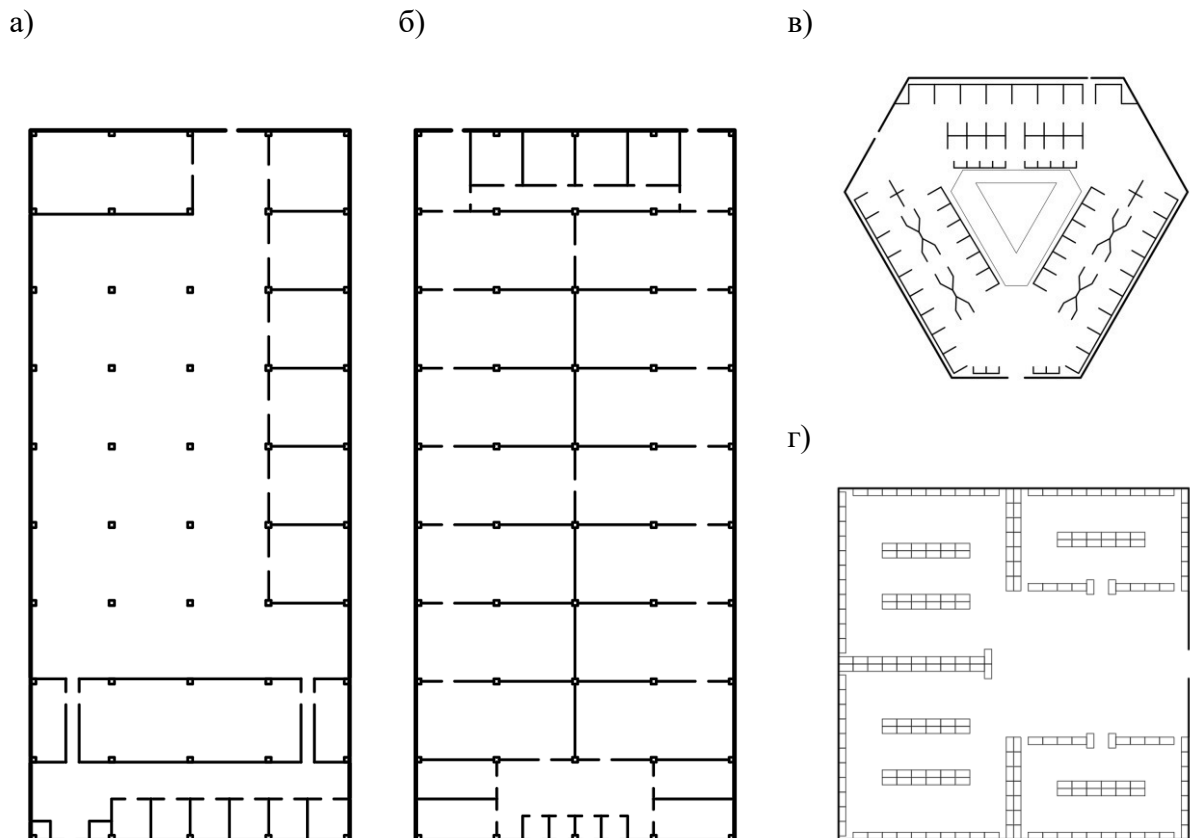


Рисунок 4.2 – Варианты планировок помещений с перегородками неполной высоты

Конструктивные решения перегородок весьма разнообразны. С точки зрения крепления перегородки бывают стационарные, мобильные, временные. В некоторых

классификациях мобильные и временные перегородки объединены в одну группу. **Мобильными** перегородками считаются передвижные перегородки, которые перемещаются по направляющим профилям, закрепленным на потолке или на полу, а также складывающиеся или трансформирующиеся перегородки. В сложенном состоянии эти перегородки размещаются в определенном месте. **Временные** перегородки не крепятся к ограждающим конструкциям здания. Их легко устанавливать, складывать и переносить или передвигать. Временные перегородки как правило имеют модульную конструкцию. К временным перегородкам можно отнести ширмы и настольные экраны.

По конструктивному решению перегородки бывают каркасные и бескаркасные, глухие и остекленные. Стекло может быть прозрачным, тонированным, рифленным и матовым в виде листового стекла, стеклопакетов, стеклопрофилей и стеклоблоков. Материал перегородок: на растворе из кирпичей, пенобетона, пазогребневых элементов, гипсовых плит; из металлопластика, гипсокартонных плит, деревянных и металлических профилей и т. д.

К перегородкам могут предъявляться требования звукоизоляции и звукопоглощения. Требованиям звукоизоляции могут отвечать только стационарные перегородки. Мобильные и временные перегородки имеют неплотности примыканий, из-за чего их звукоизоляция значительно снижается. Для перегородок неполной высоты требования по звукоизоляции или отсутствуют, или являются достаточно низкими.

За счет высоких звукопоглощающих свойств перегородок можно существенно снизить отраженный звук и улучшить акустический комфорт в помещениях. Однако, при большом многообразии звукопоглощающих материалов специальные звукопоглощающие перегородки неполной высоты применяются редко. Возможно, одной из причин ограниченного применения таких перегородок является отсутствие серьезных научных разработок эффективности и целесообразности регулирования акустического режима помещений за счет использования звукопоглощающих материалов в перегородках неполной высоты.

4.2 Особенности формирования шумового режима в помещениях с перегородками неполной высоты

На шумовой режим помещений оказывают влияние внешние и внутренние

источники шума. Анализ мер снижения шума в зданиях показывает, что в настоящее время основное внимание уделяется проблемам снижения шума от внешних источников шума. Для этого разработаны достаточно надежные, подтвержденные многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями методы ограничения проникновения шума в помещения извне. При правильном их использовании на стадии проектирования и строительства они позволяют обеспечить выполнение нормативных требований.

Перегородки оказывают существенное влияние на формирование отраженного звукового поля помещения: возрастает изотропность звукового поля, изменяется структура поля, уменьшается средняя длина свободного пробега звуковых волн, изменяется эффективность звукопоглощающих конструкций и т. п. Перечисленные факторы приводят к изменению энергетических параметров звукового поля помещения: времени реверберации, распределению отраженной звуковой энергии.

Перегородки, как и другие рассеивающие звук элементы, изменяют фронт отраженных звуковых волн. В случае упорядоченного расположения перегородок эти изменения можно смоделировать, и оценить степень влияния перегородок или рассеивающих звук элементов на структуру звукового поля. Под структурой в данном случае понимается степень изменения излучаемых источником шума сферических или плоских звуковых волн, наличие групп лучей (волн) с близкими характеристиками, распределение энергии между группами осевых, касательных и косых волн, степень диффузно отраженной энергии, соотношение зеркально и диффузно отраженной энергии и т. д.

4.2.1 Исследование структуры звукового поля в помещении с перегородками неполной высоты

Рассматривается начальный этап распространения звука, когда плоские или сферические волны из ячейки с источником шума, отразившись от плоской поверхности потолка, попадают в другую ячейку, образованную перегородками. Методами компьютерного моделирования исследовано изменение параметров звуковых волн после выхода из ячейки обратно в верхнюю зону помещения.

Рассмотрим пучок плоских звуковых волн, которые попадают в ячейку, огороженную перегородками неполной высоты (см. рис. 4.3). Фронт волн удобно представлять в виде набора отдельных лучей. На рисунке показан пример траекторий трех лучей,

попадающих в ячейку под разными углами.

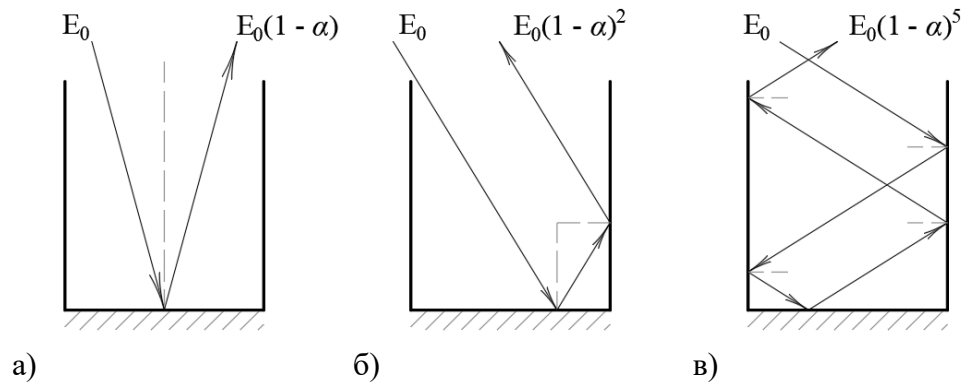


Рисунок 4.3 – Траектории движения лучей в пространстве между перегородками

Возвращаясь из ячеек в верхнюю зону помещения, лучи теряют часть своей первоначальной энергии E_0 за счет ее поглощения ограждениями α в зависимости от угла падения лучей θ . Минимальное снижение энергии $E_0(1 - \alpha)$ происходит в том случае, когда луч отражается только от поверхности пола при малых углах θ (рис. 4.3, а), максимальное снижение $E_0(1 - \alpha)^5$ происходит при наклонном падении лучей (рис. 4.3, в). В зависимости от количества актов взаимодействия луча с перегородками направление луча или сохраняется (рис. 4.3, а, в), или меняется на противоположное (рис. 4.3, б). Таким образом, совокупность перегородок неполной высоты вызывает изменение падающих на нее звуковых потоков. Величина и характер этого воздействия зависят, прежде всего, от геометрических параметров перегородок или других подобных препятствий на путях распространения звука.

В данном разделе рассматривается простейшая ситуация, когда перегородки образуют регулярную структуру из одинаковых ячеек в форме прямоугольных параллелепипедов. Звуковые волны падают параллельно одной из сторон ячейки в одном направлении под различными углами падения от 0 до 90° . Отражение звуковых волн (лучей) принято зеркальным.

Разработан алгоритм построения индикатрисы отраженного звука от ячейки помещения, образованной перегородками неполной высоты. Алгоритм основан на построении развертки траектории движения луча. При этом строятся зеркальные ячейки, от поверхностей которых отражается луч на своем пути. В качестве примера на рис. 4.4 построена траектория движения и отражения луча из примера на рис. 4.3, в.

Траектория луча задается координатой вхождения луча в ячейку x_n и углом θ .

Координата выхода луча из ячейки равна

$$x_k = x_n + 2h \cdot \operatorname{ctg}(\theta), \quad (4.1)$$

где h – высота ячейки; $2h \cdot \operatorname{ctg}(\theta)$ определяет горизонтальное расстояние, пройденное лучом в ячейке.

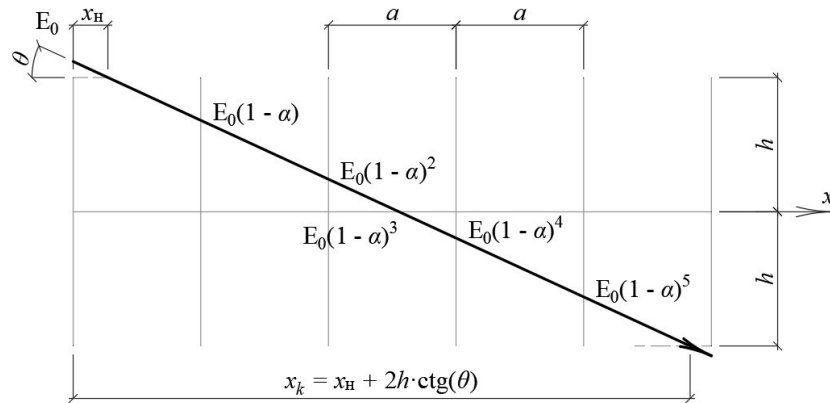


Рисунок 4.4 – Развертка траектории движения луча: a , h – ширина и высота ячейки

Влияние ячейки на падающие звуковые волны (лучи) определяется изменением траектории движения отраженных лучей и уменьшением их энергии. Изменение энергии можно характеризовать средним или диффузным коэффициентом звукопоглощения.

Координаты x_n и x_k определяют последовательность и количество актов отражения луча от перегородок. Количество отражений определяется количеством перегородок, пересекаемых лучом, на рис. 4.4 таких пересечений четыре. В случае четного количества актов отражения луч при выходе из ячейки будет двигаться как при зеркальном отражении от плоской поверхности. При нечетном количестве – отраженный луч меняет направление движения на противоположное навстречу падающему лучу. Следует иметь в виду, что количество актов отражения луча может зависеть от координаты x_n . Например, увеличение этой координаты на рис. 4.4 приводит к дополнительному пятому отражению луча от перегородки и к обратному развороту отраженного луча.

Количество актов отражения луча от ограждений ячейки влияет на уменьшение энергии отраженного луча. Наименьшее снижение энергии наблюдается у лучей с нормальным падением в пространство ячейки ($\theta \approx 0$, см. рис. 4.3, а), а наибольшее – у скользящих лучей (см. рис. 4.3, в).

Разработана компьютерная программа по построению индикатрисы распределения интенсивности звука, отраженного от ячейки помещения из перегородок неполной

высоты. Индикатриса получается в результате усреднения N лучей с углами падения $\theta \in \{0 \dots 90^0\}$ в K начальных точках с $x_n \in \{0 \dots a\}$, при этом общее количество рассматриваемых лучей $N_{\text{сум}} = N \cdot K$. Здесь и далее графики индикатрисы нормализованы следующим образом: все угловые значения функции распределения отраженных величин (количества лучей или интенсивности звуковой энергии) на графиках показаны как доли от максимального значения.

Вначале анализируется индикатриса отражения при отсутствии изменения энергии отраженного звука ($\alpha = 0$). Этот анализ полезен для оценки соотношения количества лучей, отраженных зеркально N_z (в направлении поступления исходных лучей), и отраженных обратно $N_{\text{об}}$ - навстречу исходным лучам $N_{\text{сум}} = N_z + N_{\text{об}}$.

На рисунке 4.5 показаны индикатрисы распределения отраженных лучей от ячеек с разными пропорциями $h/a = 1/3; 1; 3$ (высота/ширина ячейки). Графики нормализованы, за единицу принято максимальное количество лучей в одном из 40 направлений. Рассматривалось поступление 600 лучей равномерно по всей поверхности верхней зоны ячейки.

При относительно высоких перегородках ($h/a > 1$) количество обратно отраженных лучей $N_{\text{об}}$ составляет 55% от общего количества лучей. С уменьшением высоты ячеек доля таких лучей снижается и составляет $N_{\text{об}} \approx 47\%$ при $h/a = 1/3$. При дальнейшем снижении высоты перегородок или других регулярных преград $N_{\text{об}}$ составляет 29% при $h/a = 1/8$.

Сравнение диаграмм рис. 4.5 показывает, что с увеличением относительной глубины ячеек h/a диаграмма индикатрисы приближается к полукругу и становится более равномерной.

Выполнены исследования влияния звукопоглощающих свойств поверхностей ограждений ячейки (перегородок и пола) на индикатрисы «первого»¹ отражения звука. На рис. 4.6 показаны индикатрисы отражений для двух ячеек с пропорциями $h/a = 1$ и 3, средние коэффициенты звукопоглощения ограждений ячейки принимали значения $\alpha = 0; 0.1; 0.3$. Вследствие принятой системы нормализации графики на рис. 4.6 предназначены для оценки формы индикатрис отражения.

Изменение формы индикатрис отражения подтверждают влияние угла падения лучей на уменьшение их энергии после выхода из ячейки. С ростом угла падения степень уменьшения энергии возрастает. С ростом коэффициента звукопоглощения

¹ термин «первое» отражение записан для сокращения записи «индикатриса распределения энергии лучей на выходе их из ячейки после их многократного отражения от внутренних поверхностей ячейки»

распределение отраженной энергии все в большей степени концентрируется в направлении нормали к ячейке (перпендикулярно к поверхности пола) и приближается к зависимости Ламберта пропорционально косинусу угла отражения.

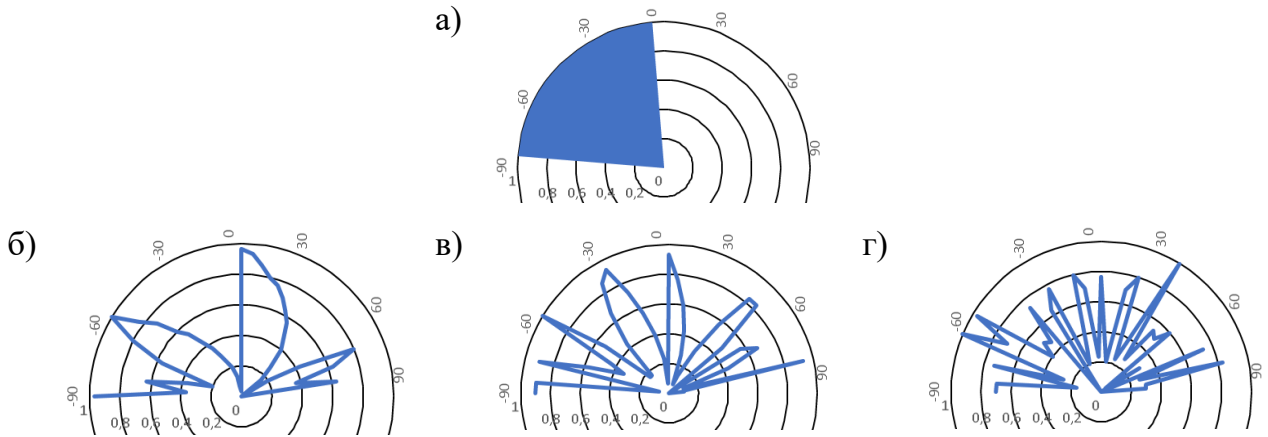


Рисунок 4.5 – Индикатрисы отражения звука ячейкой: а) распределение падающих лучей; б) распределение отраженной энергии при отношении размеров ячейки 1/3; в) $h/a = 1$; г) $h/a = 3$

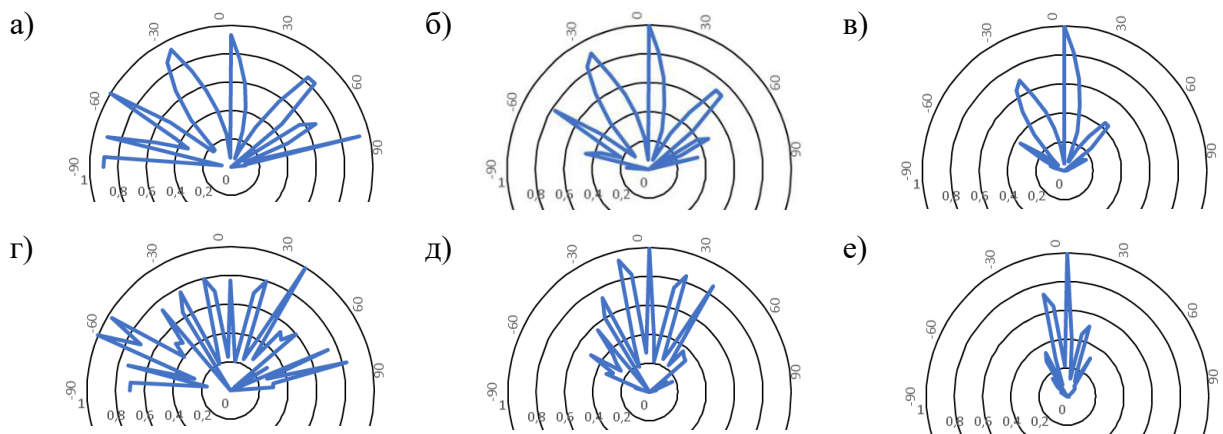


Рисунок 4.6 – Индикатрисы «первого» отражения звука от ячейки с учетом уменьшения энергии лучей за счет звукопоглощения отражающих поверхностей ограждений:

- а) $h/a = 1, \alpha = 0$; б) $h/a = 1, \alpha = 0.1$; в) $h/a = 1, \alpha = 0.3$;
г) $h/a = 3, \alpha = 0$; д) $h/a = 3, \alpha = 0.1$; е) $h/a = 3, \alpha = 0.3$

В таблице 4.1 приведены рассчитанные условные коэффициенты звукопоглощения ячеек α_n . Эти коэффициенты рассчитаны как отношение суммарной энергии лучей, покидающих ячейку, к суммарной энергии лучей при их входе в ячейку. С учетом многократного отражения лучей, попадающих в ячейку под большим углом, эти коэффициенты значительно больше среднего коэффициента звукопоглощения ограждений. Степень увеличения составляет от 1.7 до 7.7.

С ростом среднего коэффициента звукопоглощения ограждений степень

увеличения условного коэффициента звукопоглощения снижается за счет роста относительного вклада мало уменьшающейся энергии лучей, попадающих в ячейку вертикально (нормально). Во всех случаях наблюдается снижение энергии отраженных лучей с ростом относительной глубины ячеек (h/a).

Таблица 4.1 – Значения условных коэффициентов звукопоглощения ячейки из перегородок по первому отражению звука

Пропорции ячейки, h/a	Коэффициенты звукопоглощения ограждений ячейки α							
	0.05		0.1		0.2		0.3	
	Условные коэффициенты звукопоглощения ячейки α_{Π}							
	α_{Π}	α_{Π} / α	α_{Π}	α_{Π} / α	α_{Π}	α_{Π} / α	α_{Π}	α_{Π} / α
1/3	0.126	2.5	0.224	2.2	0.381	1.9	0.509	1.7
1/1	0.222	4.4	0.356	3.6	0.540	2.7	0.667	2.2
3/1	0.385	7.7	0.552	5.5	0.732	3.7	0.829	2.8

Полученные условные коэффициенты звукопоглощения ячеек не могут служить исчерпывающими звукопоглощающими характеристиками ячеек. Эти значения получены при равновероятном приходе звуковых лучей с полупространства (см. диаграмму рис. 4.5, а).

Быстрое вырождение скользящих лучей уже после первого акта отражения от ячейки из перегородок приводит к изменению структуры падающего звука для второго и последующих актов звукопоглощения. При следующих актах падения и отражения звуковых лучей от ячеек степень уменьшения их суммарной энергии будет значительно меньше из-за преобладания лучей с направлениями, близкими к нормальному (в вертикальном направлении).

На рис. 4.7 показаны диаграммы распределения энергии лучей после 1, 2 и 3 актов захода их в ячейку с отношением размеров $h/a = 1$ и средним коэффициентом звукопоглощения поверхностей $\alpha = 0.1$. Из графиков видно, что распределение энергии «нормальных» лучей в вертикальном направлении почти не меняется, а доля скользящих лучей постоянно спадает. Разная скорость затухания различных групп лучей приводит к переменным во времени условным коэффициентам звукопоглощения ограждений при каждом акте отражения α_n . В таблице 4.2 показана степень изменения условного коэффициента звукопоглощения энергии 600 лучей, попадающих в ячейку с пропорциями $h/a = 1$ и средним коэффициентом звукопоглощения поверхностей $\alpha = 0.05$.

