

На правах рукописи

АНТОНОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

**РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ И СТРОИТЕЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ШУМОЗАЩИТЫ В ЗДАНИЯХ**

Специальность 05.23.01 –Строительные конструкции, здания и
сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Научный консультант: **Шубин Игорь Любимович**,

доктор технических наук, директор ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук»

Официальные оппоненты:

Кочкин Александр Александрович, доктор технических наук, доцент, декан инженерно-строительного факультета, заведующий кафедрой «Промышленное и гражданское строительство» ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»

Николов Николай Денчев, доктор технических наук, доцент, директор института «Строительная физика, транспорт и логистика» (София, Болгария)

Овсянников Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура гражданских и промышленных зданий» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «23» ноября 2016 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 007.001.01 при ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» по адресу: 127238, г.Москва, Локомотивный проезд, д.21, светотехнический корпус, к.205, тел. (495)482-40-76, факс: (495)482-40-60.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом фонде НИИ строительной физики РААСН и на сайте <http://niisf.ru/>

Автореферат разослан «23» сентября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Умнякова Нина Павловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Защита от шума является составной части проблемы по созданию комфортных условий для проживания и трудовой деятельности человека. Для этой цели на практике широко используются архитектурно-планировочные и строительно-акустический средства защиты. При их проектировании важное значение имеет расчет энергетических параметров звуковых полей. Сведения об уровнях звукового давления до и после проектируемых мероприятий определяют выбор и эффективность принимаемых решений. Акустическая эффективность разрабатываемых мероприятий напрямую зависит от полноты, точности и универсальности оценки энергетических характеристик шумовых полей. Наиболее приемлемым в этом отношении является компьютерное моделирование процессов распространения звуковой энергии в зданиях и разработка на этой основе новых компьютерных методов расчета шума. Возможности компьютерного моделирования коренным образом изменили подходы к разработке математических расчетных моделей и, соответственно, повлияли на технологию проектирования средств защиты от шума. Появившиеся возможности численного решения сложных математических моделей значительно снизили потребности в разработке упрощенных инженерных расчетных методов. Однако, одновременно с этим возросла необходимость в разработке еще более точных и более сложных моделей, описывающих процессы формирования шума, а также в исследованиях и обосновании основных положений, на которых базируются математические модели и их компьютерные реализации. Таким образом, разработка наиболее точного и обоснованного математического описания шумовых полей и их реализация в виде компьютерных моделей является актуальным направлением в области строительной акустики, создающим условия для эффективного проектирования архитектурно-планировочных и строительно-акустических средств защиты от шума на основе компьютерных технологий.

Степень разработанности темы. Теория расчетов звуковых полей помещений и практика проектирования средств защиты от шума базируется на исследованиях российских ученых Борисова Л.А., Гусева В.П., Иванова Н.И., Ковригина С.Д., Леденева В.И., Овсянникова С.Н., Осипова Г.Л., Шубина И.Л., Юдина Е.Я. и др. За рубежом проблемами расчета звуковых полей занимались Morse P.M., Kremer L., Gruhl S., Kuttruff H., Schroeder M.R., Hodgson M. и др. В то же время анализ современных расчетных моделей и методов их реализации показывает, что большинство из них не в полной мере учитывают сложный характер формирования воз-

душных шумовых полей. Не отвечают современным потребностям существующие методики расчета прямого звука от крупногабаритных источников шума, использование при расчетах идеализированных моделей зеркального или диффузного отражения звука от ограждений, расчеты непостоянных звуковых полей по упрощенным подходам с использованием только эквивалентных уровней звукового давления и др. Методы расчета преимущественно реализуют упрощенные математические модели звуковых полей помещений, ориентированные на разработку инженерных методов расчета. В этой связи, необходимы исследование, обоснование, разработка новых и совершенствование существующих методов и методик расчета и проектирования средств защиты от шума на основе математических моделей, позволяющих широко использовать компьютерные технологии и обеспечивающих надежность проектных решений.

Цель и задачи диссертационной работы.

Цель работы – развитие теоретических основ разработки строительно-акустических методов и средств защиты от шума в зданиях с использованием компьютерных технологий, учитывающих реальные условия формирования шумовых полей в помещениях.