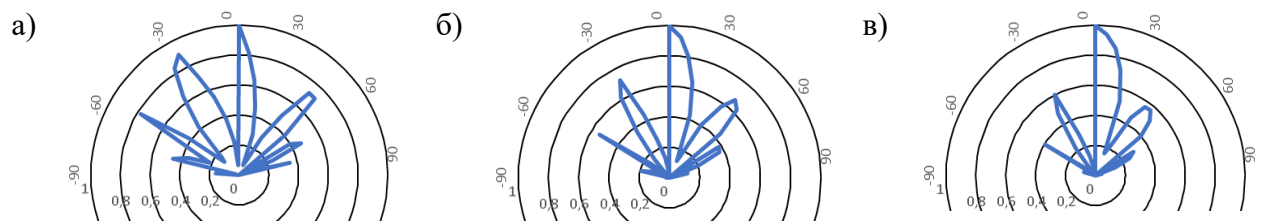


Рисунок 4.7 – Индикатрисы отражения после первого (а), второго (б) и третьего (в) актов попадания лучей в ячейку из перегородок неполной высоты

Таблица 4.2 – Пример расчета условных коэффициентов звукопоглощения ячейки

Параметр	Значение параметра после i актов попадания лучей в ячейку			
	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
$\sum E_{i0}$	600	466	390	332
$\sum E_i$	466	390	332	288
α_{Π}	0.222	0.165	0.146	0.134

Примечание: $\sum E_{i0}$ – сумма энергии всех лучей на входе в ячейку перед i -м актом попадания лучей в ячейку; $\sum E_i$ – то же на выходе из ячейки после i -го акта

Таблица 4.3 – Значения условных коэффициентов звукопоглощения ячейки из перегородок по первому отражению звука

Пропорции, h/a	КЗП, α	Количество актов попадания лучей в ячейку								$\bar{\alpha}_{\Pi}$
		1		2		3		4		
		Условные коэффициенты звукопоглощения ячейки α_{Π}								
		α_{Π}	α_{Π} / α	α_{Π}	α_{Π} / α	α_{Π}	α_{Π} / α	α_{Π}	α_{Π} / α	
1/3	0.05	0.126	2.5	0.108	2.1	0.099	2.0	0.093	1.9	0.11
	0.1	0.225	2.2	0.186	1.9	0.171	1.7	0.163	1.6	0.19
	0.2	0.381	1.9	0.317	1.6	0.296	1.5	0.283	1.4	0.32
	0.3	0.509	1.7	0.430	1.4	0.405	1.3	0.389	1.3	0.44
1/1	0.05	0.222	4.4	0.165	3.3	0.146	2.9	0.134	2.7	0.17
	0.1	0.356	3.6	0.264	2.6	0.233	2.3	0.214	2.1	0.27
	0.2	0.540	2.7	0.409	2.0	0.364	1.8	0.335	1.7	0.42
	0.3	0.667	2.2	0.518	1.7	0.466	1.5	0.434	1.4	0.53
3/1	0.05	0.385	7.7	0.261	5.2	0.219	4.4	0.193	3.8	0.27
	0.1	0.552	5.5	0.374	3.7	0.311	3.1	0.273	2.7	0.39
	0.2	0.732	3.6	0.509	2.6	0.427	2.1	0.379	1.9	0.53
	0.3	0.829	2.7	0.598	2.0	0.511	1.7	0.464	1.5	0.63
Примечание: КЗП – средний коэффициент звукопоглощения ограждений ячейки										

Условные коэффициенты звукопоглощения ячеек из перегородок неполной высоты после нескольких актов попадания в них разнонаправленных лучей приведены в таблице 4.3 и на графиках рис. 4.8. Степень увеличения скорости затухания энергии в помещении с перегородками неполной высоты по сравнению со скоростью затухания в пустом помещении предлагается оценивать коэффициентом $K_{\Pi} = \alpha_{\Pi} / \alpha$. Можно отметить, что в

ячейках с одинаковыми геометрическими параметрами коэффициенты K_{Π} связаны соотношениями с актами попадания в ячейки и коэффициентом звукопоглощения ограждений. Например, в ячейке с параметрами $h/a = 1$ при $\alpha = 0.2$ и одном акте попадания в ячейку коэффициент $K_{\Pi} = 2.7$ почти равен коэффициенту $K_{\Pi} = 2.6$ при $\alpha = 0.1$ и двух актах.

Приведенный коэффициент звукопоглощения в начальный момент времени после излучения звуковой энергии источником шума определяет, главным образом, шумовую ситуацию в ближней к источнику шума зоне помещения.

В реальных помещениях не существует идеального зеркального отражения звука. По различным причинам из-за волнового характера взаимодействия волн с преградами нерегулярной формы и положения происходит частичное рассеивание звуковой энергии при каждом акте отражения. В результате рассеивания звука происходит перераспределение энергии и выравнивание скорости затухания различных групп волн. Выполненные нами исследования показали, что наличие перегородок неполной высоты в совокупности с частичным рассеиванием звуковых волн различными объектами через несколько актов отражения звука приводит к диффузной модели отражения.

На основе полученных результатов и используемых моделей распространения энергии звуковых волн в помещениях с перегородками неполной высоты выполнены исследования статистических параметров звуковых полей. Одной из важнейших характеристик звукового поля является средняя длина свободного пробега звука. От точности ее определения зависит точность определения коэффициентов звукопоглощения материалов и ограждающих конструкций.

4.2.2 Средняя длина свободного пробега звука в помещении с перегородками

Для диффузных звуковых полей теоретическое значение средней длины свободного пробега звука рассчитывается по формуле

$$\bar{l}_0 = \frac{4V}{S}, \quad (4.2)$$

где V – объем; S – площадь ограждений помещения, включая площадь поверхностей перегородок.

Относительно величины средней длины свободного пробега и способов ее определения имеются разные подходы. В отдельных работах указывается, что средняя длина

определяется минимальными размерами помещения: высотой плоского помещения или поперечным сечением длинного помещения [126]. В противоположность этому есть утверждение [127] о том, что средняя длина свободного пробега определяется максимальными размерами помещения.

В реальности средняя длина свободного пробега отличается от теоретического значения (4.4) до 40%, а при нестационарных условиях после отключения источника звука может происходить рост средней длины свободного пробега в несколько раз [128]. На величину $\bar{l}_0$ оказывают влияние такие факторы, как пропорции помещения, характер отражения звука от ограждений, наличие рассеивающих звук конструкций, перегородок и т.п. [129].

Расчет средней длины может производиться с использованием компьютерной программы, моделирующей распространение звуковых лучей с учетом их энергетического состояния [130]. На рис. 4.8 показана траектория одного из лучей, отражающегося зеркально от поверхностей помещения с перегородками.

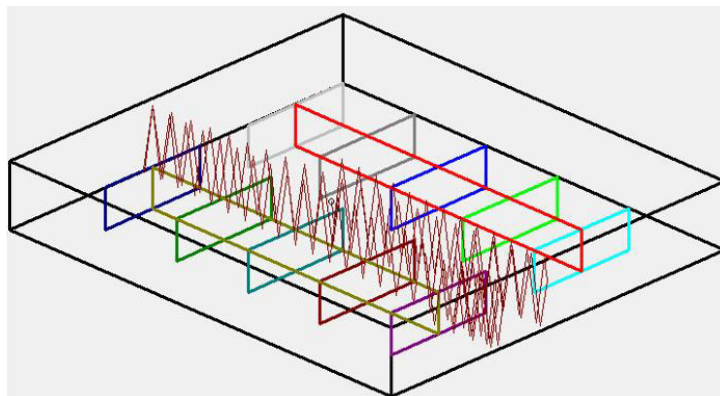


Рисунок 4.8 – Компьютерная форма с траекторией луча при зеркальном отражении звука от ограждений

Диффузное отражение звука моделируется случайным характером отражения звуковых лучей с вероятностью согласно диаграмме рассеивания (см. рис. 4.9). При статистическом усреднении параметров большого количества лучей параметры отраженного поля при случайном характере отражения лучей идентичны полю при диффузном рассеивании отраженных волн. Экспериментально установлены параметры расчета: минимальное количество лучей $N = 1000$; длительность прослеживания лучей ограничивается условием уменьшения первоначальной энергии за счет звукопоглощения в 10^6 раз.

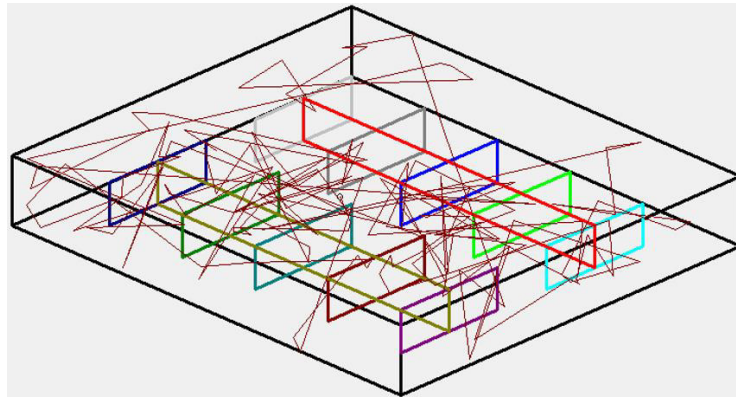


Рисунок 4.9 – Компьютерная форма с траекторией луча, моделирующего диффузное отражение волн от ограждений

Результаты численного расчета и анализа средней длины пробега звука в помещении с перегородками

При наличии перегородок в помещении создаются разные условия для распространения звуковой энергии в нижней и верхней зонах его пространства. Частота актов отражения звука и, соответственно, средняя длина пробега лучей определяется расстояниями между перегородками.

С помощью компьютерного моделирования определены длины свободного пробега лучей, распространяющихся между перегородками, и лучей – в верхней зоне помещения в пространстве от перегородок и потолком. Во вторую группу объединены лучи, падающие или отраженные от потолка, а в первую группу – все остальные.

Расчеты выполнены для помещения $42 \times 42 \times 4.8(h)$ м с перегородками высотой 3.6 м, равномерно распределенных по помещению с шагом 6 м (рис. 4.10). Коэффициент звукопоглощения всех ограждений принят равным 0.1. Результаты расчетов показали следующее (см. табл. 4.4). Значение средней длины пробега по помещению, согласно выражению (4.2), составило 4.25 м. Рассчитанные значения средней длины на основе компьютерного моделирования также близки к этому значению. При диффузном отражении звука в помещении со звукопоглощающим потолком средняя длина свободного пробега меньше теоретической величины, определяемой по формуле (4.2), на 7.3 %. В помещении без эффективной звукопоглощающей облицовки, когда звуковое поле приближается к диффузному, результаты расчета средней длины пробега звука при зеркальном и диффузном отражениях почти совпадают.

Результаты расчетов показали различия в длинах свободного пробега лучей в ячейках между перегородками и в верхней части помещения. Они могут быть более 55%.

Наибольшие различия наблюдаются при звукопоглощающей отделке потолка и зеркальном отражении звука от ограждений. Результаты расчетов подтверждают наличие двух групп лучей, которые распространяются преимущественно между перегородками и в верхней части помещения. Рассчитанные значения позволяют определить долю этих групп лучей с учетом их энергетических характеристик.

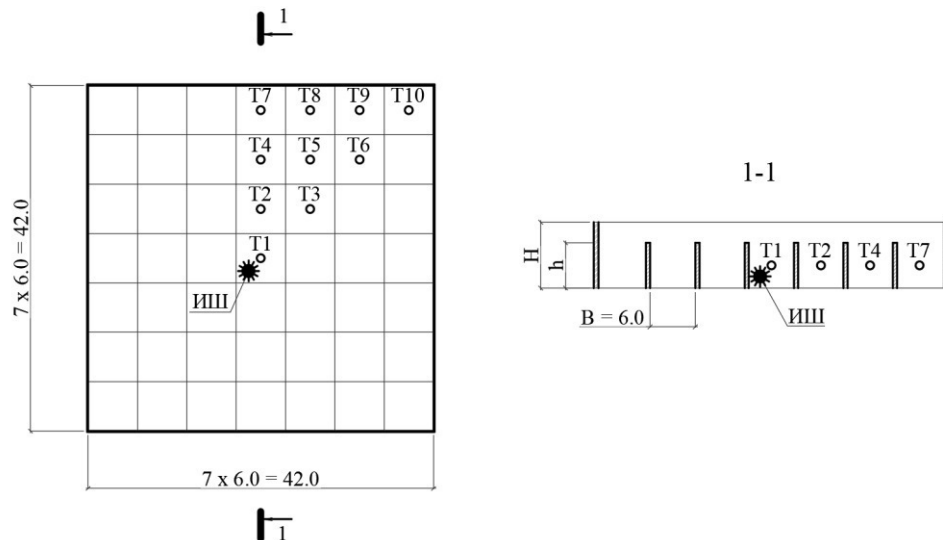


Рисунок 4.10 – Расчетная схема помещения с перегородками неполной высоты.
Размеры даны в м

Таблица 4.4 – Результаты расчета средней длины пробега звуковых лучей в помещении с перегородками

№	КЗП потолка	Средняя длина пробега теоретическая, $\bar{l}$, м	Расчетные значения длин свободного пробега					
			Среднее значение $\bar{l}$, м	Отклонение $\bar{l}$ от $\bar{l}_0$, %	Нижняя зона		Верхняя зона	
					$\bar{l}_n$, м	Доля лучей, %	$\bar{l}_v$, м	Доля лучей, %
1	0.1	4.25	$\frac{4.38}{4.40}$	$\frac{3.1}{3.5}$	$\frac{3.44}{3.41}$	$\frac{55}{51}$	$\frac{5.59}{5.56}$	$\frac{45}{49}$
2	0.7	4.25	$\frac{4.18}{3.94}$	$\frac{-1.6}{-7.3}$	$\frac{3.72}{3.44}$	$\frac{81}{77}$	$\frac{6.18}{5.58}$	$\frac{19}{23}$
Примечание: КЗП – коэффициент звукопоглощения; над чертой указано расчетное значение длины свободного пробега при зеркальном отражении лучей, под чертой – при диффузном отражении								

Расчеты показали, что при отсутствии эффективной звукопоглощающей облицовки доля энергии в нижней и верхней зонах помещения примерно одинаковая. При наличии высокого звукопоглощения на потолке резко снижается доля энергии в верхней части помещения. Внизу помещения доля звуковой энергии в 3–5 раз превышает энергию в верхней зоне помещения.

Подробные исследования средней длины пробега лучей выполнены для офисного

помещения с размерами 16 x 14 x 3.3(h) м (рис. 4.11) в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц. Средний коэффициент звукопоглощения ограждений помещения равен $\alpha = 0.1$. В некоторых вариантах потолок помещения принят со звукопоглощающей отделкой $\alpha = 0.7$. В помещении имеются перегородки высотой 2 м. Перегородки образуют ячейки с размерами 3 x 2 м. По положению перегородки разделены на три типа: центральная продольная (тип 1); поперечные (тип 2); продольные наружные (тип 3). В зависимости от наличия или отсутствия перегородок типа 3 планировка ячеек может быть открытой (при отсутствии наружных продольных перегородок) или закрытой при наличии указанных перегородок. Рассматривается два варианта перегородок: обычные ($\alpha = 0.1$) и звукопоглощающие ($\alpha = 0.7$).

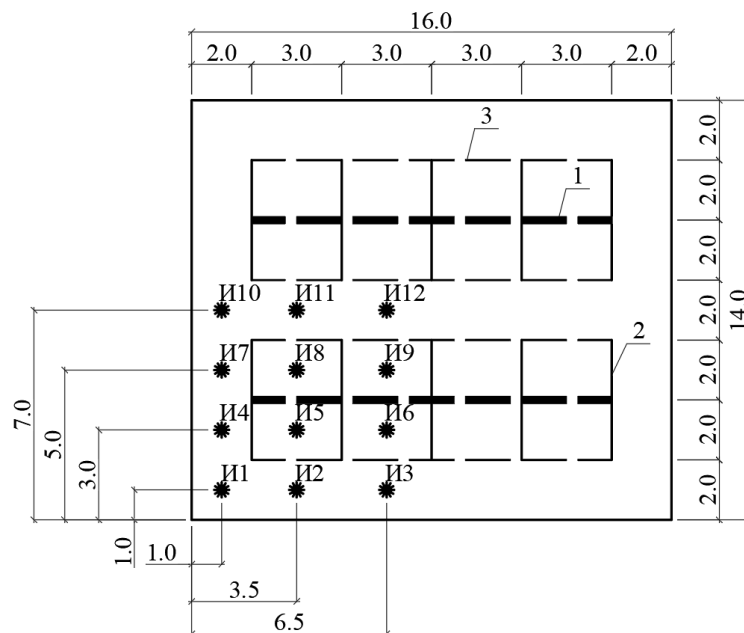


Рисунок 4.11 – Расчетная схема с указанием положения источников шума.

Размеры даны в м. Типы перегородок: 1 – центральная продольная;

2 – поперечные; 3 – наружные продольные

В таблице 4.5 приведены результаты расчета средних длин свободного пробега в помещении при зеркальном (числители) и диффузном (знаменатели) отражениях лучей от ограждений и перегородок офисного помещения для двух положений: И12 в коридоре и И9 – внутри ячейки. Для каждого рассчитанного значения средней длины определялась степень отклонения Δl результата от теоретического значения, рассчитанного по выражению (4.2). Прочерк в ячейках таблицы означает отсутствие соответствующих конструкций.

Результаты расчетов средних длин свободного пробега в помещении без перегородок (строчки 1 и 2 табл. 4.5) согласуются с ранее полученными результатами [128, 131].

Таблица 4.5 – Результаты расчета средней длины свободного пробега звуковых лучей в офисном помещении

№	Коэффициент звукопоглощения конструкции				Средняя длина пробега теоретическая, $\bar{l}$, м	Расчетные значения			
	потолок	тип перегородки				Источник в точке И12		Источник в точке И9	
		1	2	3		l_{cp} , м	Δl , %	l_{cp} , м	Δl , %
1	0.1	-	-	-	4.58	<u>5.12</u> 4.64	<u>11.7</u> 1.3	<u>5.12</u> 4.64	<u>11.7</u> 1.3
2	0.7	-	-	-	4.58	<u>7.19</u> 4.91	<u>57.0</u> 7.2	<u>7.12</u> 4.85	<u>55.5</u> 5.9
3	0.1	0.1	0.1	-	3.28	<u>3.40</u> 3.42	<u>3.5</u> 4.3	<u>3.43</u> 3.36	<u>4.6</u> 2.4
4	0.7	0.1	0.1	-	3.28	<u>3.50</u> 3.19	<u>6.7</u> -2.8	<u>3.50</u> 2.94	<u>6.7</u> -10.4
5	0.1	0.1	0.1	0.1	2.70	<u>2.95</u> 2.79	<u>9.3</u> 3.3	<u>2.58</u> 2.58	<u>-4.4</u> -4.4
6	0.7	0.1	0.1	0.1	2.70	<u>2.93</u> 2.56	<u>8.5</u> -5.2	<u>2.18</u> 2.06	<u>-19.3</u> -23.7
Примечание: над чертой указано расчетное значение длины свободного пробега при зеркальным отражении лучей, под чертой – диффузное по закону Ламберта									

Влияние перегородок на среднюю длину свободного пробега звуковых лучей

Перегородки оказывают влияние на перемешивание звуковых волн, в результате чего снижается разброс значений средней длины свободного пробега при зеркальном и диффузном отражениях звука. Рассчитанные длины близки к теоретическим значениям (см. строчки 3 и 5 табл. 4.5). Более заметные различия наблюдаются в помещении со звукопоглощающим потолком (строчки 4 и 6 табл. 4.5). При зеркальном отражении звука происходит резкое уменьшение средней длины свободного пробега за счет снижения доли лучей, распространяющихся в горизонтальной плоскости.

Результаты расчетов показывают зависимость средней длины свободного пробега от наличия отражающих поверхностей в ближней к источнику зоне. Источник И9 находится внутри планировочной ячейки, частично или полностью огороженной перегородками. Прежде чем покинуть эти ячейки многие лучи должны распространиться в ограниченном внутреннем пространстве ячеек. Эта ситуация приводит к существенному уменьшению средней длины свободного пробега. Если источник находится в коридоре (источник в точке И12), то средняя длина свободного пробега выше на 17–30 %.

Выгораживающие ячейки могут быть открытыми (строчки 3–4 табл. 4.5) и замкнутыми (строчки 5–6 табл. 4.5) за счет отсутствия и наличия перегородок типа 3. Наличие этих перегородок снижают теоретическое значение средней длины свободного пробега звука с 3.28 м до 2.70 м. При расположении источника шума в открытой ячейке (строчка 4 табл. 4.5) рассчитанные значения средней длины свободного пробега близки к теоретическому значению. Наиболее заметно снижение средней длины свободного пробега наблюдается при наличии замкнутых перегородок. Замыкание ячеек (строчка 5 табл. 4.5) приводит к значительному снижению средней длины свободного пробега с 2.95 м до 2.58 м при зеркальном отражении и с 2.79 м до 2.58 м при диффузном отражении звука. При наличии звукопоглощения на потолке средняя длина свободного пробега звука от источника внутри замкнутой ячейки может быть существенно меньше теоретического значения длины, расхождение достигает 23.7 %.

Расчет усредненной по помещению средней длины пробега звуковых лучей

Как видно из предыдущего, планировочное решение помещения с перегородками и положение источника звука (см. рис. 4.11), а также характер отражения звука могут существенно влиять на величину средней длины свободного пробега. Выполнены расчеты средней длины пробега лучей в помещении с открытыми и закрытыми ячейками и определены среднеарифметические значения $\bar{l}$ при различных приведенных на рис. 4.11 положениях источника шума И1 – И12 и при различном характере отражения звука. Ниже приведены данные расчетов средней длины пробега в помещении, как среднеарифметические значения $\bar{l}$ при различных положениях источника. Вследствие симметрии плана расчет параметров звукового поля выполнен в четверти помещения. Результаты расчетов даны в таблице 4.6.

Расчеты выполнены для помещения с потолком, облицованным звукопоглощающим материалом. Анализировалось две ситуации, когда ячейки, отгораживаемые перегородками, были разомкнутыми и замкнутыми. В замкнутых ячейках центральная продольная перегородка принималась звукопоглощающей с $\alpha = 0.70$.

Для определения усредненной по помещению длины свободного пробега выполнены расчеты статистических параметров при нескольких положениях источников шума И1 ÷ И12, устанавливаемых с шагом $2 \div 3$ м. Усредненная по помещению длина свободного пробега звука рассчитана по выражению

$$\bar{l} = \sum_{i=1}^{i=12} K_i l_i, K_i = S_i / S_{\Pi}, \quad (4.3)$$

где l_i – рассчитанное значение средней длины пробега при положении источника на i -ом участке помещения; K_i – весовой коэффициент, зависящий от отношения площади участка S_i к общей площади помещения S_{Π} .

Таблица 4.6 – Результаты расчета средней длины свободного пробега звуковых лучей при различных положениях источника шума

№	Положение источника	Средняя длина свободного пробега, м	Δl , %	Коэффициент K_i	$K_i l_i$
1	2	3	4	5	6
Характеристика помещения: потолок $\alpha = 0.7$; перегородки: тип 1 (центральная продольная) $\alpha = 0.1$; тип 2 (поперечная) $\alpha = 0.1$; тип 3 (крайняя продольная) отсутствует					
1	И1	3.603 / 2.974	9.85 / -9.33	0.0714	0.257 / 0.212
2	И2	3.415 / 3.003	4.12 / -8.45	0.1071	0.366 / 0.322
3	И3	3.392 / 3.112	3.41 / -5.12	0.1071	0.363 / 0.333
4	И4	3.375 / 2.875	2.90 / -12.35	0.0714	0.241 / 0.205
5	И5	3.323 / 2.890	1.31 / -11.89	0.1071	0.356 / 0.310
6	И6	3.300 / 2.987	0.61 / -8.93	0.1071	0.354 / 0.320
7	И7	3.321 / 2.957	1.25 / -9.85	0.0714	0.237 / 0.211
8	И8	3.487 / 2.944	6.31 / -10.24	0.1071	0.374 / 0.315
9	И9	3.507 / 2.936	6.92 / -10.49	0.1071	0.376 / 0.315
10	И10	3.594 / 3.057	9.57 / -6.80	0.0357	0.128 / 0.109
11	И11	3.535 / 3.096	7.77 / -5.61	0.0536	0.189 / 0.166
12	И12	3.507 / 3.189	6.92 / -2.77	0.0536	0.188 / 0.171
				$l = \sum K_i l_i$	3.430 / 2.990
Характеристика помещения: потолок $\alpha = 0.7$; перегородки: тип 1 (центральная продольная) $\alpha = 0.7$; тип 2 (поперечная) $\alpha = 0.1$; тип 3 (крайняя продольная) $\alpha = 0.1$					
13	И1	3.429 / 2.703	27.0 / 0.1	0.0714	0.245 / 0.193
14	И2	3.054 / 2.636	13.1 / -2.4	0.1071	0.327 / 0.282
15	И3	2.951 / 2.579	9.3 / -4.5	0.1071	0.316 / 0.276
16	И4	3.094 / 2.675	14.6 / -0.9	0.0714	0.221 / 0.191
17	И5	2.176 / 2.160	-19.4 / -20.0	0.1071	0.233 / 0.231
18	И6	2.200 / 2.131	-18.5 / -21.1	0.1071	0.236 / 0.228
19	И7	3.042 / 2.739	12.7 / 1.4	0.0714	0.217 / 0.196
20	И8	2.172 / 2.207	-19.6 / -18.3	0.1071	0.233 / 0.236
21	И9	2.151 / 2.118	-20.3 / -21.6	0.1071	0.230 / 0.227
22	И10	3.351 / 2.786	24.1 / 3.2	0.0357	0.120 / 0.099
23	И11	3.063 / 2.724	13.4 / 0.9	0.0536	0.164 / 0.146
24	И12	3.070 / 2.651	13.7 / -1.8	0.0536	0.165 / 0.142
				$l = \sum K_i l_i$	2.706 / 2.448
Примечание: в числителе дроби указаны значения, полученные в случае зеркального отражения лучей, а в знаменателе – при диффузном отражении по закону Ламберта					

Анализ приведенных в табл. 4.6 результатов показывает следующее.