Задачи работы: выполнить анализ методов расчета шумовых полей с точки зрения возможности их использования в современных системах проектирования, ориентированных на компьютерные технологии; разработать методику, математическую и компьютерную модель расчета прямого звука от источников шума со сложными геометрическими и акустическими характеристиками; исследовать условия и закономерности, определяющие формирование отраженного звука от источников постоянного и непостоянного действия в помещениях с различными геометрическими и акустическими параметрами; разработать методики, математические модели, алгоритмы и компьютерные модели расчета отраженного шума в помещениях с зеркально-диффузным отражением звука от ограждений; на основе сравнения расчетных и экспериментальных данных определить средние значения коэффициентов рассеивания зеркально отраженной энергии при различных условиях в гражданских и промышленных зданиях; разработать математическую модель описания непостоянных шумовых полей на основе импульсного представления процесса формирования отраженного поля; разработать методику и компьютерную модель для оценки непостоянных шумовых полей помещений и выбора средств снижения шума от источников переменной акустической мощности; разработать алгоритмы и программный комплекс для расчета шумовых полей помещений и проектирования средств защиты от шума; выпол-

нить экспериментальную оценку точности разработанных компьютерных моделей звуковых полей.

Научная новизна работы:

- предложена методология разработки строительно-акустических методов и средств шумозащиты в зданиях, основанная на использовании компьютерных технологий, наиболее полно учитывающих условия и процессы формирования шумовых полей в помещениях при действии в них постоянных и непостоянных источников шума;

- с использованием интеграла Гюйгенса-Релея получены новые модели излучения звуковой энергии элементами источников шума, разработаны новые методики и алгоритмы расчета прямого звука от источников различного типа;

- на основе компьютерного моделирования звуковых полей уточнены и получены новые сведения о статистических и энергетических характеристиках и о закономерностях формирования звуковых полей помещений при зеркально-диффузной модели отражения звука от ограждений;

- получены новые сведения о влиянии геометрических и акустических параметров помещений на величину используемого при зеркально-диффузном отражении звука коэффициента рассеивания звуковой энергии;

- разработан новый метод расчета шума в помещениях со сложной планировочной структурой при зеркально-диффузной модели отражения звука от ограждений, основанный на комбинации методов прослеживания лучей и численного статистического энергетического метода;

- на основе импульсного представления процессов формирования непостоянных звуковых полей разработана методика и получены выражения для расчета функции отклика помещений на импульсное возбуждение. На основе функции отклика разработан новый метод расчета непостоянных звуковых полей помещений.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается:

- в применении компьютерного моделирования звуковых полей для получения параметров и закономерностей звуковых полей на основе методов волновой, геометрической и статистической теорий акустики при различных моделях отражения звука от ограждений. Для этих целей использованы уравнения Гюйгенса-Рэлея, Френеля-Кирхгофа, метод прослеживания лучей, интегральное уравнение Куттруфа;

- в теоретических исследованиях параметров звуковых полей, образующихся при зеркально-диффузной модели отражения звука от огражде-

ний, и в полученных впервые значениях средних коэффициентов рассеивания отраженного звука для различных групп гражданских и промышленных зданий на основании сравнительного анализа рассчитанных и экспериментальных данных;

- в разработке новых методов расчета прямого и отраженного шума, позволяющих наиболее полно учитывать процессы формирования шумового поля в помещениях, исходя из их формы, пропорций, акустических свойств, характера отражения звука от ограждений, положения источников шума и характера излучения ими звуковой энергии;

- в разработке программного комплекса и отдельных компьютерных программ, позволяющих определять необходимые энергетические характеристики шумовых полей и выполнять разработку архитектурно-планировочных и строительно-акустических средств защиты от шума в помещениях с учетом их акустических, геометрических характеристик, параметров источников шума и других факторов, влияющих на формирование шумовых полей.

Методология и методы исследования.