Средняя длина свободного пробега существенно зависит от положения источника в помещении и характера отражения звука. В данном случае максимальная длина свободного пробега наблюдается при зеркальном отражении и расположении источника в точке И1. Это связано с наличием более свободного пространства вокруг источника (см. рис. 4.11). Длина больше теоретического значения на 27% при замкнутой планировке ячеек и на 9.85% при наличии открытых ячеек. В то же время при диффузном отражении длина среднего свободного пробега может существенно снижаться по сравнению с теоретическим значением. Снижение зависит от положения источника и степени открытости ячеек. Наибольшее снижение наблюдается в замкнутых ячейках.

Наблюдается при наличии перегородок факт сближения средних длин пробега при зеркальном и диффузном характерах отражения звука. Расхождения в значениях длин 3.430 м и 2.990 м при открытых ячейках и 2.706 м и 2.448 м при замкнутых ячейках не превышают 10%. Эти значения достаточно хорошо согласуются с теоретическими значениями средней длины пробега равными, соответственно, 3.28 м и 2.70 м при открытых и замкнутых ячейках.

Результаты выполненных расчетов дают основание принимать при расчетах шума в помещениях с перегородками неполной высоты статистическими методами среднюю длину свободного пробега, определяемую по формуле (4.2), с уменьшением получаемого значения на 10%.

При необходимости более точного расчета акустических параметров в конкретных точках помещения или на определенном рабочем месте, например, при определении времени реверберации, следует выполнять числовое моделирование звукового поля.

4.3 Методы расчета шумового поля в помещениях с перегородками неполной высоты. Сравнительная оценка расчетных методов

Расчет звуковых полей в помещениях с массовым пребыванием людей при размещении в них перегородок неполной высоты имеет две особенности: наличие большого количества источников шума и необходимость учета при расчете значительного количества перегородок. Определение энергетических параметров шума усложняется непостоянством параметров источников шума за счет их перемещения в пространстве помещения

и изменения во времени количества разговаривающих людей.

Для снижения трудоемкости расчетов использовано рассмотренное ранее в главе 3 упрощение. Все источники шума в помещении с массовым пребыванием людей представляются в виде распределенного по области пребывания людей плоского источника шума со статистически усредненными акустическими параметрами [106, 108, 109]. Затем в последующих практических расчетах прямого и отраженного звука такой плоский источник шума заменяется на систему равномерно распределенных точечных источников шума. Принятый прием приводит к значительному упрощению алгоритмов расчетов и к снижению вероятности расчетных ошибок.

Для расчета звуковых полей в помещениях с перегородками неполной высоты требуются расчетные модели, учитывающие распределение звуковой энергии в объеме всего замкнутого пространства, например, основанные на геометрических методах или на статистическом энергетическом подходе [27, 51, 61, 67, 74-76], а также комбинированные геометрические статистические модели [34, 35, 36, 132].

Выполнена модернизация расчетных методов для учета в них наличия в помещениях перегородок. Для этого в методе **прослеживания лучей** введен дополнительный вертикальный элемент (перегородка), имеющий ограниченную высоту, различные звукопоглощающие свойства на противоположных поверхностях и обладающий звукопроницаемостью. Звукоизолирующие свойства перегородок моделируются разделением падающих лучей на две группы - отраженных и прошедших через перегородку. Это разделение осуществляется вероятностным образом пропорционально звукоизолирующим свойствам перегородки. Например, при звукоизоляции 20 дБ через перегородку проходит каждый сотый луч. Луч, прошедший через перегородку, отдает свою энергию в ближайший элементарный объем помещения, и в дальнейшем эта энергия рассчитывается как квазидиффузная на основании статистического энергетического подхода.

Внесены изменения и в **численный статистический энергетический метод**. Изменения коснулись обмена энергией между элементарными объемами помещения, разделенными перегородкой. Изменения показаны на примере двумерного звукового поля, когда пространство помещения разделено на параллелепипеды высотой, равной высоте помещения.

При отсутствии перегородки перенос энергии между элементарными объемами осуществляется по следующим закономерностям. Плотность потока энергии равна

$$q = q_{i-1} - q_i = -\eta \text{grad}(\varepsilon) \approx -\eta \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{\Delta}, \quad (4.4)$$

откуда плотности потоков звуковой энергии между элементарными объемами (параллелепипедами) в одном из направлений составит

$$q_i = \frac{\eta \varepsilon_i}{\Delta}, \quad (4.5)$$

где ε_i – плотность звуковой энергии в элементе объема; Δ – расстояние между геометрическими центрами объемов (шаг квадратной разбивочной сетки); η – коэффициент связи плотности потока и градиента плотности отраженной энергии.

Мощность передаваемой энергии через боковую поверхность i -го параллелепипеда зависит от площади потока $S = H \cdot \Delta$

$$W_i = q_i S = \eta H \varepsilon_i, \quad (4.6)$$

где H – высота параллелепипеда (см. рис. 4.12).

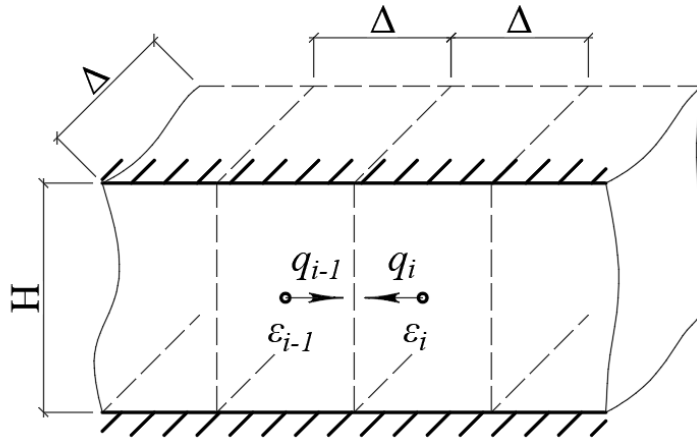


Рисунок 4.12 – Схема к расчету потоков энергии между элементарными параллелепипедами

Если между параллелепипедами находится перегородка со звукоизоляцией R на всю высоту помещения H , величина передаваемой мощности звуковой энергии составит

$$W_i = \eta H \varepsilon_i 10^{-0.1R}. \quad (4.7)$$

За счет звукопоглощения α перегородка вызовет дополнительную потерю мощности

$$W_i = H \varepsilon_i \frac{\Delta \alpha c}{2(2 - \alpha)}, \quad (4.8)$$

где c – скорость звука в воздухе.

При наличии перегородки неполной высоты между параллелепипедами будет наблюдаться два потока звуковой мощности: через перегородку вследствие ее звукопрозрачности (см. рис. 4.13)

$$W_i = \eta h \varepsilon_i 10^{-0.1R} \quad (4.9)$$

и через воздушное пространство над перегородкой

$$W_i = \eta (H - h) k_h \varepsilon_i, \quad (4.10)$$

где h – высота перегородки; k_h – коэффициент.

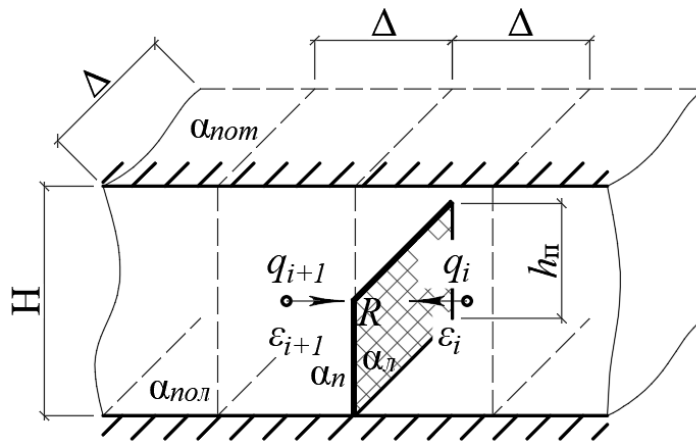


Рисунок 4.13 – Схема к расчету потоков энергии между элементарными параллелепипедами при наличии перегородки неполной высоты

Общая передаваемая мощность равна

$$W_i = \eta \varepsilon_i \left[h 10^{-0.1R} + (H - h) k_h \right]. \quad (4.11)$$

Выполненные исследования показали, что коэффициент k_h , учитывающий особенности экранирующего влияния перегородки на отраженный звук, равен

$$k_h = 10^{-4h/(3H)}. \quad (4.12)$$

Использование элементарных объемов в виде прямоугольных параллелепипедов значительно облегчает выполнение расчетов. При этом достаточно точно определяются уровни шума в верхней зоне помещения (над перегородками), а уровни шума в нижней зоне завышены на 1.5 дБ за счет экранирования звука перегородками неполной высоты. Для более точного расчета можно использовать трехмерную модель звукового поля, когда используется более мелкая пространственная сетка разбиения пространства на элементарные кубики, в этом случае учитывается изменение уровней шума в трех направлениях.

Следует отметить, что трудоемкость расчетов можно существенно снизить, если применить **приближенные расчетные методы**, которые не учитывают влияние конкретного положения источника шума и расчетной точки на величину уровней шума [27, 133]. В этих методах уровень звука рассчитывается в зависимости от расстояния R между источником шума и расчетной точкой с учетом общих статистических параметров помещения. Единовременный расчет уровней или плотности отраженной звуковой энергии в зависимости от расстояния R в этом случае превращает расчет итоговых уровней шума в расчетной точке в результат энергетического суммирования вкладов.

Сравнительная оценка расчетных методов

Выполнена проверка точности расчетных методов на основе сравнения рассчитанных и измеренных уровней шума. При этом с данными экспериментов сравнивались результаты расчета по методу прослеживания лучей и результаты, полученные численным статистическим энергетическим методом. Измерения и расчеты уровней шума производились в помещении с размерами $10.5 \times 5.8 \times 2.0(h)$ м в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц. Для наглядной оценки точности использован один источник шума ИШ1 с уровнем акустической мощности $L_w = 94$ дБ, расположенный на высоте 0.6 м от пола (см. рис. 4.14). Рассчитанные и измеренные уровни шума показаны в таблице 4.7 и на рисунке 4.15. Расчеты выполнены методом прослеживания лучей при зеркальной модели отражения звука от ограждений и численным статистическим энергетическим методом при диффузном отражении.

Результаты расчетов показали хорошее совпадение с экспериментальными значениями. Наибольшее расхождение (до 3 дБ) наблюдается в ближних к источнику точках Т1 и В1. В остальных точках погрешность расчетов не превышает 2 дБ.

Снижение шума по мере удаления расчетной точки от источника шума определяется двумя группами факторов: за счет снижения отраженной энергии на звукопоглощающих ограждениях и перегородках, а также за счет экранирующего эффекта перегородок неполной высоты. Основной причиной расхождения рассчитанных и измеренных уровней шума являются погрешности, возникающие из-за неполного учета экранирующего эффекта перегородок.

При экспериментах исследовано также влияние на распространение звуковой энергии устройства звукопоглощающей облицовки на потолке в ячейке П1. Схема

размещения звукопоглощающего материала показана на рисунке 4.16.

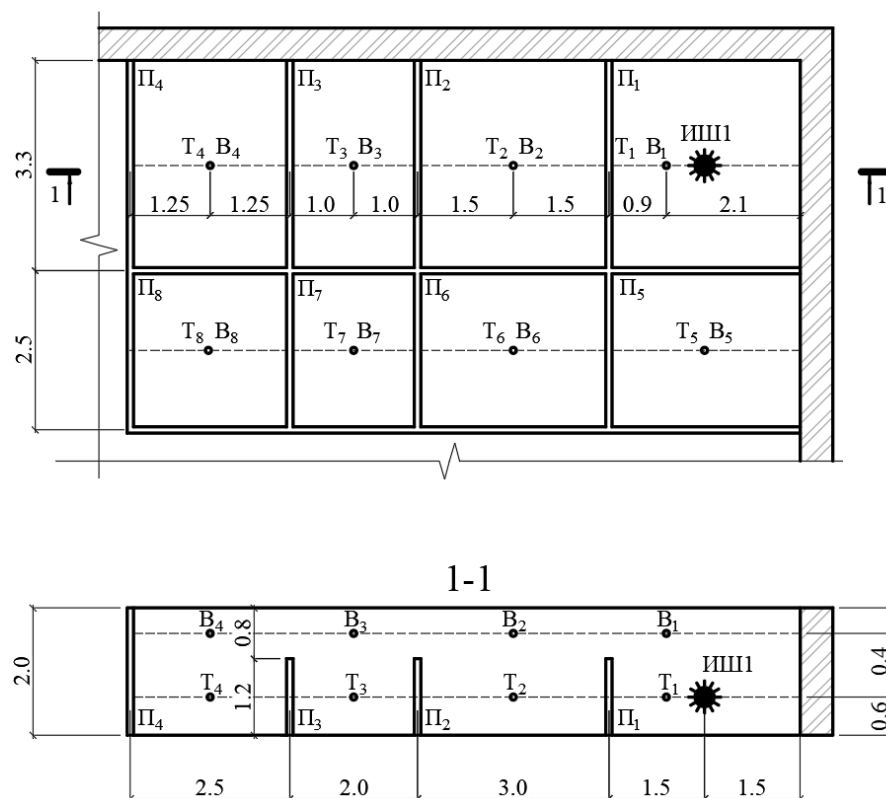


Рисунок 4.14 – Расчетная схема помещения с указанием положения источника шума ИШП и расчетных точек Т и В на расстоянии 0.6 и 1.6 м от уровня пола.
Размеры даны в м

Таблица 4.7 – Экспериментальные и расчетные уровни в помещении при расположении источника в точке ИШП, определенные для октавной полосы с $f_{cp}=1000$ Гц

№ точки	Экспериментальный уровень, $L_{экс}$, дБ	Расчетные уровни, дБ			
		при диффузной модели отражения		при зеркальной модели отражения	
		$L_{расч1}$	$\Delta L = L_{экс1} - L_{расч1}$	$L_{расч1}$	$\Delta L = L_{экс1} - L_{расч1}$
Т1	90.94	92.18	1.24	92.28	1.34
Т2	86.49	85.20	-1.29	86.31	-0.18
Т3	82.32	81.53	-0.79	81.38	-0.94
Т4	79.04	78.91	-0.13	80.09	1.05
Т5	86.32	86.03	-0.29	86.53	0.21
Т6	83.09	83.53	0.44	84.52	1.43
Т7	80.99	80.65	-0.34	79.94	-1.05
Т8	77.65	78.41	0.76	79.33	1.68

№ точки	Экспериментальный уровень, $L_{экс}$, дБ	Расчетные уровни, дБ			
		при диффузной модели отражения		при зеркальной модели отражения	
		$L_{расч1}$	$\Delta L = L_{экс1} - L_{расч1}$	$L_{расч1}$	$\Delta L = L_{экс1} - L_{расч1}$
В1	91.26	92.35	1.09	93.80	2.54
В2	86.73	86.70	-0.03	86.47	-0.26
В3	83.17	83.03	-0.14	83.21	0.04
В4	80.34	80.41	0.07	81.20	0.86
В5	86.24	87.53	1.29	88.22	1.98
В6	83.96	85.03	1.07	84.82	0.86
В7	81.62	82.15	0.53	81.37	-0.25
В8	79.28	79.91	0.63	79.70	0.42
		$\Delta L_{KB} =$	0.727	$\Delta L_{KB} =$	1.002

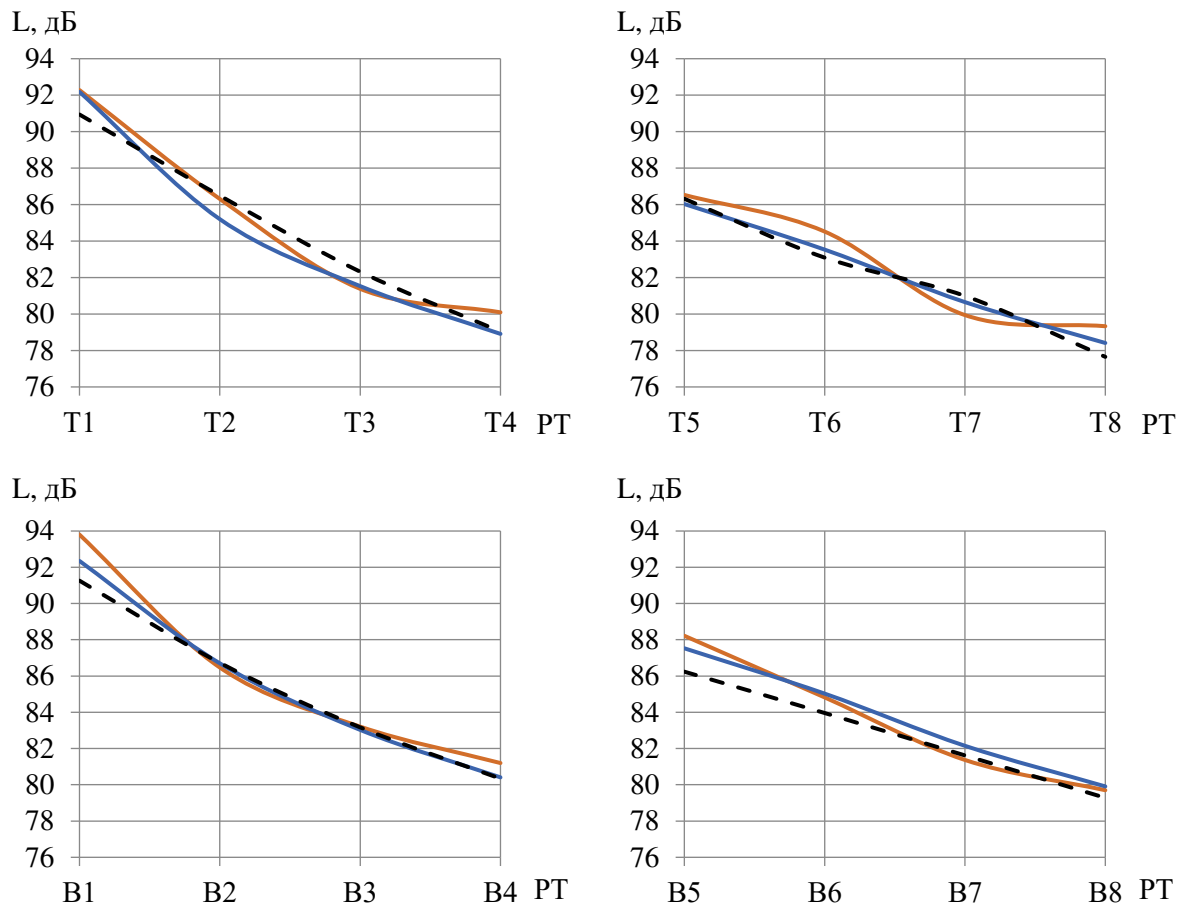


Рисунок 4.15 – Уровни звукового давления в помещении с перегородками неполной высоты: — расчет методом прослеживания лучей при зеркальной модели отражения звука от ограждений; — расчет численным статистическим энергетическим методом; ---- экспериментальные данные

Результаты расчета и экспериментальные данные приведены в таблице 4.8 и на рисунке 4.17. Видно, что при размещении облицовки над источником шума происходит также снижение шума на остальных участках помещения.

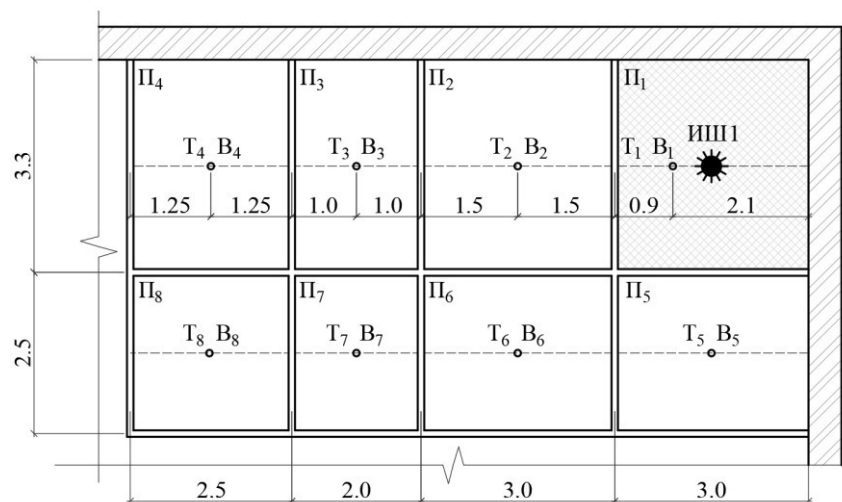


Рисунок 4.16 – Расчетная схема помещения с указанием участка потолка (П₁), облицованного звуопоглощающим материалом. Размеры даны в м

Таблица 4.8 – Экспериментальные и расчетные уровни в помещении при расположении источника в точке ИШ1, определенные для октавной полосы с $f_{cp}=1000$ Гц

№ точки	Экспериментальный уровень, $L_{экс}$, дБ	Расчетные уровни, дБ			
		при диффузной модели отражения		при зеркальной модели отражения	
		$L_{расч}$	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч}$	$L_{расч}$	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч}$
T1	89.13	90.90	1.77	91.60	2.47
T2	84.24	83.88	-0.36	84.89	0.65
T3	80.48	80.24	-0.24	81.25	0.77
T4	76.97	77.65	0.68	79.67	2.70
T5	85.06	84.70	-0.36	86.25	1.19
T6	81.71	82.22	0.51	84.28	2.57
T7	78.36	79.37	1.01	80.47	2.11
T8	75.05	78.66	3.61	79.61	4.56

№ точки	Экспериментальный уровень, $L_{экс}$, дБ	Расчетные уровни, дБ			
		при диффузной модели отражения		при зеркальной модели отражения	
		$L_{расч}$	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч}$	$L_{расч}$	$\Delta L = L_{экс} - L_{расч}$
B1	88.33	91.42	3.09	93.46	5.13
B2	85.28	85.38	0.10	85.78	0.50
B3	81.00	81.74	0.74	82.76	1.76
B4	78.45	79.15	0.70	80.72	2.27
B5	84.45	86.20	1.75	87.83	3.38
B6	82.06	83.72	1.66	84.55	2.49
B7	79.62	80.87	1.25	81.32	1.70
B8	77.98	78.66	0.68	79.38	1.40
		$\Delta L_{KB} =$	0.93	$\Delta L_{KB} =$	1.26

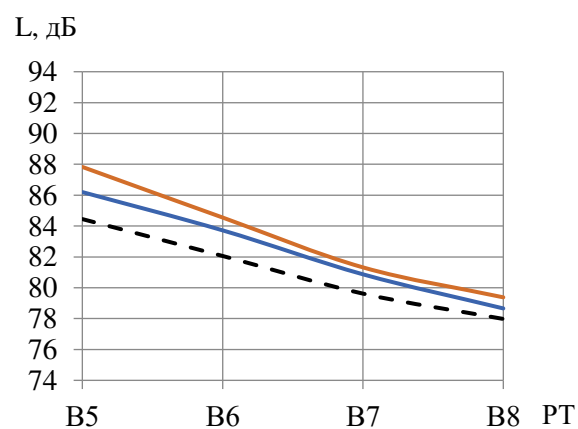
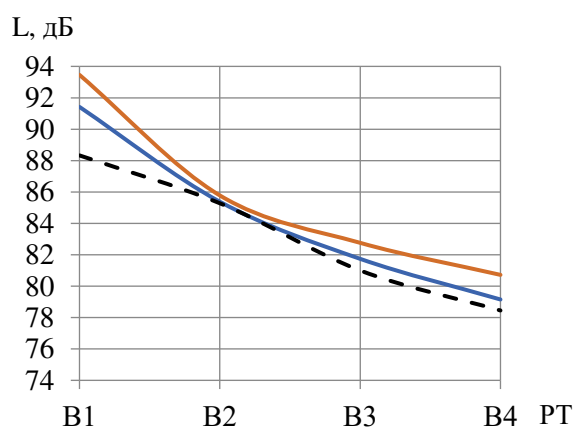
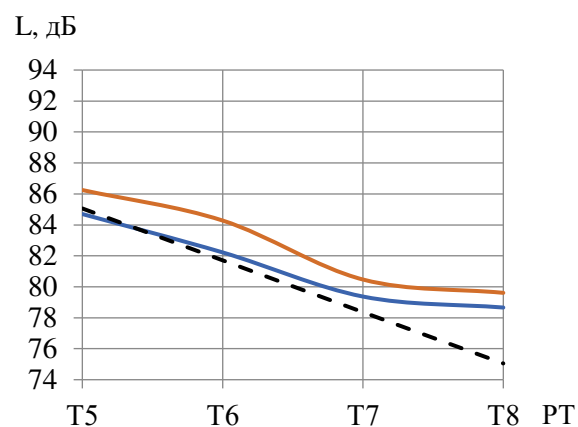
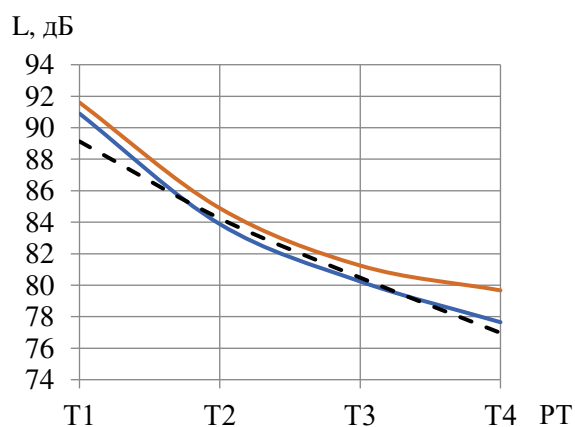


Рисунок 4.17 – Уровни звукового давления в помещении с перегородками неполной высоты (условные обозначения см. рис. 4.15)

Данные табл. 4.8 и графики на рис. 4.17 показывают удовлетворительное

совпадение рассчитанных и экспериментальных данных. Диффузная модель отражения обеспечивает лучшее совпадение рассчитанных и измеренных уровней шума. Средне-квадратичное отклонение составляет 0.93 дБ. Метод прослеживания лучей, реализующий зеркальное отражение звука, демонстрирует неравномерность спадов уровней, наибольшее расхождение 4.6 дБ наблюдается в наиболее удаленной от источника шума расчетной точке Т8.

4.4 Исследование влияния перегородок неполной высоты на акустические параметры выделенных объемов

Устройство перегородок неполной высоты в помещении приводит к изменению энергетических свойств звукового поля. В данном разделе работы выполнено сравнение энергетических параметров звукового поля в пустом помещении и в помещении с перегородками неполной высоты. Для решения этой задачи выполнены следующие расчеты. В помещении габаритами $10.5 \times 5.8 \times 2.0(h)$ м одновременно действуют 4 источника шума с одинаковой мощностью $L_W = 94$ дБ, расположенных на высоте 0.6 м (см. рис. 4.18). Расчеты шума выполнялись в пустом помещении (рис. 4.18, а) и в помещении после устройства перегородок (рис. 4.18, б).

Результаты расчета шума и влияние перегородок на параметры звукового поля приведены в таблице 4.9.

Расчеты выполнены при зеркальной модели отражения звука от ограждений. В результате анализа установлено, что перегородки снижают уровни звуковой энергии вблизи источника до 1.3 дБ, а в соседних, пустых, объемах уровни звуковой энергии снижаются до 3.2 дБ. Акустическая эффективность устройства перегородок показана на рис. 4.19.

Следует отметить, что наряду с повышением акустического комфорта в помещении после устройства перегородок улучшаются и другие характеристики помещения, а именно, ограничение зрительного контакта, улучшение условий работы, соблюдение уровня конфиденциальности и т.д.

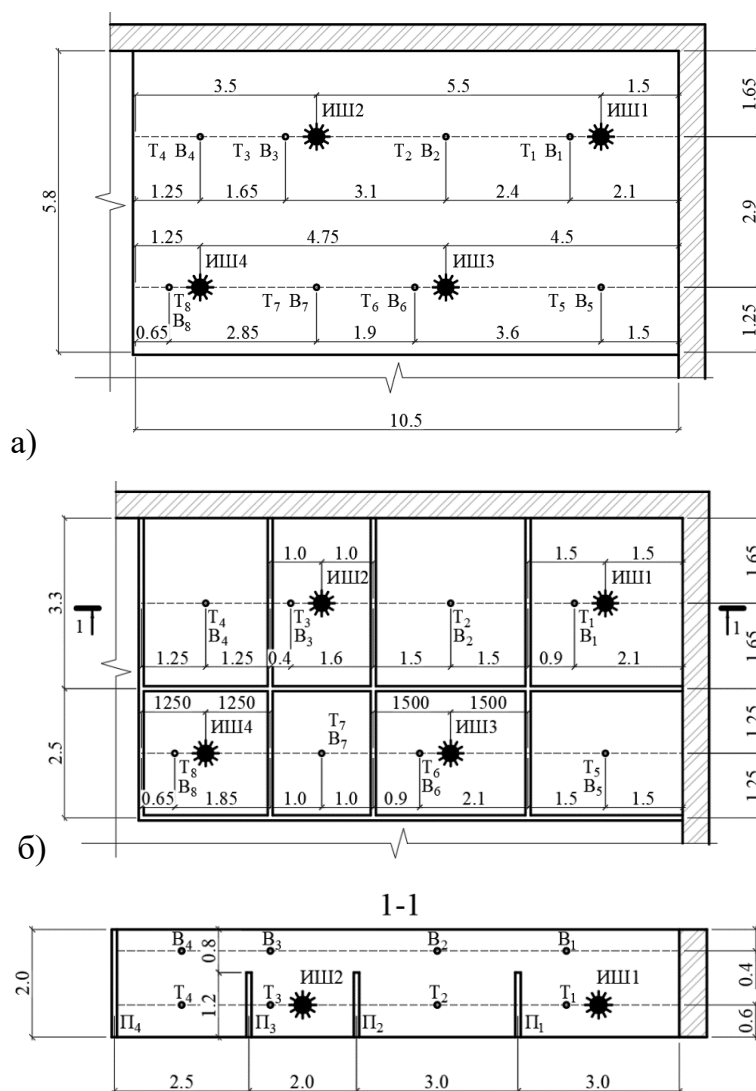


Рисунок 4.18 – Схема помещения с указанием положения расчетных точек и положений источника шума: а) пустого; б) с перегородками неполной высоты

Таблица 4.9 – Расчетные уровни в пустом помещении и в помещении с перегородками при расположении источников в точках ИШ1-ИШ4, для октавной полосы с $f_{cp}=1000$ Гц

№ точки	Расчетные уровни в пустом помещении, $L_{пуст,i}$ дБ	Расчетные уровни в помещении с перегородками, $L_{пер,i}$ дБ	$\Delta L = L_{пер,i} - L_{пуст,i}$
1	2	3	4
T1	92.96	91.63	1.32
T2	92.77	89.61	3.16
T3	93.20	91.90	1.30
T4	92.60	90.19	2.40

№ точки	Расчетные уровни в пустом помещении, $L_{пуст,i}$ дБ	Расчетные уровни в помещении с перегородками, $L_{пер,i}$ дБ	$\Delta L = L_{пер,i} - L_{пуст,i}$
5	6	7	8
B1	92.96	91.63	1.32
B2	92.77	89.61	3.16
B3	93.20	91.90	1.30
B4	92.95	89.31	3.64

Окончание табл. 4.9

1	2	3	4
T5	92.44	89.52	2.91
T6	93.88	93.50	0.37
T7	92.98	90.94	2.04
T8	91.31	91.17	0.14

5	6	7	8
B5	92.44	89.52	2.91
B6	93.88	93.50	0.37
B7	92.85	89.81	3.04
B8	94.27	93.97	0.30

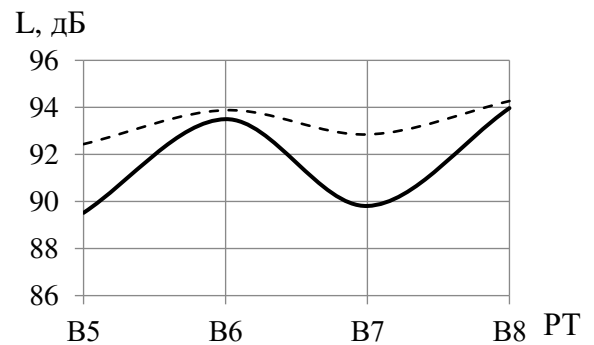
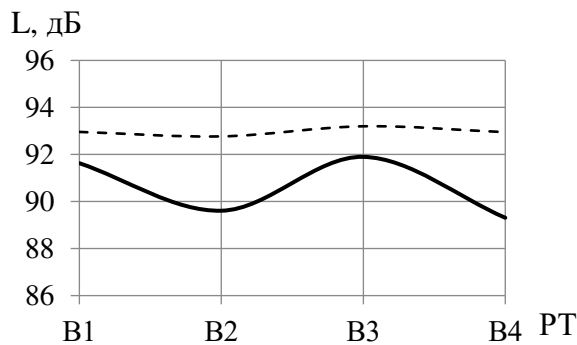
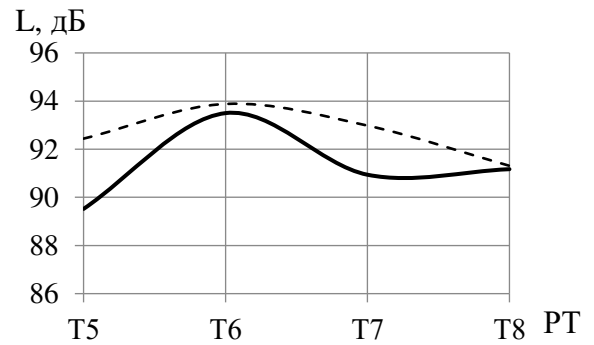
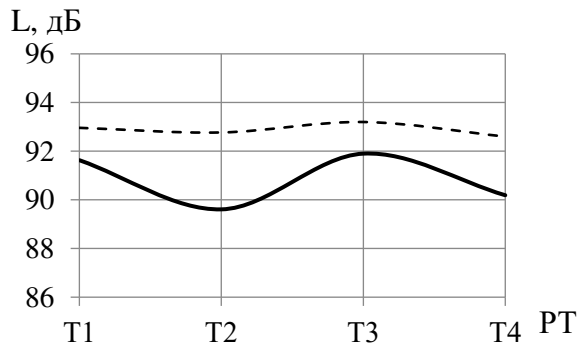


Рисунок 4.19 – Графики рассчитанных уровней звукового давления в пустом помещении и помещении с перегородками неполной высоты. Источник в точках ИШ1-ИШ4. Пунктирная линия – помещение без перегородок; сплошная линия – помещение с перегородками неполной высоты

Оценка разборчивости речи в помещении после устройства перегородок

Применение перегородок неполной высоты приводит к улучшению разборчивости речи в каждом отдельном случае. В помещениях с перегородками, предназначенных для передачи или обмена речевой информацией, например, между покупателем и продавцом, работником и клиентом, наиболее важными акустическими параметрами являются показатели слышимости и разборчивости речи. В настоящее время эти параметры для помещений с массовым пребыванием людей не представлены в технической и нормативной литературе, и, соответственно, проектировщики редко их используют при акустическом проектировании таких помещений. Для оценки разборчивости речи в помещениях наиболее приспособлен метод реверберационных помех, основанный на использовании критерия Сухаревского-Стретта [22].

В случае помещений с массовым пребыванием людей необходимо учитывать, что акустическая ситуация в них имеет ряд особенностей: источники звука в виде речи посетителей имеют стабильные частотные характеристики с определенным диапазоном их акустической мощности; фоновый шум в таких помещениях в основном определяется разговором посетителей; разговаривающие люди, например в торговых помещениях, часто равномерно заполняют пространство помещения и создают звуковое поле с почти диффузными параметрами при определенном временном усреднении [109]. Перечисленные особенности позволяют упростить расчет разборчивости речи и получить рекомендации по проектированию акустической среды в помещениях с массовым пребыванием людей.

Согласно методу реверберационных помех качество передачи и восприятия речи определяется фактором [22]

$$Q'' = K_r T Q, \quad (4.13)$$

где K_r – коэффициент, зависящий от уровня полезного звука в точке приема и определяемый по графику или формуле, приведенной в [22]; T – время реверберации, определяемое по формуле

$$T = \frac{0.041 \cdot l_{cp}}{-\ln(1 - \alpha)}, \quad (4.14)$$

α – средний коэффициент звукопоглощения поверхностей помещения; l_{cp} – средняя длина пробега звуковых волн; Q – фактор акустического качества или критерий Сухаревского-Стретта, определяемый по формуле

$$Q = \frac{\varepsilon_{пр} + \varepsilon_{ран}}{\varepsilon_{поз} + \varepsilon_{фон}}. \quad (4.15)$$

В числителе выражения приведена плотность звуковой энергии полезного сигнала, состоящая из энергии прямого звука $\varepsilon_{пр}$ и плотности энергии его ранних отражений $\varepsilon_{ран}$. Полезной считается суммарная энергия, приходящая в расчетную точку с запаздыванием не более 0.05 с по сравнению с приходом первоначального прямого звука. Негативное влияние на разборчивость звука оказывает фоновый шум $\varepsilon_{фон}$ и поздние отражения речи $\varepsilon_{поз}$ с временной задержкой более 0.05 с.

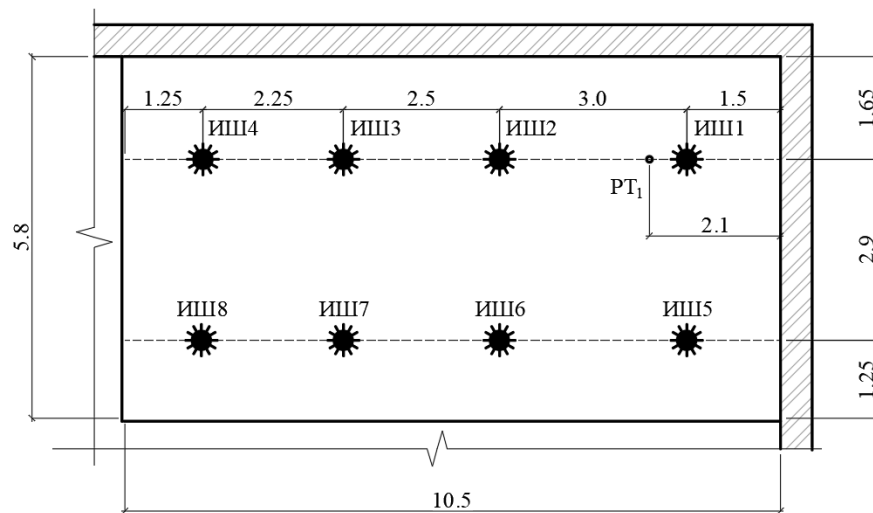
Между фактором реверберационных помех и слоговой разборчивостью установлена зависимость [26]. Разборчивость сигнала считается удовлетворительной, а слоговая разборчивость больше 60%, если фактор реверберационных помех превышает величину

$Q'' > 1.1$ [22, 96, 99]. Это значение фактора можно считать нижней допустимой границей при разговоре посетителей между собой [134].

Ниже проанализировано влияние перегородок неполной высоты на разборчивость речи на следующем конкретном примере.

Пример. В помещении габаритами $10.5 \times 5.8 \times 2.0(h)$ м одновременно действуют 8 источников шума с одинаковой мощностью $L_W = 75$ дБ, расположенных на высоте 0.6 м. Определим качество передачи и восприятия речи Q'' в расчетной точке РТ₁ на расстоянии от источника шума ИШ1 0.6 м и на высоте 0.6 м при 2-х ситуациях (см. рис. 4.20): в пустом помещении при $\alpha = 0.11$, в помещении с перегородками неполной высоты ($h = 1.2$ м) при $\alpha = 0.11$.

а)



б)

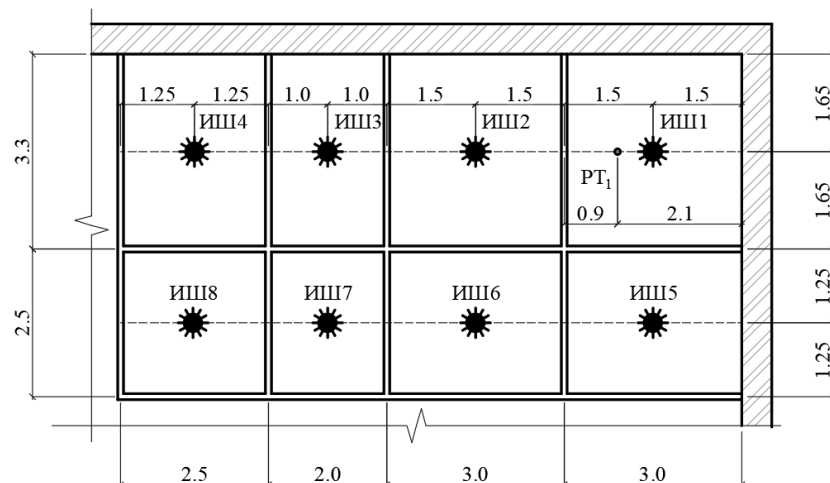


Рисунок 4.20 – Схема помещения с указанием расчетных точек и положений источников шума: а) пустого; б) с перегородками неполной высоты

Плотность энергии прямого звука определяется по формуле

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_0 \cdot 10^{0.1L_{np}}. \quad (4.16)$$

Плотность энергии ранних отражений звука при времени $t = 0.05$, согласно методике, определяется по формуле, приведенной в [26],

$$\varepsilon_{ран} = \varepsilon_0 \cdot 10^{0.1L_{отр}} \left(1 - e^{\frac{-0.69}{T}} \right). \quad (4.17)$$

Плотность энергии поздних отражений звука определяется по формуле

$$\varepsilon_{поз} = \varepsilon_0 \cdot 10^{0.1L_{отр}} e^{\frac{-0.69}{T}}. \quad (4.18)$$

Плотность энергии фонового шума определяется по формуле

$$\varepsilon_{фон} = \varepsilon_0 (10^{0.1L_{сум,8}} - 10^{0.1L_{сум,1}}), \quad (4.19)$$

В формулах (4.16)-(4.19): ε_0 – плотность звуковой энергии, соответствующая порогу слышимости; L_{np} – уровень прямого звука от источника ИШ1; $L_{отр}$ – уровень отраженного звука при одновременном действии 8 источников; $L_{сум,8}$ – суммарный уровень звука при одновременном действии 8 источников; $L_{сум,1}$ – суммарный уровень звука при действии 1 источника.

Результаты сравнительного анализа параметров разборчивости речи для данного примера показали (см. табл. 4.10), что планировочное решение с перегородками неполной высоты увеличивает разборчивость речи. Однако, при среднем коэффициенте звукопоглощения равном $\alpha = 0.11$ фактор реверберационных помех составляет величину 0.68, что сравнительно меньше величины $Q'' = 1.1$. Разборчивость сигнала в этом случае характеризуется как неудовлетворительная. Одним из вариантов повышения разборчивости может являться увеличение среднего коэффициента звукопоглощения помещения до величины $\bar{\alpha} = 0.35$ за счет устройства звукопоглощения на потолке.

Видно, что увеличение среднего коэффициента звукопоглощения пустого помещения практически не повлияло на разборчивость речи. В то же время в помещении с перегородками при устройстве звукопоглощения на потолке уровень разборчивости сигнала достиг требуемой величины $Q'' = 1.1$, что соответствует критерию «удовлетворительно». Подобного вида пример рассмотрен также нами в статье [134].

Результаты расчетов, выполненные в данном случае, а также приведенные нами в статье [134] показали, что устройство индивидуальных кабин из перегородок неполной

высоты позволяет обеспечить необходимые параметры разборчивости речи в диалоге оператор-клиент.

Таблица 4.10 – Результаты сравнительного анализа Q'' для октавной полосы частот с $f_{cp}=1000$ Гц

Расчетная ситуация	L_{np} , дБ	$L_{отр}$, дБ	$L_{сум,1}$, дБ	$L_{сум,8}$, дБ	T , с	Q	Q''
Пустое помещение, $\bar{\alpha} = 0.11$	68.44	76.42	71.71	77.16	0.917	0.52	0.48
Помещение с перегородками, $\bar{\alpha} = 0.11$	68.44	74.58	73.12	75.50	0.675	1.00	0.68
Пустое помещение, со звукопоглощением на потолке $\bar{\alpha} = 0.35$	68.44	69.62	69.87	72.39	0.248	1.90	0.47
Помещение с перегородками и звукопоглощением на потолке $\bar{\alpha} = 0.35$	68.44	67.64	70.34	71.07	0.183	6.00	1.10

Устройство кабин из перегородок неполной высоты значительно повышает разборчивость речи. В то же время при отсутствии эффективного звукопоглощения кабины незначительно снижают величину помех при одновременном повышении уровня полезного сигнала. Полезный сигнал возрастает за счет увеличения доли ранних отражений звука от стенок кабины. В случае устройства звукопоглощающей облицовки на потолке и при наличии перегородок слоговая разборчивость достигает величины более 60% и качество восприятия речи можно считать «удовлетворительным». За счет увеличения звукопоглощения можно добиться и более высокого качества восприятия речи [134].

В целом предложенная методика оценки разборчивости речи в помещениях с перегородками неполной высоты дает возможность производить целенаправленное проектирование различных по объемно-планировочным параметрам выгородок. Методика и ее компьютерная реализация позволяют определять влияние на слышимость и разборчивость речи звукопоглощающих характеристик поверхностей помещений и звукоизоляции перегородок и тем самым определять эффективные мероприятия по акустическому благоустройству в помещениях с массовым пребыванием людей.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Улучшение акустических характеристик помещений с массовым

пребыванием людей возможно путем устройства в них перегородок неполной высоты. Показано, что перегородки оказывают существенное влияние на процессы формирования звукового поля и на его характеристики: возрастает изотропность звукового поля, изменяется структура поля, уменьшается средняя длина свободного пробега звуковых волн, изменяется эффективность звукопоглощающих конструкций и т.п. Перечисленные факторы приводят к изменению энергетических параметров звукового поля помещения, а именно, к изменению времени реверберации и изменению распределения отраженной звуковой энергии в помещении.

2. Выполнено исследование процессов распространения звуковых волн в ячейках помещения между перегородками и их влияния на структуру звукового поля. За счет перегородок происходит изменение структуры звукового поля. В результате характер отражения звука в помещении становится соответствующим модели рассеянного отражения звука по закону Ламберта.

3. Получены и проанализированы результаты расчета статистических параметров помещения с перегородками неполной высоты с различными геометрическими характеристиками при закрытой и открытой формах ячеек и при различных звукопоглощающих и отражающих свойствах ограждений. Отмечено, что при устройстве перегородок происходит снижение величины средней длины пробега звуковых волн, изменение процессов реверберации и изменение величины средних коэффициентов звукопоглощения в помещениях.

4. С использованием разработанных компьютерных программ выполнены расчеты энергетических параметров помещений с учетом наличия в них перегородок неполной высоты. Выполнено сравнение измеренных и рассчитанных уровней в помещении с перегородками неполной высоты при зеркальном и диффузном отражениях звука. Установлено, что оба варианта отражения приводят к близким между собой результатам расчета, которые также хорошо согласуются с измеренными значениями.

5. Выполнены исследования влияния перегородок на распределение звуковой энергии в помещениях. Сравнительные расчеты в помещении с массовым пребыванием людей до и после устройства перегородок неполной высоты показали, что перегородки положительно влияют на акустический режим помещений, а именно снижают шум в выделенных перегородками объемах помещений, повышают слышимость и улучшают разборчивость речи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в работе, позволяют предоставить основные выводы:

1. Определена область исследования в виде мест с массовым пребыванием людей, установлена проблема отсутствия методов расчета звуковых полей от динамичных стохастичных источников шума, какими являются люди в местах их скопления. Приведена классификация объектов с массовым пребыванием людей. Выполнены исследования факторов, влияющих на процессы формирования звуковых полей от источников виде большого количества людей. Определены специфические свойства толпы людей, как источника шума. Сформулированы требования к методам расчета звуковых полей. В работе поставлены задачи модификации существующих и разработка новых методов расчета шума на объектах с массовым пребыванием людей.

2. В справочной литературе отсутствуют сведения об энергетических параметрах речи, как источника шума. В этой связи разработана методика и выполнены экспериментальные измерения с целью определения фактора направленности речи различных категорий людей по полу и возрасту. Получены экспериментальные значения факторов направленности и акустической мощности женской, мужской и детской речи в основных октавных полосах частот. Выполнена аппроксимация экспериментальных данных, и получены аналитические выражения для фактора направленности, как осесимметричного акустического сигнала.

3. Разработаны два новых метода расчета прямого звука на объектах с массовым пребыванием разговаривающих людей: метод непосредственного компьютерного моделирования прямого звука, излучаемого разговаривающими людьми как точечными источниками; метод расчета прямого звука от разговаривающих людей как от равномерно излучающей звуковую энергию плоскости. Сравнительный анализ расчетов прямого звука разработанными методами в тестовом помещении показал, что результаты расчетов хорошо согласуются между собой. При этом второй метод при определенных условиях обладает меньшей трудоемкостью.

4. Разработаны методики расчета шума в помещениях с массовым пребыванием людей при различном характере отражения звука от ограждений. Для расчета шума в помещениях с зеркальным отражением звука разработаны методики оценки отраженной

составляющей шума на основе геометрических методов мнимых источников и прослеживания лучей. Для расчета шума в помещениях с диффузным отражением звука разработана методика расчета отраженной составляющей шума на основе численного статистического энергетического метода. Для расчета шума в помещениях при зеркально-диффузном отражении звука разработана методика расчета отраженного шума, основанная на комбинированной расчетной модели, обеспечивающей расчет зеркальной составляющей отраженного шума методом прослеживания лучей, а диффузно рассеянной составляющей численным статистическим энергетическим методом. Сравнительный анализ расчетов с использованием разработанных методик для тестового помещения показал, что при одинаковых условиях результаты расчетов хорошо согласуются между собой.

5. Разработанные методы и методики расчета энергетических параметров шумовых полей объектов с массовым пребыванием людей алгоритмизированы и реализованы в виде компьютерных программ. Компьютерные программы построены по модульному принципу с элементами объектно-ориентированного программирования. Программы предназначены для расчета энергетических параметров шумовых полей и проектирования архитектурно-планировочных и конструктивных средств защиты от шума. Экспериментальная проверка предложенных методик расчета прямого звука на стадионе во время футбольного матча и шумового режима в помещениях с массовым пребыванием людей показала их достаточную точность и надежность. Расхождение экспериментальных и расчетных данных в большинстве случаев не превышает ± 3 дБ.

6. Выполнено исследование процессов распространения звуковых волн в ячейках помещения между перегородками неполной высоты. Показано, что происходит преобразование структуры звукового поля, и зеркальное отражение звука от перегородок переходит в модель рассеянного отражения звука по зависимости Ламберта. Сравнительные расчеты в помещении с массовым пребыванием людей до и после устройства перегородок неполной высоты показали, что перегородки улучшают акустический режим помещений, улучшают слышимость и разборчивость речи при одновременном повышении конфиденциальности информации.

7. Разработанные методы расчета и их компьютерная реализация позволяют производить надежную оценку распространения звуковой энергии внутри зданий и на открытых территориях с учетом массового пребывания людей. Компьютерное моделирование дает возможность оценивать эффективность принимаемых мер по снижению шума и

производить выбор и проектирование наиболее экономичных средств акустического благоустройства.

Рекомендации по дальнейшему применению результатов работы:

- экспериментальные значения факторов направленности и акустической мощности женской, мужской и детской речи и разработанные методы расчета шума могут быть использованы проектировщиками для снижения шума в помещениях и обеспечения разборчивости речи, а также для определения необходимых параметров электроусиления музыки и речи в зрительных залах, для проектирования систем речевого оповещения при пожарах и других аварийных ситуациях;

- полученные результаты могут использоваться при подготовке методических рекомендаций по акустическому проектированию спортивных, торговых помещений, зрительных залов и других объектов с массовым пребыванием людей.

Перспективы дальнейших исследований. На основе предложенных методов расчета прямого и отраженного звука могут быть уточнены методики расчета и проектирования слышимости и разборчивости речи в помещениях с массовым пребыванием людей, усовершенствованы методы оценки акустических качеств зрительных залов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации: Постановление Правительства РФ от 16 сентября 2020 г. N 1479. Собрание законодательства Российской Федерации. - 2020. - N 39. - ст. 6056. Дата публикации: 01.01.2021. - 133 с.
2. Об утверждении требований к антитеррористической защищенности мест массового пребывания людей и объектов (территорий), подлежащих обязательной охране полицией, и форм паспортов безопасности таких мест и объектов (территорий): Постановление Правительства РФ от 25 марта 2015 г. N 272 (с изменениями и дополнениями). Собрание законодательства Российской Федерации. - 2015. - N 15. - ст. 2119. Дата публикации: 06.04.2015. - 40 с.
3. Прасол, В. М. Влияние шумового режима на архитектурно-планировочное решение железнодорожных вокзалов: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.10 / В. М. Прасол. - Москва, 1985. - 24 с.
4. Щиржецкий, Х. А. Оценка акустики храмовых зданий и сооружений на основе параметра меры высоты / Х. А. Щиржецкий, В. М. Алешкин, А. О. Субботкин // Строительство и реконструкция. - 2021. - № 5(97). - С. 115-121.
5. Щиржецкий, Х. А. К вопросу обеспечения условий акустического комфорта при проектировании и строительстве зданий и сооружений в комплексах православных храмов России / Х. А. Щиржецкий, В. Н. Сухов, В. М. Алешкин // БСТ: Бюллетень строительной техники. - 2020. - № 6(1030). - С. 26-27.
6. Алешкин, В. М. Проблематика современного состояния акустического проектирования молельных залов мечетей / В. М. Алешкин, Х. А. Щиржецкий, В. Н. Сухов // Строительство и реконструкция. - 2016. - № 3(65). - С. 88-95.
7. Щиржецкий, Х. А. К проблеме акустического проектирования современных залов многоцелевого назначения / Х. А. Щиржецкий, В. Н. Сухов, А. Х. Щиржецкий, В. М. Алешкин // Жилищное строительство. - 2019. - № 7. - С. 16-24.
8. Щиржецкий, Х. А. Проблематика акустического проектирования спортивно-зрелищных залов различного объема и вместимости / Х. А. Щиржецкий, В. Н. Сухов // БСТ: Бюллетень строительной техники. - 2017. - № 6(994). - С. 26-28.
9. Адамович, В. В. 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. - 543 с.

10. Яровая, Т. С. Особенности оценки разборчивости речи в местах с массовым пребыванием людей / Т. С. Яровая, А. И. Антонов // Актуальные проблемы городского строительства: Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, Пенза, 29-30 января 2019 года / Под редакцией А.В. Гречишкина. - Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2019. - С. 125-130.

11. Антонов, А. И. Экспериментальное определение энергетических параметров речи с целью использования их при оценке шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, Т. С. Яровая // Приволжский научный журнал. - 2017. - № 4(44). - С. 9-15.

12. Яровая, Т. С. Исследование акустического режима общеобразовательной школы как объекта с массовым пребыванием людей / Т. С. Яровая, А. И. Антонов // Современная наука: теория, методология, практика : Материалы 1-ой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Тамбов, 26-27 ноября 2019 года. - Тамбов: Издательство Першина Р. В., 2019. - С. 70-75.

13. Golovko, A. Measurement Method of the Reflected from Highways Noise in Urban Buildings / A. Golovko, V. Ledenev, A. Antonov // Advances in Intelligent Systems and Computing. - 2020. - Vol. 1116 AISC. - P. 100-109.

14. Осипов, Г. Л. 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.

15. Осипов, Г. Л. Градостроительные меры борьбы с шумом / Г. Л. Осипов и др. // М.: Стройиздат, 1975. - 215 с.

16. Зельцер, Э. Градостроительные аспекты защиты от шума / Эльмар Зельцер; перевод с нем. Н. Г. Лебедевой; под ред. И. А. Шишкина. - Москва: Стройиздат, 1979. - 71 с.

17. Осипов, Г. Л. Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика / Г. Л. Осипов, В. Е. Коробков, А. А. Климухин, А. С. Прохода, И. Л. Карагодина, Б. С. Зотов. - М.: Стройиздат, 1993. - 96 с.

18. Шубин, И. Л. Принципы проектирования шумозащитных сооружений в

городской среде / И. Л. Шубин, А. М. Гребенкин, Е. В. Гребенкина // Строительство и реконструкция. - 2017. - № 3(71). - С. 101-106.

19. Шубин, И. Л. Интеграция шумозащитных барьеров в окружающую среду / И. Л. Шубин, Н. Е. Щурова // Промышленное и гражданское строительство. - 2010. - № 6. - С. 19-22.

20. Иванов, Н. И. Акустические экраны для снижения шума в жилой застройке / Н. И. Иванов, Н. Г. Семенов, Н. В. Тюрина // Безопасность жизнедеятельности. - 2012. - № S4. - С. 1-24.

21. Гребенкин, А. М. Принципы проектирования шумозащитных сооружений в городской среде с учетом их интеграции / А. М. Гребенкин, Е. В. Гребенкина, И. Л. Шубин // Жилищное строительство. - 2014. - № 6. - С. 32-34.

22. Маньковский, В. С. Акустика студий и залов для звуковоспроизведения / В. С. Маньковский. - М.: Искусство, 1966. - 375 с.

23. Субботкин, А. О. К вопросу объективной оценки влияния реального шумового фона публики на оптимизацию нормативных требований к допустимому шумовому режиму в зрительных залах / А. О. Субботкин, Х. А. Щиржецкий, В. М. Алешкин // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. - 2018. - № 4(24). - С. 57-63.

24. 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. - 2015. - № 3(35). - С. 89-96.

25. Макриненко, Л. И. Акустика помещений общественных зданий / Л. И. Макриненко. - Москва: Стройиздат, 1986. - 173 с.

26. Леденев, В. И. Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании производственных зданий / В. И. Леденев. - Тамбов, 2000. - 156 с.

27. Антонов, А. И. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, И. Л. Шубин. - Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2020. - 274 с.

28. Леденев, В. И. Эквивалентные коэффициенты затухания звуковой энергии в помещениях и их использование при расчетах шума в производственных зданиях / В. И. Леденев, А. М. Макаров, И. В. Матвеева, Е. О. Соломатин // Приволжский научный журнал. - 2018. - № 1(45). - С. 25-32.

29. Макаров, А. М. Влияние рассеивающего звук оборудования на звукопоглощающие характеристики помещений / А. М. Макаров, О. Б. Демин, В. А. Дидицкий // *Academia. Архитектура и строительство*. - 2010. - № 3. - С. 219-222.
30. Жоголева, О. А. Влияние планировочных и конструктивных решений на выбор методов расчета энергетических характеристик шума в гражданских зданиях как системах акустически связанных помещений / О. А. Жоголева, О. О. Федорова, С. А. Жоголев // *Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : Материалы 4-й Международной научно-практической конференции института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета, Тамбов, 15-16 июня 2017 года*. - Тамбов: Издательство Першина Р. В., 2017. - С. 379-386.
31. Гусев, В. П. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных помещениях с перегородками неполной высоты / В. П. Гусев, А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. - 2017. - № 2(368). - С. 260-267.
32. 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 международной научно-практической конференции*. - НИИСФ-РААСН - Москва-Будва, 2011. - С.148-153.
33. Антонов, А. И. Влияние характера отражения звука от ограждений на выбор метода расчета воздушного шума в гражданских и промышленных зданиях / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, О. О. Федорова // *Приволжский научный журнал*. - 2017. - № 2(42). - С. 16-23.
34. 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.
35. 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.
36. Антонов, А. И. Расчеты шума в гражданских и промышленных зданиях при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений / А. И. Антонов, В. И. Леденев,

И. В. Матвеева, И. Л. Шубин. - Москва: Директ-Медиа, 2022. - 192 с.

37. Антонов, А. И. Методика оценки влияния звукопоглощающих облицовок на структуру звуковых полей в помещениях с импульсными источниками звука / А. И. Антонов, В. И. Леденев, О. А. Жоголева, И. В. Матвеева // БСТ: Бюллетень строительной техники. - 2022. - № 6(1054). - С. 34-36.

38. Леденев, В. И. Исследование влияния характеристик источников импульсного шума на распределение звуковой энергии в помещениях / В. И. Леденев, О. А. Жоголева, М. А. Пороженко, В. А. Аистов // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт: Материалы VIII-ой Международной научно-практической конференции, Тамбов, 20-22 сентября 2021 года. - Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А. В., 2021. - С. 216-218.

39. Антонов, А. И. Методы оценки пространственно-временных изменений импульсного шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, Е. О. Соломатин // Приволжский научный журнал. - 2021. - № 4(60). - С. 9-16.

40. Антонов, А. И. Методы расчета уровней прямого звука, излучаемого плоскими источниками шума в городской застройке / А. И. Антонов, В. И. Леденев, Е. О. Соломатин, В. П. Гусев // Жилищное строительство. - 2013. - № 6. - С. 13-15.

41. 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.

42. Соломатин, Е. О. Оценка шумового режима при разработке строительного-акустических средств снижения шума в зданиях с крупногабаритным оборудованием и на прилегающих к ним территориях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. - М., 2014. - 18 с.

43. Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. - М.: Изд-во АН СССР, 1957. - 502 с.

44. Морз, Ф. Колебания и звук / Ф. Морз. - Л.: Гостехтеориздат, 1949. - 496 с.

45. Скучик, Е. Основы акустики / Е. Скучик. - М.: Изд-во ин. литер., 1959. - Т.2. - 565 с.

46. Фурдуев, В.В. Электроакустика / В.В. Фурдуев. - М.: Гостехтеориздат, 1948. - 515 с.
47. Kuttruff, H. Room acoustics / H. Kuttruff. - London: Applied Science, 1973. - 298 p.
48. Лейзер, И. Г. О применимости методов геометрической акустики для расчета отражений звука от плоских поверхностей / И. Г. Лейзер // Акустический журнал. - 1966. - ТХП. - Вып.2. - С.206-212.
49. Лейзер, И. Г. Практическая оценка применимости геометрической акустики при отражении звука / И. Г. Лейзер, Т. И. Смирнова // Труды НИИСФ. М.: -1971. - Вып. 3. - С. 73-77.
50. Бреховских, Л. М. О границах применимости некоторых приближенных методов, употребляемых в акустике / Л. М. Бреховских // ДАН СССР. - 1947. - Т. XVIII. - С. 587.
51. Розенберг, Л. Д. Метод расчета звуковых полей, образованных распределенными системами излучателей, работающих в закрытых помещениях / Л. Д. Розенберг // ЖТФ. 1942. - Т. 12. - N 4-5. - С. 220-248.
52. Galaitis, A. G. Prediction of noise distribution in various enclosure from free-field measurements / A. G. Galaitis, W. N. Patterson // JASA. - 1976. - V.60, №4. - P. 848-856.
53. Сергеев, М. В. Акустические свойства прямоугольных помещений различных пропорций / М. В. Сергеев // Акустический журнал. 1979. - Т.25, №4. - С. 591-598.
54. 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.
55. Hirata, Y. Theory of rectangular room acoustics on the bases of image methods / Y. Hirata // JASJ. 1977. - V.33. №9. - P. 848-856.
56. Антонов, А. И. Комбинированный метод расчёта импульсного шума в производственных зданиях с помещениями правильной геометрической формы / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев, М. А. Пороженко // Современная наука: теория, методология, практика: Материалы IV Всероссийской национальной научно-практической конференции, Тамбов, 20-21 апреля 2022 года. - Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А. В., 2022. - С. 90-95.
57. Гусев, В. П. Расчеты шума в воздуховодах при оценке шумовых воздействий промышленных предприятий на городскую застройку / В. П. Гусев, В. И. Леденев,

А. И. Антонов, И. В. Матвеева // Жилищное строительство. - 2020. - № 7. - С. 3-7.

58. 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.

59. Schroeder, M. R. Digital simulations of sound transmission in reverberant spaces / M. R. Schroeder // JASA. - 1970. - V.47, №2. - P. 424-431.

60. Schroeder, M. R. Computer models for concert hall acoustics / M. R. Schroeder // AJP. - 1973. - V.41, №4. - P. 461-471.

61. Forsberg, P. A. Fully discrete ray tracing / P. A. Forsberg // Applied Acoustics. - 1985. - V.18, №6. - P. 393-397.

62. Davis, H. Noise propagation in corridors / H. Davis // JASA. - 1973. - V.54, №5. - P. 1253-1262.

63. Giuliana, B. A computers simulation procedure for the optimization of the joint effect of barriers and absorbing material in industrial halls / B. Giuliana, S. Renato // Internoise-83. - 1983. - P. 559-603.

64. 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. - P. 871-878.

65. Santon, F. Prevision des niveaux de bruit dans les ateliers textiles / F. Santon, A. Daumas // Rev, d'acoustique. - 1983. - №65. - P.109-112.

66. Dai, Gen-hua. Estimation of the influence of diffusion on reverberation using ray-tracing simulation / Gen-hua Dai // Acustica. - 1983.- V.54. - P. 43-45.

67. Embrechts, J. J. Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques / J. J. Embrechts // Acustica. - 1984. - V.51, №6. - P. 288-295.

68. Антонов, А. И. Математическое моделирование процессов распространения звуковой энергии в зданиях / А. И. Антонов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. - 2014. - № 3(53). - С. 17-23.

69. Антонов, А. И. Исследования длины среднего 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(17). - С. 115-121.

70. 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.
71. Юдин, Е. Я. Борьба с шумом на производстве: справочник / Е. Я. Юдин, Л. А. Борисов, И. В. Горенштейн [и др.]. М.: Стройиздат. 1987. - 218 с.
72. Леденев, В. И. Границы применимости диффузного метода при оценке акустической эффективности звукопоглощающих облицовок в производственных зданиях / В. И. Леденев, А. Е. Жданов, А. И. Антонов // Современные проблемы строительства и реконструкции зданий и сооружений: материалы междунар. науч.-техн. конф. Вологда. - 2003. - С. 130-133.
73. Леденев, В. И. Оценка точности и границ применимости статистических энергетических методов при расчетах шума в производственных помещениях энергетических объектов / В. И. Леденев, Е. О. Соломатин, В. П. Гусев // Academia. Архитектура и строительство. - 2010. - № 3. - С. 237-240.
74. 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.
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. Гусев, В. П. Энергетический метод оценки распространения шума в газоздушных трактах / В. П. Гусев, В. И. Леденев, Е. О. Соломатин // Academia. Архитектура и строительство. - 2010. - № 3. - С. 230-233.
77. Леденев, В. И. Инженерная оценка распространения шума в тоннелях и коридорах / В. И. Леденев, И. В. Матвеева, С. И. Крышов // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2011. - № 5-2(38). - С. 393-396.
78. Сидорина, А. В. Расчет шума в газоздушных каналах энергетических объектов методом функции источника / А. В. Сидорина, О. А. Жоголева, И. В. Матвеева // Строительство и реконструкция. - 2018. - № 4(78). - С. 89-96.
79. Антонов, А. И. Метод расчета шума в плоских производственных помещениях с равномерно распределенным в них шумным оборудованием / А. И. Антонов,

А. Ф. Зубков, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2016. - № 4(44). - С. 21-29.

80. Billon, A. Acoustic Predictions in Industrial Spaces Using a Diffusion Model / A. Billon, J. Picaut, V. Valeau, A. Sakout // Hindawi Publishing Corporation Advances in Acoustics and Vibration, 2012. - Vol. 2012.

81. Visentin, C. A numerical and experimental validation of the room acoustics diffusion theory inside long rooms / C. Visentin, N. Prodi, V. Valeau, J. A. Picaut // 21st International Congress on Acoustics. - Canada, 2013.

82. Visentin, C. A numerical investigation of the Fick's law of diffusion in room acoustics / C. Visentin, N. Prodi, V. Valeau, J. A. Picaut // The Journal of the Acoustical Society of America, 2012.

83. Foy, C. Modeling the reverberant sound field by a diffusion process: analytical approach to the scattering / C. Foy, J. A. Picaut, V. Valeau // Proceedings of Internoise. - San Francisco, 2015.

84. Foy, C. Introduction de la diffusivity des parois au sein du modèle de diffusion acoustique / C. Foy, J. A. Picaut, V. Valeau // CFA VISHNO, 2016.

85. Foy, C. Spatial variations of the mean free path in long rooms: Integration within the room-acoustic diffusion model / C. Foy, J. A. Picaut, V. Valeau, C. Prax, A. Sakout // Proceedings of the 22 International Congress on Acoustics. - Buenos Aires, 2016.

86. Ollendorff, F. Statistische Raumakustik als Diffusionsproblem (ein Vorschlag) // Acústica, 1969. - V.21. - № 2. - pp. 236-245.

87. Антонов, А. И. Расчет акустической эффективности звукопоглощающих облицовок, размещаемых в крупногабаритных газовоздушных каналах / А. И. Антонов, В. П. Гусев, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // Известия высших учебных заведений. Строительство. - 2021. - № 11(755). - С. 83-94.

88. Леденев, В. И. Расчет энергетических параметров шумовых полей в производственных помещениях сложной формы с технологическим оборудованием / В. И. Леденев, А. М. Макаров // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2008. - № 2(10). - С. 94-101.

89. Tsukernikov, I. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection / I. Tsukernikov, A. Antonov, V. Ledenev, I. Shubin,

T. Nevenchannaya // Procedia Engineering. - 2017. - No 176. - P. 218-225.

90. Giyasov, B.I. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound / B.I. Giyasov, V.I. Ledenyov, I.V. Matveeva // Magazine of Civil engineering. - 2018. - No. 1 (77). - P. 13-22.

91. Antonov, A. Calculation of impulse noise with mirror-diffuse reflection of sound from fences / A. Antonov, I. Matveeva, I. Shubin, I. Tsukernikov // Akustika. - 2019. - Vol. 34. - P. 90-105.

92. Шубин, И. Л. Программное обеспечение расчетов шума при акустическом благоустройстве в производственных зданиях / И. Л. Шубин, В. И. Леденев, А. И. Антонов // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2018 году / Российская академия архитектуры и строительных наук, - Москва: Издательство АСВ, 2019. - Т. 2 - С. 622-629.

93. Антонов, А. И. Цифровизация акустических расчетов при автоматизированном проектировании зданий / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, Н. П. Меркушева // Приволжский научный журнал. - 2019. - № 4(52). - С. 31-40.

94. Антонов, А. И. Компьютерное моделирование процессов формирования и распространения звуковой энергии в замкнутых воздушных объемах / А. И. Антонов, В. И. Леденев // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: Материалы 5-й Международной научно-практической конференции Института архитектуры, строительства и транспорта, Тамбов, 24-25 мая 2018 года. - Тамбов: Издательство Першина Р. В. - 2018. - С. 142-147.

95. Железняк, В. К. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации / В. К. Железняк, Ю. К. Макаров, А. А. Хорев // Специальная техника. - 2000. - №4. - С. 39-45.

96. Ефимов, А. П. Акустика: Справочник / А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков, В.И., Шоров; под ред. М.А. Сапожкова. - М.: Радио и связь, 1989. - 336 с.

97. Алдошина, И. А. Музыкальная акустика / И. А. Алдошина, Р. Приттс - СПб.: Композитор Санкт-Петербург, 2006. - 720 с.

98. Шубин, И.Л. Оценка энергетических параметров речи на основе импульсной характеристики помещения / И. Л. Шубин, А. И. Антонов, И. В. Матвеева, Т. С. Яровая //

Academia. Архитектура и строительство. - 2023. - № 1. - С. 108-114.

99. Гавриленко, О. В. Расчет и измерение разборчивости речи при малых отношениях сигнал-шум / О. В. Гавриленко, В. С. Дидковский, А. Н. Продеус // Электроника и связь, Тематический выпуск «Проблемы электроники», ч.1. - 2007. - С. 137-147.

100. ГОСТ 31252-2004 (ИСО 3740-2000) Шум машин. Руководство по выбору метода определения уровней звуковой мощности. - М.: Стандартинформ, 2005. - 39 с.

101. ГОСТ 31273-2003 (ИСО 3745-2003) Шум машин. Определение звуковой мощности по звуковому давлению. Точные методы для заглушенных камер. - М.: Стандартинформ, 2005. - 31 с.

102. ГОСТ Р ИСО 3744-2013. Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Технический метод в существенно свободном поле над звукоотражающей поверхностью. - М.: Стандартинформ, 2014. - 64 с.

103. Асминин, В. Ф. Анализ методик размещения оповещателей систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре / В. Ф. Асминин, А. И. Антонов, Е. Н. Епифанов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы, 2014. - Т. 1. - № 1 (5). - С. 232-234.

104. Асминин, В. Ф. Методика акустического проектирования одиночного пожарного речевого оповещателя / В. Ф. Асминин, Е. Н. Епифанов, А. И. Антонов, С. Н. Кузнецов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2013. - № 3 (31). - С. 121-127.

105. Асминин, В.Ф. Роль речевого оповещения и анализ его качественных характеристик, влияющих на обеспечение успешной эвакуации людей при пожаре / В. Ф. Асминин, Е. Н. Епифанов, А. И. Антонов, В. Я. Манохин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2012. - № 4 (28). - С. 142-149.

106. Яровая, Т. С. Математическое моделирование прямого звука при экологической оценке шумового режима в зданиях с массовым пребыванием людей / Т. С. Яровая, А. И. Антонов // В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов: Материалы международной научно-практической конференции. - Тамбов, 2016. - Т.4. - С. 204-210.

107. Антонов, А. И. Расчет распространения прямого звука в городской среде от объектов с массовым пребыванием людей / А. И. Антонов, И. Л. Шубин, Т. С. Яровая //

- Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. - 2017. - № 3(19). - С. 105-112.
108. Антонов, А. И. Расчет прямого звука от большого количества людей как от однотипных стохастических источников шума / А. И. Антонов, Т. С. Яровая // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт: Материалы 3-й международной научно-практической конференции института архитектуры, строительства и транспорта ТГТУ. - Тамбов, Изд-во Першина Р.В., 2016. - С. 64-68.
109. Антонов, А. И. Расчеты шума при акустическом благоустройстве в помещениях с массовым пребыванием людей / Антонов А. И., Леденев В. И., Яровая Т. С. // Строительство и реконструкция. 2017. - № 4 (72). - С. 94-100.
110. Розенберг, Л. Д. Метод расчета звуковых полей, образованных распределенными системами излучателей / Л. Д. Розенберг // ЖТФ. - 1942. - Т.12. - С. 102.
111. Krokstand, A. Acoustical design of the multipurpose Hjertrnis nall in Sanderfjord / A. Krokstand, S. Strom // Applied Acoustics. - 1979. - V. 12. - № 1. - P. 45-63.
112. Antonov, A. I. Coupling Coefficient of Flux Density and Density Gradient of Reflected Sound Energy in Quasi-Diffuse Sound Fields / A. I. Antonov, V. I. Ledenev, T. O. Nevenchannaya [et al.] // Journal of Theoretical and Computational Acoustics. - 2019. - Vol. 27. - No 2. - P. 1850053.
113. Яровая, Т. С. Численные методы расчета энергетических характеристик шума в помещениях с массовым пребыванием людей / Т. С. Яровая, А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // Приволжский научный журнал. - 2022. - № 4(64). - С. 26-34.
114. Антонов, А. И. Моделирование шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. Л. Шубин, Т. С. Яровая // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума, Тамбов, 17-21 мая 2023 года. - Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2023. - С. 22-24.
115. Браун, С. VisualBasic 6: учебный курс / С. Браун. - СПб., Питер, 2001. - 576 с.
116. Райтингер, М. VisualBasic 6: полное руководство / М. Райтингер, Г. Муч. - Киев, Изд.гр ВHV, 2000 - 720 с.
117. Яровая, Т. С. Программное обеспечение расчётов энергетических характеристик шума на объектах с массовым пребыванием людей / Т. С. Яровая, В. И. Леденев, А. И. Антонов // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт :

Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти академика РААСН Чернышова Е.М., Тамбов, 21-22 сентября 2022 года. - Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2022. - С. 284-288.

118. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619636 Российская Федерация. Расчет шумового режима на территориях с массовым пребыванием людей : № 2017616473 : заявл. 04.07.2017 : опубл. 30.08.2017 / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, Т. С. Яровая ; заявитель ФГБОУ ВО ТГТУ.

119. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619637 Российская Федерация. Расчет шумового режима в зданиях с массовым пребыванием людей : № 2017616472 : заявл. 04.07.2017 : опубл. 30.08.2017 / А. И. Антонов, В. И. Леденев, Т. С. Яровая; заявитель ФГБОУ ВО ТГТУ.

120. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611868 Российская Федерация. Комплексная программа по расчету звуковых полей в помещениях и проектированию средств защиты от шума : № 2019610550 : заявл. 22.01.2019 : опубл. 05.02.2019 / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО ТГТУ.

121. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661360 Российская Федерация. Расчет уровней, потоков и градиентов плотности отраженной звуковой энергии в помещениях с зеркально-диффузным отражением звука от ограждений : № 2021660593 : заявл. 05.07.2021 : опубл. 09.07.2021 / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев, Т. С. Яровая ; заявитель ФГБОУ ВО ТГТУ.

122. Яровая, Т. С. Средняя длина свободного пробега звука в помещениях с перегородками неполной высоты / Т. С. Яровая // Актуальные проблемы городского строительства : Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, Пенза, 26-27 февраля 2020 года / Под редакцией А.В. Гречишкина. - Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2020. - С. 155-161.

123. Антонов, А. И. Зависимость средней длины свободного пробега звука от положения источника в помещении с перегородками неполной высоты / А. И. Антонов, Т. С. Яровая // Современная наука: теория, методология, практика : Материалы 2-ой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Тамбов, 28-29 мая 2020 года. - Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А. В., 2020. - С. 75-78.

124. Антонов, А. И. Зависимость средней энергии от положения источника шума в

несоразмерном помещении / А. И. Антонов, Н. П. Меркушева, Т. С. Яровая // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. - 2020. - № 4(15). - С. 82-93.

125. Шубин, И. Л. О возможности расчета шума в децибелах "а" в местах массового пребывания людей / И. Л. Шубин, А. И. Антонов, Т. С. Яровая // Строительство и реконструкция. - 2018. - № 3(77). - С. 83-88.

126. Крышов, С. И. Расчет звуковых полей при проектировании производственных помещений // Автореферат дисс. канд. техн. наук. М.; 1981. - 24 с.

127. Сергеев, М. В. Исследования применимости формулы Эйринга к описанию реверберации в несоразмерных помещениях / М. В. Сергеев, В. Е. Косинова // Строительная акустика (акустическое благоустройство помещений, звукоизоляция, борьба с шумом): тр. НИИСФ. - М., 1983. - С. 10-18.

128. 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.

129. Леденев, В. И. Влияние оборудования на длину среднего свободного пробега отраженного звука в помещении/ В. И. Леденев, А. И. Антонов, И. В. Матвеева// Труды Четвертой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности», 16-18 июня 1999 г. / Под ред. Н.И. Иванова. - СПб. - 1999. - Т. 3. - С. 317.

130. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610070. Расчет уровней шума стационарного звукового поля и средней длины свободного пробега в производственных помещениях методом прослеживания звуковых лучей / А. И. Антонов, А. М. Макаров. (РФ); опубл. 09.01.2008.

131. Антонов, А. И. Выбор средней длины свободного пробега в помещениях для статистических методов расчета/ А. И. Антонов, В. И. Леденев // ТИХМ. - Тамбов. - 1990. - 10 с. - Деп. в ВНИИНТПИ Госстроя СССР в 1990 г. - Вып.3. - № 10765.

132. 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.

133. Матвеева, И. В. Инженерный метод оценки распределения звуковой энергии

в длинных помещениях / И. В. Матвеева, А. Ю. Воронков, В. И. Леденев, А. И. Антонов // Труды ТГТУ: Сб. научных статей. - Тамбов. - 1997. - Вып. 1. - С. 293-300.

134. Яровая, Т.С. Оценка влияния перегородок неполной высоты на акустические параметры помещения / Т. С. Яровая, А. И. Антонов, И. В. Матвеева, Е. О. Соломатин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. - 2023. - Т. 25, № 1. - С. 122-133.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Определение направленности и акустической мощности мужской и женской речи в
заглушенной камере НИИСФа

А.1 Результаты исследования женской речи

А.1.1 Тип речи 1. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 1 м

Таблица А.1.1.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 45°								
1	0	40.1	55.4	55.4	43.9	42.8	39.3	37.9
2	45	39.2	55.1	55.1	43.5	42.8	41.1	38.9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 90°								
1	0	41.2	54.3	55	41.8	37.5	38.4	34.2
3	90	39.9	55.3	56.1	42.4	43.4	40.2	38.5
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 135°								
1	0	39.2	51.0	50.8	37.3	31.0	30.0	23.8
4	135	42.2	53.0	55.5	39.8	38.5	37.8	35.2
Уровни измеренной звуковой энергии L_{pi} , дБ, в направлении 180°								
1	0	39.2	51.2	47.7	36.3	26.2	23.0	17.5
5	180	43.4	54.0	55.7	41.9	41.0	39.1	35.6
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, с учетом поправки на громкость речи								
1	0	41.4	54.4	55.7	42.0	41.4	39.1	36.8
2	45	40.5	54.1	55.4	41.6	41.4	40.9	37.8
3	90	42.7	53.4	54.6	41.4	35.5	37.2	32.5
4	135	38.4	52.4	50.9	39.5	33.9	31.3	25.4
5	180	37.2	51.6	47.7	36.4	26.6	23.0	18.7
Уровень звуковой мощности L_{pf} , дБ		41.1	53.4	54.0	40.9	38.0	37.8	34.1
Уровень звуковой мощности L_{wp} , дБ, с учетом метеоусловий камеры		51.9	64.3	64.9	51.8	48.9	48.7	45.0
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 63.5 дБА								

Таблица А.1.1.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1.080	1.275	1.460	1.281	2.175	1.344	1.860
2	45	0.884	1.190	1.363	1.168	2.191	2.035	2.322
3	90	1.457	1.011	1.134	1.116	0.564	0.878	0.689
4	135	0.541	0.804	0.491	0.720	0.390	0.225	0.134
5	180	0.411	0.662	0.232	0.350	0.072	0.033	0.029

А.1.2 Тип речи 2. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 1 м

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 45°								
1	0	45.6	57.6	54.4	47.8	45.4	40.6	40.2
2	45	44.5	57.0	54.0	47.6	45.8	41.6	43.0
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 90°								
1	0	45.1	55.3	50.5	45.4	41.1	38.4	35.0
3	90	44.2	56.8	52.9	45.8	45.7	41.4	42.7
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 135°								
1	0	42.6	53.8	49.8	43.5	38.2	32.7	26.9
4	135	44.2	56.8	54.0	47.7	46.8	42.2	42.9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 180°								
1	0	43.6	52.6	46.1	41.7	36	25.6	20.5
5	180	44.8	56.6	53.2	46.1	45.9	42.1	42.8
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, с учетом поправки на громкость речи								
1	0	44.7	57.0	53.6	46.9	45.9	41.6	42.1
2	45	43.6	56.4	53.2	46.7	46.3	42.6	44.9
3	90	45.6	55.5	51.2	46.5	41.4	38.6	34.5
4	135	43.1	54.0	49.4	42.7	37.4	32.1	26.2
5	180	43.5	53.0	46.5	42.5	36.0	25.1	19.9
Уровень звуковой мощности L_{pf} , дБ		44.4	55.4	51.5	45.7	43.0	39.4	40.1
Уровень звуковой мощности L_{wp} , дБ, с учетом метеоусловий камеры		55.3	66.2	62.4	56.5	53.9	50.3	51.0
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 63.9 дБА								

Таблица А.1.2.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1.070	1.438	1.625	1.312	1.960	1.653	1.597
2	45	0.830	1.252	1.482	1.253	2.149	2.094	3.043
3	90	1.316	1.018	0.935	1.197	0.686	0.833	0.273
4	135	0.740	0.721	0.618	0.499	0.273	0.185	0.040
5	180	0.811	0.572	0.317	0.476	0.201	0.037	0.009

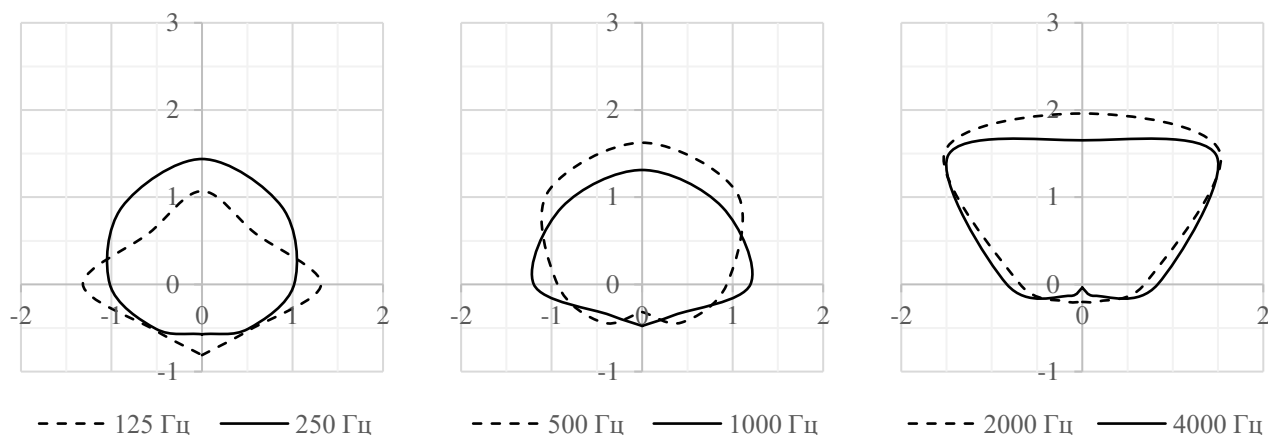


Рисунок А.1.2 – Диаграммы фактора направленности женской речи, тип 2

А.1.3 Тип речи 3. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 1 м

Таблица А.1.3.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 45°								
1	0	26.1	52.0	53.8	43.7	43.0	38.5	33.1
2	45	25.0	51.5	54.9	44.1	42.3	37.4	34.5
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 90°								
1	0	26.4	49.7	53.9	45.4	38.3	34.9	27.9
3	90	25.8	52.4	53.0	44.5	43.6	39.3	34.9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 135°								
1	0	27.4	49.8	51.2	40.0	38.1	31.2	22.4
4	135	29.0	52.9	52.8	42.1	42.3	38.6	33.9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 180°								
1	0	26.8	48.1	51.5	38.4	33.2	29.3	17.9
5	180	27.9	51.2	54.0	42.4	40.3	39.6	34.2
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, с учетом поправки на громкость речи								
1	0	27.2	52.1	53.4	43.2	42.3	39.0	34.0

Окончание табл. А.1.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	45	26.1	51.6	54.5	43.6	41.6	37.9	35.4
3	90	27.8	49.4	54.3	44.0	37.0	34.6	27.0
4	135	25.6	49.0	51.8	41.1	38.1	31.6	22.5
5	180	26.1	49.0	50.9	39.2	35.2	28.7	17.7
Уровень звуковой мощности L_{pf} , дБ		26.8	50.2	53.7	43.1	39.2	35.4	31.1
Уровень звуковой мощности L_{wp} , дБ, с учетом метеоусловий камеры		37.6	61.0	64.6	54.0	50.1	46.3	42.0
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 63.0 дБА								

Таблица А.1.3.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1.106	1.573	0.939	1.017	2.038	2.274	1.968
2	45	0.858	1.402	1.210	1.115	1.735	1.765	2.717
3	90	1.270	0.844	1.154	1.238	0.596	0.825	0.393
4	135	0.765	0.770	0.647	0.629	0.775	0.414	0.140
5	180	0.858	0.770	0.523	0.403	0.393	0.212	0.046

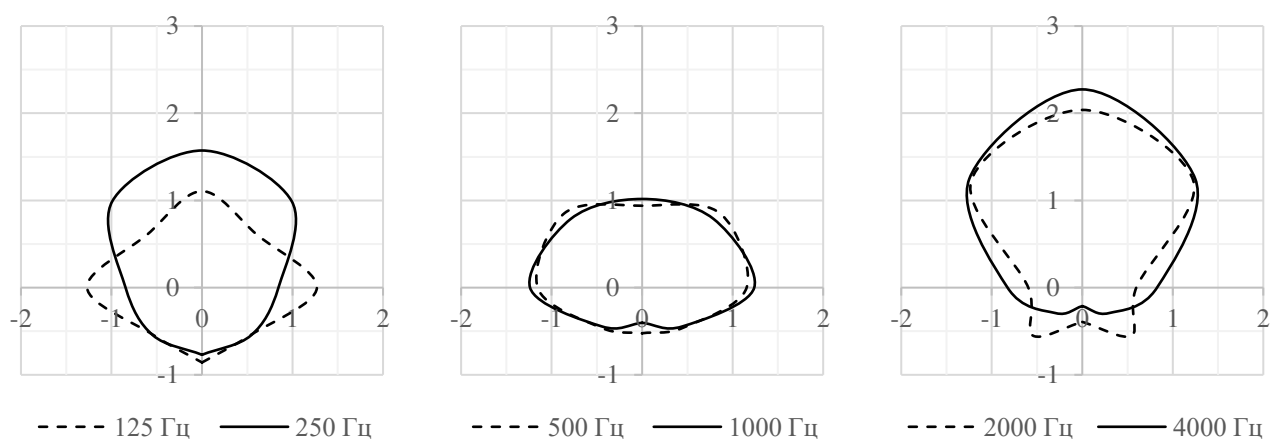


Рисунок А.1.3 – Диаграммы фактора направленности женской речи, тип 3

А.2 Результаты исследования мужской речи

А.2.1 Тип речи 1. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 1 м

Таблица А.2.1.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 45°								
1	0	56.2	58.8	58.1	49.1	48.6	41.5	32.7
2	45	54.9	58.6	57.0	45.7	43.5	38.3	34.8

Окончание табл. А.2.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 90°								
1	0	53.5	55.5	57.5	43.7	41.3	35.2	30.1
3	90	56.9	57.8	58.6	47.1	46.9	42.5	35.9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 135°								
1	0	51.5	50.9	54.1	39.6	39.5	29.1	22.2
4	135	55.7	55.1	56.9	46.7	45.2	40.5	34.3
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 180°								
1	0	52.6	50.5	53.1	37.5	36.5	25.0	18.8
5	180	56.6	56.7	58.3	43.5	42.9	40.1	35.9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, с учетом поправки на громкость речи								
1	0	56.4	57.1	58.0	46.6	45.9	41.2	34.7
2	45	55.1	56.9	56.9	43.2	40.8	38.0	36.8
3	90	53.0	54.8	56.8	43.2	40.3	33.9	28.9
4	135	52.2	52.9	55.2	39.5	40.2	29.8	22.6
5	180	52.4	50.9	52.8	40.6	39.5	26.1	17.6
Уровень звуковой мощности L_{pf} , дБ		53.6	55.1	56.4	42.6	40.8	35.3	32.4
Уровень звуковой мощности L_{wp} , дБ, с учетом метеоусловий камеры		64.5	66.0	67.3	53.5	51.7	46.2	43.3
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 65.6 дБА								

Таблица А.2.1.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1.881	1.575	1.438	2.504	3.238	3.838	1.689
2	45	1.394	1.504	1.116	1.148	1.001	1.850	2.725
3	90	0.860	0.932	1.108	1.144	0.895	0.715	0.442
4	135	0.715	0.599	0.749	0.488	0.870	0.278	0.104
5	180	0.749	0.377	0.438	0.629	0.742	0.119	0.033

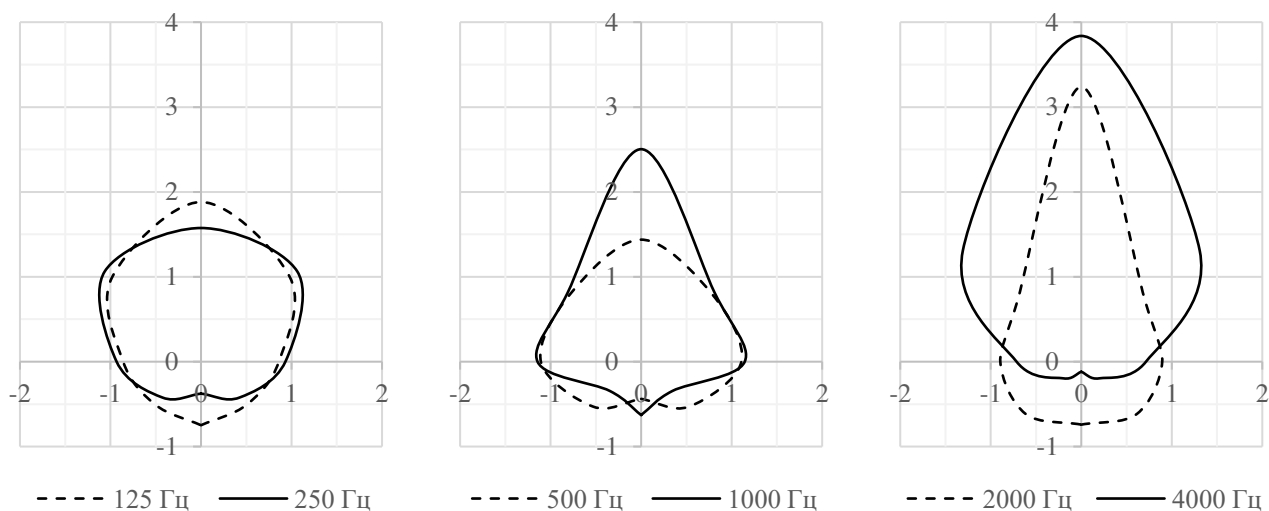


Рисунок А.2.1 – Диаграммы фактора направленности мужской речи, тип 1

А.2.2 Тип речи 2. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 1 м

Таблица А.2.2.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 45°								
1	0	56.2	58.8	61.9	51.1	49.9	47.5	39.6
2	45	55.3	57.9	61.4	47.7	46.5	43.4	42.2
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 90°								
1	0	54.6	55.2	60.9	44.5	45.0	42.6	34.9
3	90	58.9	57.9	61.8	48.9	51.7	45.0	42.6
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 135°								
1	0	54.4	52.6	57.9	42.5	41.6	35.0	26.9
4	135	58.1	56.3	59.5	47.7	49.8	44.2	41.7
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, в направлении 180°								
1	0	53.1	51.3	55.1	40.8	36.7	26.6	19.9
5	180	57.8	56.2	60.0	47.5	45.5	42.1	41.8
Уровни звукового давления L_{pi} , дБ, с учетом поправки на громкость речи								
1	0	57.8	57.3	60.8	48.8	49.2	44.7	41.4
2	45	56.9	56.4	60.3	45.4	45.8	40.6	44.0
3	90	53.5	54.6	59.9	44.4	42.5	42.3	33.7
4	135	54.1	53.6	59.2	43.6	41.0	35.5	26.6
5	180	53.1	52.4	55.9	42.1	40.4	29.2	19.5
Уровень звуковой мощности L_{pf} , дБ		55.0	55.0	59.8	44.7	43.8	40.7	39.2
Уровень звуковой мощности L_{wp} , дБ, с учетом метеоусловий камеры		65.9	65.9	70.6	55.6	54.7	51.5	50.1
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 60.1 дБА								

Таблица А.2.2.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1.892	1.690	1.274	2.572	3.454	2.527	1.665
2	45	1.538	1.373	1.123	1.178	1.579	0.983	3.008
3	90	0.703	0.910	1.035	0.923	0.738	1.443	0.281
4	135	0.807	0.721	0.872	0.773	0.523	0.306	0.055
5	180	0.641	0.546	0.408	0.550	0.455	0.071	0.011

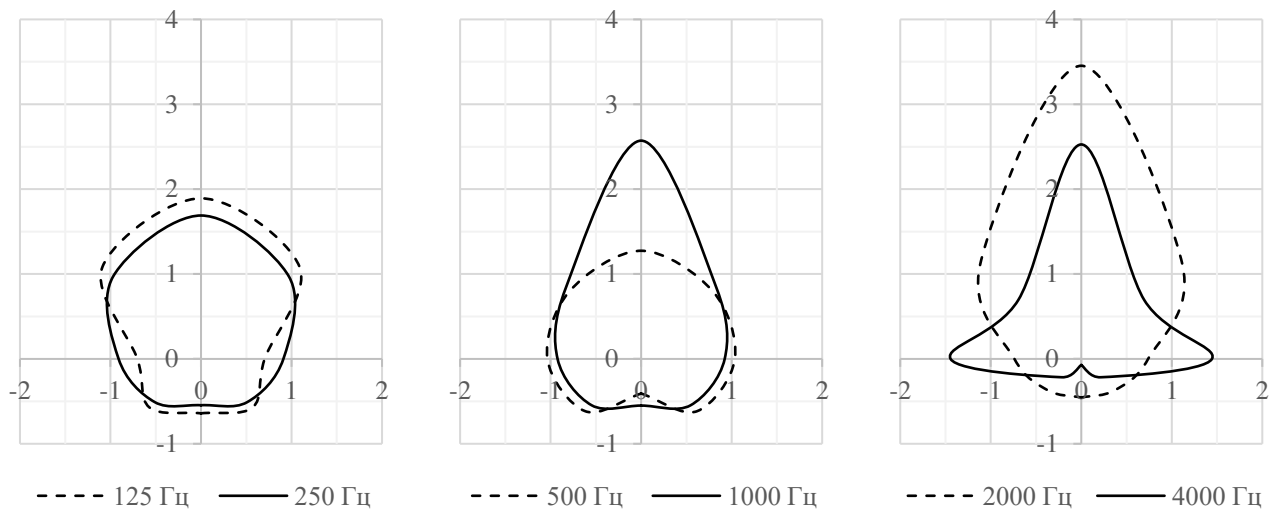


Рисунок А.2.2 – Диаграммы фактора направленности мужской речи, тип 2

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Определение направленности и акустической мощности мужской, женской и детской речи в помещениях при наличии отраженного шума

Б.1 Результаты исследования женской речи

Б.1.1 Тип речи 1. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 1 м

Таблица Б.1.1.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L'_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	36.36	60.46	59.97	50.68	45.72	42.68	36.05
2	45	37.37	60.18	59.65	50.20	45.44	42.24	35.72
3	90	36.53	59.11	59.11	49.99	45.47	41.36	32.27
4	135	34.85	57.45	57.55	47.49	42.43	38.69	29.76
5	180	34.82	56.95	56.71	45.95	40.53	37.81	29.92
Эквивалентные уровни звукового давления отраженной звуковой энергии $L_{отр}$, дБ, в точке РТ2								
1	0	34.56	57.12	55.57	45.24	41.10	35.65	23.92
2	45	36.36	57.48	55.80	44.41	40.84	36.87	27.17
3	90	36.11	56.91	55.83	45.58	42.36	37.69	27.83
4	135	34.66	56.18	56.16	46.95	41.27	36.81	28.61
5	180	34.54	56.17	56.19	45.07	39.95	36.42	28.27
Средний уровень, $\bar{L}_{отр}$, дБ		35.25	56.77	55.91	45.45	41.10	36.69	27.16
Скорректированные эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	37.05	60.11	60.31	50.89	45.72	43.72	39.29
2	45	36.26	59.47	59.76	51.24	45.70	42.06	35.71
3	90	35.67	58.97	59.19	49.86	44.21	40.36	31.60
4	135	35.44	58.04	57.30	45.99	42.26	38.57	28.31
5	180	35.53	57.55	56.43	46.33	41.68	38.08	28.81
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии $L'_{пр}$, дБ								
1	0	32.49	57.49	58.42	49.49	43.96	42.80	39.03
2	45	29.70	56.24	57.54	49.96	43.93	40.63	35.09
3	90	25.98	55.11	56.54	47.99	41.43	38.04	29.79
4	135	23.14	52.37	51.98	37.64	36.39	34.30	22.69
5	180	24.46	50.19	47.80	39.56	33.52	32.85	24.29
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии $L_{пр}$, дБ, без учета отраженного от пола звука								
1	0	32.08	57.08	58.00	49.07	43.54	42.38	38.62
2	45	29.28	55.83	57.12	49.55	43.51	40.22	34.68
3	90	25.57	54.70	56.12	47.57	41.02	37.62	29.38
4	135	22.73	51.95	51.57	37.23	35.98	33.89	22.28
5	180	24.05	49.78	47.38	39.15	33.11	32.43	23.88
Средний уровень звукового давления прямой звуковой энергии $\bar{L}_{пр}$, дБ		27.00	54.61	55.68	47.19	41.22	38.20	31.74
Акустическая мощность L_w , дБ		37.99	65.60	66.67	58.18	52.21	49.19	42.73
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 65.7 дБА								

Таблица Б.1.1.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	3.224	1.767	1.707	1.542	1.708	2.623	4.877
2	45	1.694	1.325	1.393	1.721	1.696	1.593	1.970
3	90	0.720	1.022	1.107	1.092	0.954	0.876	0.581
4	135	0.375	0.543	0.387	0.101	0.299	0.371	0.113
5	180	0.508	0.329	0.148	0.157	0.154	0.265	0.164

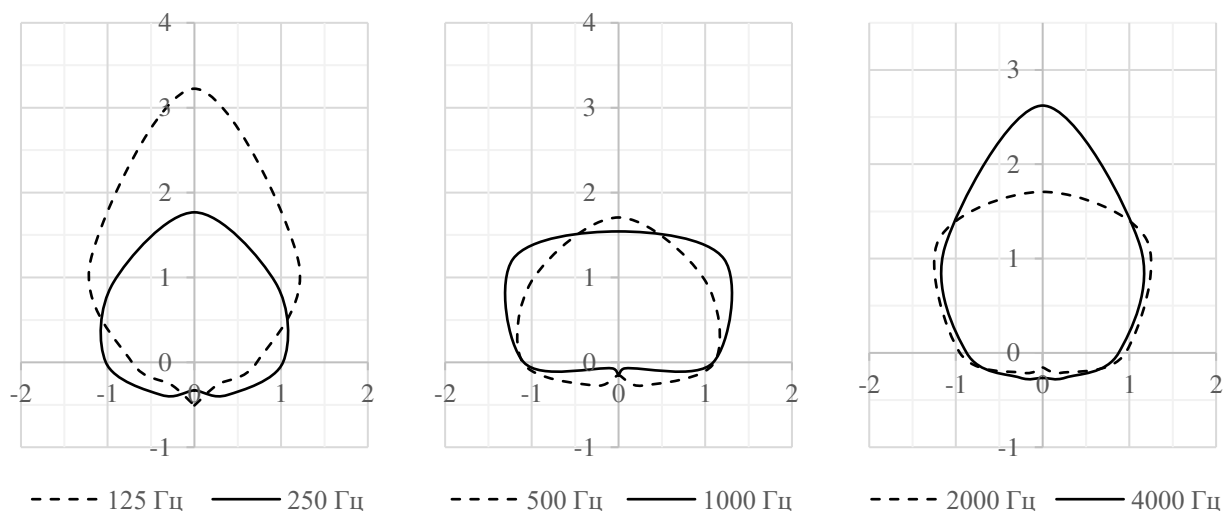


Рисунок Б.1.1 – Диаграммы фактора направленности женской речи, тип 1

Б.1.2 Тип речи 2. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 1 м

Таблица Б.1.2.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L'_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	46.09	62.58	62.97	52.26	48.35	43.45	42.31
2	45	47.83	61.54	62.18	51.36	45.79	41.26	39.32
3	90	48.96	61.27	60.37	51.74	43.61	40.16	36.67
4	135	44.88	61.54	59.97	49.67	44.54	39.04	32.79
5	180	46.26	60.39	58.54	50.22	43.47	37.20	32.02
Эквивалентные уровни звукового давления отраженной звуковой энергии $L_{отр}$, дБ, в точке РТ2								
1	0	43.81	59.45	56.58	45.94	41.07	35.09	27.82
2	45	46.43	58.86	56.55	46.19	38.77	33.01	26.9
3	90	46.76	59.1	57.83	47.31	41.34	35.65	30.01
4	135	43.63	60.07	59.41	47.86	43.79	37.74	32.21
5	180	44.29	59.3	58.09	47.55	43.52	36.51	31.66
Средний уровень, $\bar{L}_{отр}$, дБ		44.98	59.36	57.69	46.97	41.70	35.60	29.72

Окончание табл. Б.1.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорректированные эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	47.26	62.49	64.08	53.29	48.98	43.96	44.21
2	45	46.38	62.04	63.32	52.14	48.72	43.85	42.14
3	90	47.18	61.53	60.23	51.40	43.97	40.11	36.38
4	135	46.23	60.83	58.25	48.78	42.45	36.90	30.30
5	180	46.95	60.45	58.14	49.64	41.65	36.29	30.08
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии L'_{np} , дБ								
1	0	43.48	59.69	62.98	52.18	48.11	43.30	44.06
2	45	40.98	58.78	61.98	50.63	47.79	43.17	41.90
3	90	43.29	57.62	56.84	49.54	40.26	38.30	35.39
4	135	40.43	55.65	49.86	44.38	35.12	31.45	22.67
5	180	42.70	54.25	49.04	46.43	24.74	28.78	21.20
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии L_{np} , дБ, без учета отраженного от пола звука								
1	0	43.07	59.27	62.57	51.77	47.70	42.89	43.65
2	45	40.56	58.37	61.56	50.21	47.38	42.76	41.48
3	90	42.87	57.21	56.43	49.12	39.85	37.88	34.97
4	135	40.02	55.23	49.45	43.96	34.71	31.04	22.25
5	180	42.29	53.83	48.63	46.01	24.33	28.37	20.79
Средний уровень звукового давления прямой звуковой энергии $\bar{L}_{np}$, дБ		41.76	57.26	58.24	48.78	43.43	39.43	37.84
Акустическая мощность L_w , дБ		52.75	68.25	69.23	59.77	54.43	50.43	48.83
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 68.1 дБА								

Таблица Б.1.2.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1.352	1.591	2.709	1.990	2.668	2.215	3.809
2	45	0.760	1.292	2.149	1.392	2.478	2.151	2.314
3	90	1.293	0.989	0.658	1.083	0.438	0.700	0.517
4	135	0.670	0.628	0.132	0.330	0.134	0.145	0.028
5	180	1.130	0.454	0.109	0.529	0.012	0.078	0.020

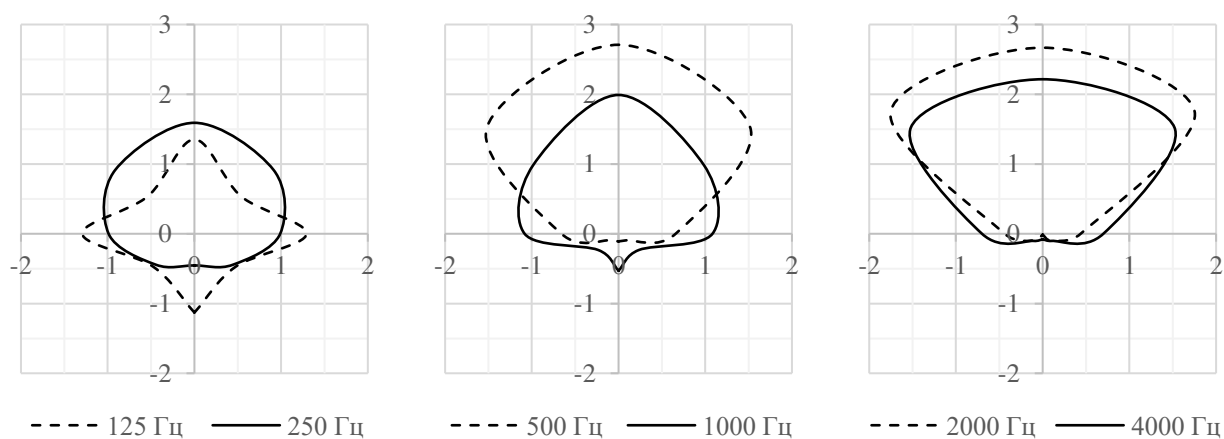


Рисунок Б.1.2 – Диаграммы фактора направленности женской речи, тип 2

Б.1.3 Тип речи 3. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 0.7 м

Таблица Б.1.3.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L'_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	33.68	57.68	57.86	48.09	46.14	41.46	36.88
2	45	39.95	58.22	59.32	48.89	44.98	41.02	33.76
3	90	40.94	57.12	59.09	50.36	42.04	38.97	30.19
4	135	38.87	56.27	58.68	48.73	44.65	37.92	28.21
5	180	37.68	56.25	56.9	46.79	41.55	35.85	27.06
Эквивалентные уровни звукового давления отраженной звуковой энергии $L_{отр}$, дБ, в точке РТ2								
1	0	32.31	50.47	53.11	41.81	38.22	32.13	25.14
2	45	39.32	51.14	53.3	42.07	37.77	33.02	25.71
3	90	40.41	51.82	53.15	42.82	38.22	33.64	26.45
4	135	38.5	51.59	54.58	43.2	39.77	34.78	27.21
5	180	37.24	51.65	54.6	42.64	38.54	33.84	26.23
Средний уровень, $\bar{L}_{отр}$, дБ		37.56	51.33	53.75	42.51	38.50	33.48	26.15
Скорректированные эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	38.93	58.54	58.50	48.79	46.42	42.81	37.89
2	45	38.19	58.41	59.77	49.33	45.71	41.48	34.20
3	90	38.09	56.63	59.69	50.05	42.32	38.81	29.89
4	135	37.93	56.01	57.85	48.04	43.38	36.62	27.15
5	180	38.00	55.93	56.05	46.66	41.51	35.49	26.98
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии $L'_{пр}$, дБ								
1	0	33.34	57.64	56.75	47.64	45.67	42.28	37.59
2	45	29.70	57.48	58.54	48.33	44.81	40.75	33.48
3	90	28.94	55.13	58.43	49.22	40.04	37.34	27.58
4	135	27.41	54.23	55.74	46.64	41.71	33.81	20.69
5	180	28.14	54.11	52.27	44.59	38.57	31.30	19.88
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии $L_{пр}$, дБ, без учета отраженного от пола звука								
1	0	33.13	57.43	56.55	47.43	45.46	42.07	37.39
2	45	29.49	57.27	58.33	48.13	44.61	40.54	33.27
3	90	28.73	54.93	58.22	49.01	39.83	37.13	27.37
4	135	27.20	54.02	55.54	46.43	41.50	33.60	20.48
5	180	27.93	53.90	52.06	44.38	38.36	31.09	19.67
Средний уровень звукового давления прямой звуковой энергии $\bar{L}_{пр}$, дБ		28.97	55.69	57.58	48.11	42.39	38.11	30.21
Акустическая мощность L_w , дБ		36.86	63.59	65.47	56.00	50.28	46.01	38.10
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 64.1 дБА								

Таблица Б.3.1.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	2.607	1.492	0.789	0.856	2.031	2.491	5.225
2	45	1.128	1.438	1.189	1.004	1.666	1.749	2.025
3	90	0.947	0.838	1.160	1.231	0.555	0.797	0.521
4	135	0.666	0.681	0.625	0.679	0.815	0.354	0.106
5	180	0.787	0.662	0.281	0.424	0.395	0.199	0.088

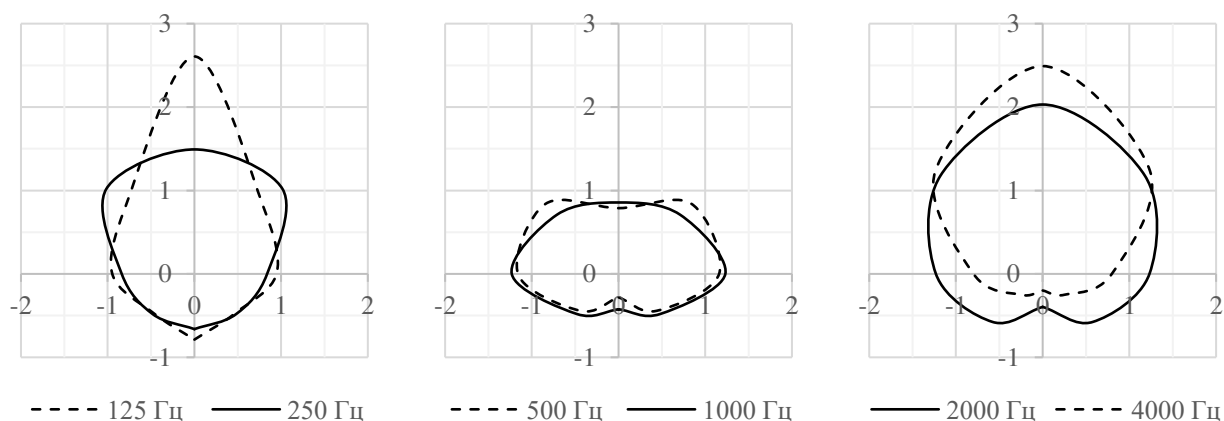


Рисунок Б.1.3 – Диаграммы фактора направленности женской речи, тип 3

Б.1.4 Тип речи 4. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 0.7 м

Таблица Б.1.4.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L'_{\text{общ}}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	46.80	57.08	58.1	48.31	41.71	39.01	41.57
2	45	47.66	56.81	59.46	52.35	42.98	37.60	41.96
3	90	44.52	59.38	60.07	52.99	40.55	42.05	40.88
4	135	47.75	56.17	56.69	48.22	37.72	36.35	34.48
5	180	45.11	57.34	57.66	50.02	39.4	37.19	32.56
Эквивалентные уровни звукового давления отраженной звуковой энергии $L_{\text{отр}}$, дБ, в точке РТ2								
Уровни отраженной звуковой энергии $L_{\text{отр}}$, дБ, в точке РТ2								
1	0	44.22	53.16	53.02	42.69	33.64	30.22	29.39
2	45	44.41	52.51	53.14	45.32	35.02	28.86	28.97
3	90	40.87	54.59	53.98	44.51	36.19	33.55	30.45
4	135	43.39	52.67	52.64	43.07	35.4	32.64	30.98
5	180	41.49	54.71	54.04	45.73	37.63	35.43	32.12
Средний уровень, $\bar{L}_{\text{отр}}$, дБ		42.88	53.53	53.36	44.26	35.58	32.14	30.38

Окончание табл. Б.1.4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорректированные эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	45.46	57.45	58.44	49.88	43.65	40.93	42.56
2	45	46.13	57.83	59.68	51.29	43.54	40.88	43.37
3	90	46.53	58.32	59.45	52.74	39.94	40.64	40.81
4	135	47.24	57.03	57.41	49.41	37.90	35.85	33.88
5	180	46.50	56.16	56.98	48.55	37.35	33.90	30.82
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии $L'_{пр}$, дБ								
1	0	42.01	55.22	56.85	48.52	42.92	40.33	42.30
2	45	43.37	55.84	58.55	50.35	42.79	40.27	43.15
3	90	44.10	56.59	58.25	52.09	37.99	39.99	40.41
4	135	45.27	54.49	55.28	47.86	34.15	33.50	31.40
5	180	44.05	52.79	54.55	46.57	32.72	29.27	21.59
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии $L_{пр}$, дБ, без учета отраженного от пола звука								
1	0	41.80	55.01	56.65	48.31	42.71	40.12	42.09
2	45	43.17	55.63	58.34	50.14	42.58	40.06	42.95
3	90	43.89	56.38	58.04	51.88	37.78	39.78	40.20
4	135	45.07	54.29	55.07	47.65	33.95	33.29	31.19
5	180	43.84	52.58	54.34	46.36	32.51	29.06	21.38
Средний уровень звукового давления прямой звуковой энергии $\bar{L}_{пр}$, дБ		44.12	55.63	57.46	50.40	39.48	38.79	40.24
Акустическая мощность L_w , дБ		52.01	63.53	65.35	58.30	47.37	46.68	48.14
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 64.5 дБА								

Таблица Б.1.4.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0.587	0.867	0.830	0.618	2.108	1.358	1.530
2	45	0.803	0.999	1.225	0.942	2.045	1.340	1.863
3	90	0.950	1.188	1.143	1.406	0.677	1.257	0.991
4	135	1.245	0.734	0.577	0.531	0.280	0.282	0.124
5	180	0.938	0.495	0.488	0.394	0.201	0.106	0.013

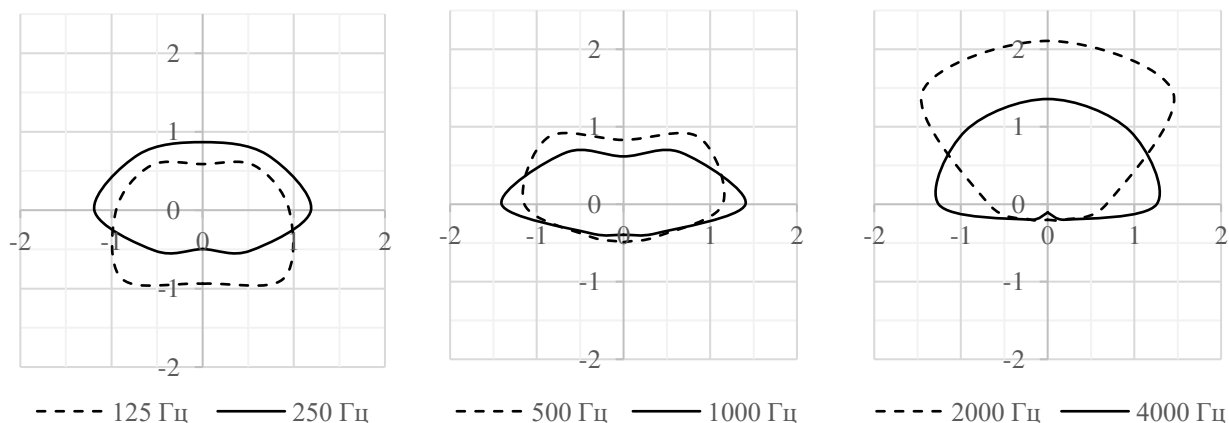


Рисунок Б.1.4 – Диаграммы фактора направленности женской речи, тип 4

Б.2 Результаты исследования мужской речи

Б.2.1 Тип речи 1. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 1 м

Таблица Б.2.1.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L'_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	66.72	64.18	62.71	52.80	49.61	43.11	38.42
2	45	66.61	63.75	61.28	50.44	46.70	40.39	33.07
3	90	63.70	63.23	62.57	52.09	45.14	36.83	29.86
4	135	64.26	62.51	61.63	51.50	45.51	37.03	29.77
5	180	64.26	61.94	60.67	51.27	47.60	38.58	29.22
Эквивалентные уровни звукового давления отраженной звуковой энергии $L_{отр}$, дБ, в точке РТ2								
1	0	61.80	61.16	57.98	46.16	42.59	34.16	25.84
2	45	62.11	60.83	57.30	45.51	42.46	34.93	26.73
3	90	61.73	59.76	58.75	48.59	42.55	34.44	27.03
4	135	62.69	60.27	59.40	49.70	44.40	36.19	29.07
5	180	62.03	61.28	58.41	48.20	45.98	36.47	27.32
Средний уровень, $\bar{L}_{отр}$, дБ		62.07	60.66	58.37	47.63	43.60	35.24	27.20
Скорректированные эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	66.99	63.68	63.10	54.27	50.62	44.19	39.78
2	45	66.57	63.58	62.35	52.56	47.84	40.70	33.54
3	90	64.04	64.13	62.19	51.13	46.19	37.63	30.03
4	135	63.64	62.90	60.60	49.43	44.71	36.08	27.90
5	180	64.30	61.32	60.63	50.70	45.22	37.35	29.10
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии $L'_{пр}$, дБ								
1	0	65.34	60.78	61.38	53.25	49.69	43.62	39.55
2	45	64.71	60.58	60.21	50.95	45.87	39.31	32.46
3	90	59.79	61.62	59.94	48.68	42.88	34.10	27.08
4	135	58.63	59.10	56.81	45.01	38.69	29.20	20.80
5	180	60.45	53.38	56.88	47.89	40.44	33.44	25.00
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии $L_{пр}$, дБ, без учета отраженного от пола звука								
1	0	64.92	60.36	60.96	52.84	49.27	43.21	39.13
2	45	64.30	60.17	59.79	50.53	45.45	38.89	32.05
3	90	59.37	61.20	59.53	48.26	42.46	33.69	26.66
4	135	58.21	58.68	56.39	44.60	38.27	28.79	20.38
5	180	60.03	52.97	56.47	47.48	40.03	33.03	24.59
Средний уровень звукового давления прямой звуковой энергии $\bar{L}_{пр}$, дБ		61.55	60.26	59.05	49.76	43.45	36.19	29.92
Акустическая мощность L_w , дБ		72.54	71.25	70.04	59.76	54.45	47.18	40.91
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 69.3 дБА								

Таблица Б.2.1.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	2.176	1.025	1.554	2.555	3.819	5.031	8.337
2	45	1.883	0.979	1.188	1.503	1.584	1.864	1.631
3	90	0.606	1.243	1.117	0.891	0.796	0.562	0.472
4	135	0.464	0.696	0.543	0.383	0.303	0.182	0.111
5	180	0.706	0.187	0.552	0.743	0.454	0.483	0.293

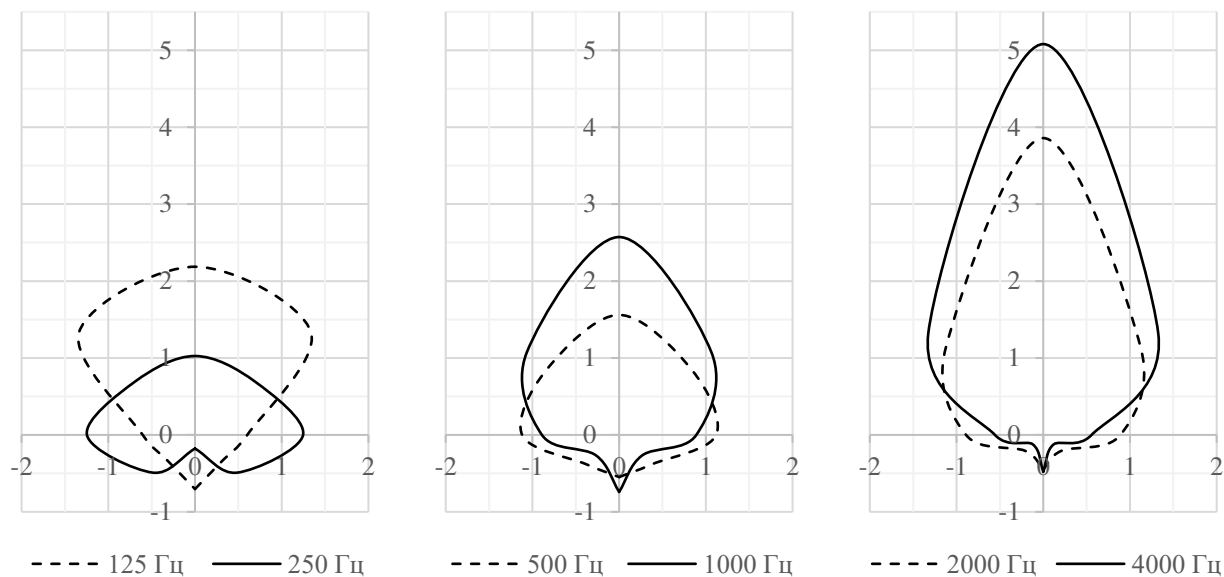


Рисунок Б.1.2 – Диаграммы фактора направленности мужской речи, тип 1

Б.2.2 Тип речи 2. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 0.7 м

Таблица Б.2.2.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L'_{\text{общ}}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	66.31	62.37	59.72	49.72	49.23	42.91	38.88
2	45	65.50	63.75	62.42	53.75	50.71	44.48	35.72
3	90	64.98	60.01	60.02	50.3	44.79	36.62	28.34
4	135	65.45	59.55	60.78	51.65	47.11	36.21	28.03
5	180	63.93	58.43	58.78	47.97	44.03	36.22	28.01
Эквивалентные уровни звукового давления отраженной звуковой энергии $L_{\text{отр}}$, дБ, в точке РТ2								
1	0	59.52	55.66	54.05	41.66	40.11	32.79	25.88
2	45	60.84	57.48	56.37	47.3	43.05	35.30	26.50
3	90	59.63	56.45	54.33	44.6	41.39	32.48	26.3
4	135	59.88	57.26	56.64	48.05	43.71	35.19	27.51
5	180	59.16	56.52	55.6	44.7	41.37	35.15	27.48
Средний уровень, $\bar{L}_{\text{отр}}$, дБ		59.81	56.67	55.40	45.26	41.93	34.18	26.73

Окончание табл. Б.2.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорректированные эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	66.60	63.38	61.07	53.32	51.05	44.30	39.73
2	45	64.47	62.94	61.45	51.71	49.59	43.36	35.95
3	90	65.16	60.23	61.09	50.96	45.33	38.32	28.77
4	135	65.38	58.96	59.54	48.86	45.33	35.20	27.25
5	180	64.58	58.58	58.58	48.53	44.59	35.25	27.26
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии L'_{np} , дБ								
1	0	65.58	62.35	59.72	52.60	50.49	43.87	39.52
2	45	62.67	61.79	60.23	50.62	48.78	42.81	35.42
3	90	63.67	57.75	59.74	49.62	42.73	36.25	24.69
4	135	63.98	55.16	57.46	46.42	42.73	28.67	18.57
5	180	62.83	54.18	55.78	45.83	41.27	28.89	18.64
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии L_{np} , дБ, без учета отраженного от пола звука								
1	0	65.38	62.15	59.51	52.39	50.28	43.66	39.31
2	45	62.46	61.58	60.02	50.41	48.57	42.61	35.21
3	90	63.46	57.54	59.53	49.42	42.52	36.04	24.48
4	135	63.77	54.95	57.25	46.21	42.52	28.47	18.36
5	180	62.62	53.97	55.57	45.62	41.06	28.69	18.44
Средний уровень звукового давления прямой звуковой энергии $\bar{L}_{np}$, дБ		63.47	58.93	59.18	49.27	45.63	38.89	31.40
Акустическая мощность L_w , дБ		71.37	66.82	67.07	57.16	53.52	46.79	39.29
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 66.4 дБА								

Таблица Б.2.2.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1.550	2.097	1.079	2.051	2.918	2.995	6.181
2	45	0.792	1.841	1.214	1.300	1.971	2.350	2.404
3	90	0.998	0.726	1.086	1.035	0.489	0.519	0.204
4	135	1.071	0.400	0.642	0.495	0.489	0.091	0.050
5	180	0.822	0.319	0.436	0.432	0.349	0.095	0.051

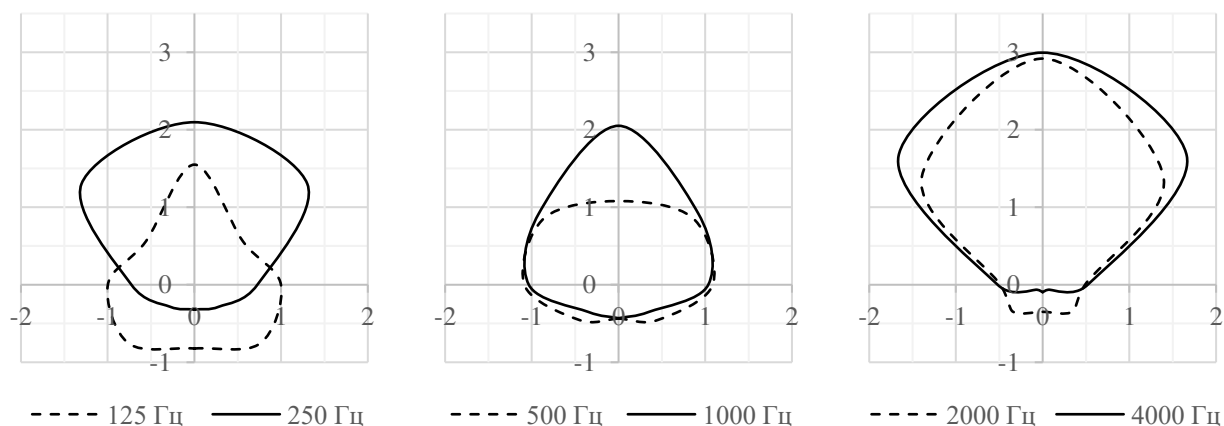


Рисунок Б.2.2 – Диаграммы фактора направленности мужской речи, тип 2

Б.3 Результаты исследования детской речи

Б.3.1 Тип речи детский, жен. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 0.7 м

Таблица Б.3.1.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L'_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	33.30	60.1	62.18	59.45	53.7	46.69	45.39
2	45	36.52	59.57	62.08	60.43	51.55	45.47	42.8
3	90	36.66	59.27	61.63	60.13	50.77	43.82	39.66
4	135	32.08	58.52	59.94	58.07	49.41	42.20	36.31
5	180	32.88	58.06	60.14	58.21	50.02	42.81	36.51
Эквивалентные уровни звукового давления отраженной звуковой энергии $L_{отр}$, дБ, в точке РТ2								
1	0	32.86	55.03	57.3	56.04	47.41	39.82	32.98
2	45	36.07	54.53	56.77	56.07	46.91	38.82	32.31
3	90	36.15	55.00	57.44	56.3	47.18	39.75	33.8
4	135	31.69	55.41	58.75	56.54	48.39	40.35	34.93
5	180	32.66	54.91	58.66	57.09	49.23	41.73	35.95
Средний уровень, $\bar{L}_{отр}$, дБ		33.88	54.98	57.78	56.41	47.82	40.09	33.99
Скорректированные эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	34.32	60.05	62.66	59.82	54.11	46.96	46.40
2	45	34.33	60.02	63.09	60.77	52.46	46.74	44.48
3	90	34.42	59.25	61.97	60.24	51.41	44.16	39.85
4	135	34.27	58.09	58.97	57.94	48.84	41.94	35.37
5	180	34.10	58.13	59.26	57.53	48.61	41.17	34.55
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии $L'_{пр}$, дБ								
1	0	25.35	58.48	61.01	57.26	52.98	45.99	46.16
2	45	25.42	58.44	61.62	58.85	50.69	45.71	44.09
3	90	26.08	57.28	59.96	57.99	48.99	42.06	38.61
4	135	24.93	55.29	53.09	52.90	42.40	37.51	30.15
5	180	23.20	55.36	54.12	51.43	41.28	34.90	26.45
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии $L_{пр}$, дБ, без учета отраженного от пола звука								
1	0	25.14	58.27	60.80	57.05	52.77	45.78	45.95
2	45	25.22	58.23	61.42	58.64	50.48	45.50	43.89
3	90	25.87	57.07	59.75	57.78	48.78	41.85	38.40
4	135	24.73	55.08	52.89	52.69	42.20	37.30	29.94
5	180	22.99	55.15	53.92	51.22	41.08	34.70	26.24
Средний уровень звукового давления прямой звуковой энергии $\bar{L}_{пр}$, дБ		25.40	57.10	59.37	57.12	48.63	42.77	40.53
Акустическая мощность L_w , дБ		33.29	64.99	67.26	65.01	56.53	50.67	48.43
Примечание: Средняя акустическая мощность говорящего составляет 68.4 дБА								

Таблица Б.3.1.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0.942	1.311	1.390	0.985	2.593	1.999	3.480
2	45	0.959	1.298	1.602	1.420	1.529	1.875	2.164
3	90	1.115	0.995	1.091	1.166	1.035	0.810	0.612
4	135	0.857	0.628	0.225	0.361	0.227	0.284	0.087
5	180	0.574	0.639	0.285	0.258	0.175	0.156	0.037

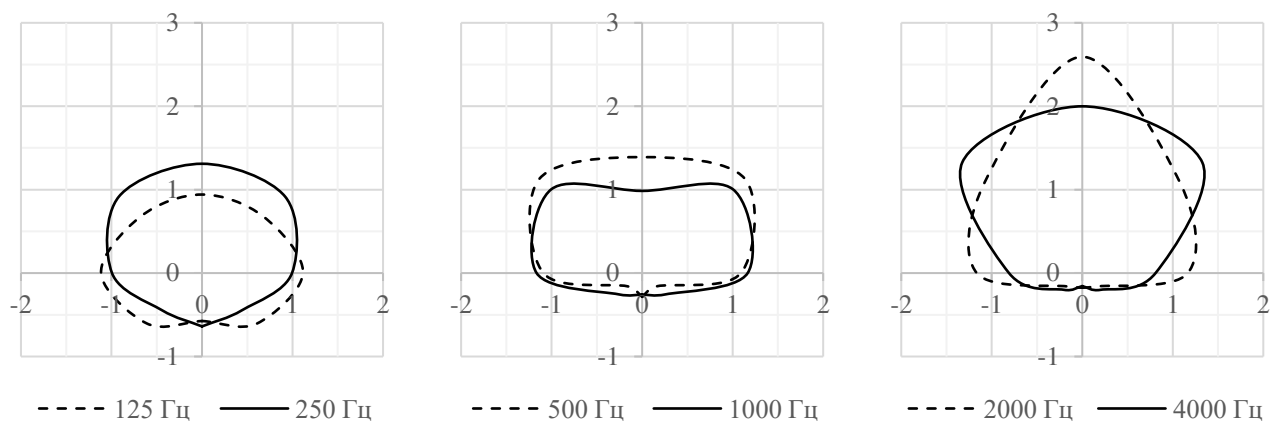


Рисунок Б.3.1 – Диаграммы фактора направленности детской речи, девочка

Б.3.2 Тип речи детский, муж. Расстояние от расчетной точки до говорящего – 0.7м

Таблица Б.3.2.1 - Уровни звукового давления в расчетных точках и акустическая мощность источника звука

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L'_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	30.91	60.64	61.64	59.64	52.87	48.21	47.58
2	45	31.63	59.67	61.05	58.64	49.70	46.60	42.92
3	90	32.45	59.51	60.65	57.69	49.34	45.30	40.84
4	135	30.25	59.07	59.44	57.52	47.64	43.38	38.60
5	180	30.97	60.61	60.59	60.61	50.75	45.50	38.70
Эквивалентные уровни звукового давления отраженной звуковой энергии $L_{отр}$, дБ, в точке РТ2								
1	0	29.79	56.31	57.71	56.54	47.75	41.95	35.80
2	45	31.28	56.00	58.51	56.54	47.48	42.78	36.86
3	90	32.05	55.00	59.46	56.05	47.34	43.29	37.84
4	135	29.79	54.06	58.91	56.16	47.28	42.71	38.38
5	180	30.48	56.02	60.18	58.98	50.31	45.12	38.68
Средний уровень, $\bar{L}_{отр}$, дБ		30.68	55.48	58.95	56.85	48.03	43.17	37.51
Скорректированные эквивалентные уровни звукового давления суммарной звуковой энергии $L'_{общ}$, дБ, в точке РТ1								
1	0	31.80	59.81	62.88	59.95	53.15	49.43	49.29
2	45	31.03	59.15	61.49	58.95	50.25	46.99	43.57

Окончание табл. Б.3.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	90	31.08	59.99	60.14	58.49	50.03	45.18	40.51
4	135	31.14	60.49	59.48	58.21	48.39	43.84	37.73
5	180	31.17	60.07	59.36	58.48	48.47	43.55	37.53
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии L'_{np} , дБ								
1	0	25.83	57.88	60.70	57.13	51.60	48.28	49.01
2	45	21.38	56.80	58.09	54.95	46.42	44.72	42.39
3	90	21.82	58.15	54.26	53.69	45.87	41.02	37.66
4	135	22.30	58.90	50.83	52.78	38.40	35.89	27.07
5	180	22.52	58.28	49.87	53.66	39.14	33.65	23.84
Уровни звукового давления прямой звуковой энергии L_{np} , дБ, без учета отраженного от пола звука								
1	0	25.63	57.67	60.50	56.92	51.39	48.08	48.80
2	45	21.17	56.59	57.88	54.75	46.21	44.52	42.18
3	90	21.61	57.95	54.06	53.48	45.66	40.81	37.45
4	135	22.09	58.69	50.63	52.57	38.19	35.68	26.86
5	180	22.32	58.07	49.66	53.45	38.93	33.45	23.63
Средний уровень звукового давления прямой звуковой энергии $\bar{L}_{np}$, дБ		22.01	57.95	55.43	53.94	45.24	42.08	39.92
Акустическая мощность L_w , дБ		29.90	65.84	63.32	61.84	53.14	49.98	47.81

Таблица Б.3.2.2 – Фактор направленности речи

N точки	Угол поворота относительно плоскости микрофона, °	Фактор направленности Φ в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	2.301	0.938	3.213	1.985	4.117	3.975	7.721
2	45	0.825	0.731	1.759	1.203	1.249	1.751	1.683
3	90	0.913	0.999	0.729	0.899	1.100	0.745	0.566
4	135	1.020	1.185	0.331	0.730	0.197	0.229	0.049
5	180	1.074	1.028	0.265	0.893	0.234	0.137	0.024

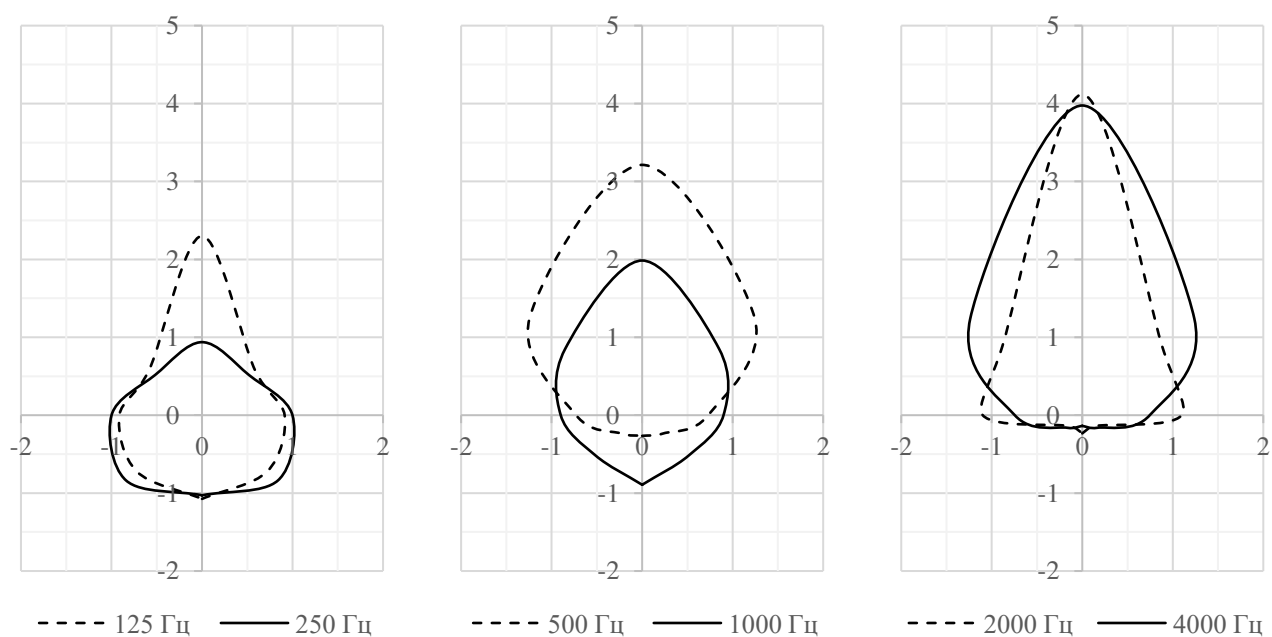


Рисунок Б.3.2 – Диаграммы фактора направленности детской речи, мальчик

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017619636

**Расчет шумового режима на территориях с массовым
пребыванием людей**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский
государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Антонов Александр Иванович (RU), Жоголева Ольга
Александровна (RU), Яровая Татьяна Сергеевна (RU)*

Заявка № 2017616473

Дата поступления 04 июля 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 августа 2017 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017619637

**Расчет шумового режима в зданиях с массовым
пребыванием людей**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский
государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Антонов Александр Иванович (RU), Леденев Владимир
Иванович (RU), Яровая Татьяна Сергеевна (RU)*

Заявка № 2017616472

Дата поступления 04 июля 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 августа 2017 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019611868

**Комплексная программа по расчету звуковых полей в
помещениях и проектированию средств защиты от шума**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский
государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Антонов Александр Иванович (RU), Жоголева Ольга
Александровна (RU), Леденев Владимир Иванович (RU), Яровая
Татьяна Сергеевна (RU), Матвеева Ирина Владимировна (RU)*

Заявка № 2019610550

Дата поступления 22 января 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 февраля 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Извилов Г.П. Извилов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021661360

Расчет уровней, потоков и градиентов плотности
отраженной звуковой энергии в помещениях с
зеркально-диффузным отражением звука от ограждений

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»
(RU)*

Авторы: *Антонов Александр Иванович (RU), Жоголева Ольга
Александровна (RU), Леденев Владимир Иванович (RU),
Яровая Татьяна Сергеевна (RU)*



Заявка № 2021660593

Дата поступления 05 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 июля 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акты о внедрении результатов работы



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ТАМБОВСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»

392032, г.Тамбов, ул. Мичуринская, д.128В, оф.147

Телефон / факс (4752) 63-93-73

ИНН/КПП: 6829019607 / 682901001 ОГРН 1066829018145, ОКПО 77086667

р/с № 40702810061000105208 в Тамбовском отделении №8594 ПАО Сбербанк г. Тамбова, БИК 046850649,
к/с № 301018108000000000649

Исх.№ 11/17

от «20» 06 2017 г.

Проректору по научной работе

ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Муромцеву Д.Ю.

Уважаемый Дмитрий Юрьевич!

В период апреля 2017 года сотрудниками ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» в составе: д.т.н., доцента Антонова А.И. и аспиранта Яровой Т.С. были произведены научные исследования шумового режима на стадионе «Спартак», расположенного по адресу: г. Тамбов, Советская ул., 124Б. Исследования шумового режима данного объекта выполнены по просьбе ООО «ТНТЦСА», целью которого являлось установление влияния спортивных мероприятий на шумовую обстановку прилегающей к стадиону застройки и оценка возможности увеличения вместимости стадиона на перспективу. Результаты исследований использованы в ТНТЦСА при обосновании нецелесообразности увеличения вместимости стадиона в условиях сложившейся городской застройки. Предложенные методы расчета и компьютерные программы их реализации используются в настоящее время ТНТЦСА при выполнении научных исследований, а также при выполнении практических задач борьбы с шумом на городских территориях. Практика применения методов показала их высокий уровень точности и эффективности.

Генеральный директор



О.Б. Демин

Российская Федерация
 Администрация города Рассказово Тамбовской области
 Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение
 «Средняя общеобразовательная школа № 3»
 (МБОУ СОШ № 3)
 393250, Тамбовская область, г. Рассказово,
 ул. Академика Маркова, дом 27,
 тел. 8-(47531)-2-93-91
 e-mail: sosh3@p31.tambov.gov.ru
сайт.rsosh3.gosuslugi.ru
 ОГРН11026801118871
 ИНН6828002872 КПП1682801001
 от 04.02.2019 № 03
 На № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов работы

В период апреля – марта 2017 года аспирантом кафедры «Архитектура и градостроительство» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» Яровой Т.С. под руководством научного руководителя д.т.н., профессора Антонова А.И. были произведены исследования шумового режима, а также акустической мощности речи учащихся в СОШ №3, расположенной по адресу: Тамбовская область, г. Рассказово, ул. Академика Маркова, дом 27. Результаты исследований и предложенные рекомендации по обеспечению нормального шумового режима были приняты к внедрению и использованы при разработке звукоизолирующих и звукопоглощающих конструкций при проведении работ по капитальному ремонту школы, в результате чего улучшены акустические параметры микроклимата помещений школы.

Директор школы



И.В. Селиверстова

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор ФГБОУ ВО
«Тамбовский государственный
технический университет», д.п.н.,
профессор



Н.В. Молоткова

«17» января 2023 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Яровой Татьяны Сергеевны**

Комиссия в составе: председатель комиссии – начальник управления образовательных программ университета Орлова Н.В., члены комиссии - начальник учебно-методического управления университета, д.т.н. Брянкин К.В., зав. каф. «Архитектура и градостроительство» к.т.н., Ельчищева Т.Ф., зав. каф. «Городское строительство и автомобильные дороги», к.т.н. Андрианов К.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Яровой Т.С. «Разработка методов расчета шумового режима и проектирования акустического благоустройства зданий и сооружений с массовым пребыванием людей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используется в учебном процессе кафедр "Архитектура и градостроительство" и «Городское строительство и автомобильные дороги» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». Разработанные Яровой Т.С. компьютерные программы по расчету шумового режима и проектированию средств акустического благоустройства объектов с массовым пребыванием людей, используются в учебном процессе по дисциплинам «Архитектурная климатология и физика» направления 07.03.01 «Архитектура» (профиль – «Архитектурное проектирование»), «Физико-технические аспекты формирования архитектурных решений» (магистерская программа «Архитектура жилых и общественных зданий»), «Проектирование реконструкции гражданских зданий» направления 08.04.01 «Строительство» (магистерская программа «Техническая эксплуатация и реконструкция зданий»).

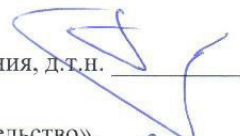
Использование предложенных программ позволяет будущим бакалаврам и магистрам целенаправленно изучать физические основы возникновения и распространения звуковой энергии в помещениях и на открытых пространствах, проектировать эффективные строительно-акустических средств защиты от шума.

Начальник управления образовательных программ

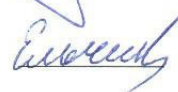
 Н.В. Орлова

Члены комиссии:

Начальник учебно-методического управления, д.т.н.

 К.В. Брянкин

Зав. кафедрой «Архитектура и градостроительство»,
к.т.н.

 Т.Ф. Ельчищева

Зав. кафедрой «Городское строительство
и автомобильные дороги», к.т.н.

 К.А. Андрианов

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНСТРОЙ РОССИИ)



**федеральное государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук»
(НИИСФ РААСН)**

Исх. от 19.06.2023 № 21

Проректору по научной работе
ФГБОУ ВО «Тамбовский
государственный технический
университет» Муромцеву Д.Ю.

Уважаемый Дмитрий Юрьевич!

В рамках функционирования НОЦ «ТГТУ-НИИСФ РААСН» выполнены совместные научные исследования в области расчета и разработки средств обеспечения комфортных акустических условия на объектах с массовым пребыванием людей. Аспирантом Яровой Т.С. под руководством научного руководителя д.т.н. Антонова А.И. разработаны эффективные методы оценки шумовых полей в помещениях с массовым пребыванием людей при наличии в них перегородок неполной высоты.

Предложенные методы расчета и компьютерная программа их реализации используются в настоящее время НИИСФ РААСН при выполнении научных исследований, а также при решении практических задач снижения шума в общественных зданиях с массовым пребыванием людей. Практика применения методов показала их высокий уровень точности и эффективности.

Директор НИИСФ РААСН



И. Л. Шубин