При разработке темы выполнены теоретические и экспериментальные исследования. Целью теоретических исследований являлась оценка процессов формирования шумового поля в помещениях, получение уточненных зависимостей и закономерностей статистических и энергетических характеристик звуковых полей и в разработке на этой основе методов расчета и компьютерных моделей шумовых полей в помещениях с различными акустическими и геометрическими параметрами. Исследования выполнены на основе волновой, геометрической и статистической теории акустики помещений. Расчеты произведены с использованием разработанных компьютерных программ. Экспериментальные исследования выполнены для подтверждения результатов, полученных на основе разработанных методов.

Положения, выносимые на защиту: методы расчета прямого звука от крупноразмерных источников звука различных форм; результаты исследований параметров и процессов формирования отраженных шумовых полей помещений при зеркальной, диффузной и комбинированной зеркально-диффузной моделях отражения звука от ограждений; методы расчета постоянного и непостоянного шума в помещениях сложной формы с различными отражающими свойствами ограждающих конструкций; алгоритмы и компьютерные модели, реализующие разработанные методы оценки прямого и отраженного звука; программный комплекс по проектированию средств защиты от шума на основе разработанных методов и методик расчета энергетических параметров звуковых полей.

Степень достоверности результатов. При выполнении исследований, обосновании исходных положений и разработке расчетных методов использованы положения классических волновой, геометрической и статистической теорий акустики помещений. Допущения, использованные при разработке методов и методик, общеприняты в работах российских и зарубежных авторов. Достоверность разработанных методов и методик подтверждена компьютерным моделированием, а также сравнением расчетных и экспериментальных данных, полученных на физических моделях и в реальных гражданских и промышленных зданиях. При проведении экспериментов использованы общепринятые методики, оборудование и приборы, соответствующие ГОСТ. Полученные при сравнительном анализе данные сопровождались подробным анализом влияния на формирование шумовых полей изменений архитектурно-планировочных и конструктивных решений помещений, их акустических характеристик и других параметров.

Апробация результатов работы. Результаты диссертации представлялись и обсуждались: на международных научных конференциях «Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г.Л.» (г.Москва, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.); на 26 и 29 международных акустических конференциях (Высокие Татры, 1987, 1990); на Четвертой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности» (Санкт-Петербург, 1999); на XXX Всероссийской научно-технической конференции Российских вузов. Секция «Строительные конструкции, здания и сооружения» (Пенза, 1999); на международной научно-практической конференции «Проблемы инженерного обеспечения и экологии городов» (Пенза, 1999); на международной научно-практической конференции «Информационно-компьютерные технологии в решении проблем промышленности, строительства, коммунального хозяйства и экологии» (Пенза, 2000); на девятом международном конгрессе по звуку и вибрации. Университет Центральной Флориды (Флорида, 2002); на научно-техническом семинаре «Обеспечение защиты от вредных и опасных физических факторов среды обитания человека в зданиях и на территориях застроек» (Севастополь, 2004); на конференции «Наука на рубеже тысячелетий» (Тамбов, 2004); на научно-техническом семинаре «Экология, акустика и защита от шума» (Севастополь, 2005); на научно-техническом семинаре «Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума» (Севастополь, 2006); на 45 международной научно-практической конференции «Иновационные технологии – транспорту и промышленности» (Хабаровск, 2007); на шестой международной научно-практической конференции «Проблемы и пер-

спективы развития жилищно-коммунального хозяйства города» (Москва, 2008); на восьмой научно-технической конференции «Вузовская наука – региону» (Вологда, 2010); на международной научно-практической конференции «Энергосбережение и экология в строительстве, транспортная и промышленная экология» (Москва-Будва, 2010); на XV международной научно-практической конференции «Проблемы и пути развития энергосбережения и защиты от шума в строительстве и ЖКХ» (Москва-Будва, 2011); на II, X, XI, XV, XVI, XIX и XXIV сессиях Российского акустического общества (1993, 2000, 2001, 2004, 2005, 2007, 2011); на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (Тамбов, 2013 г.); на международной научно-практической конференции «Экологическая безопасность и энергосбережение в строительстве» (Москва-Кавала, 2013г.); на международной научно-практической конференции «Проблемы экологической безопасности и энергосбережения в строительстве и ЖКХ» (Москва-Кавала, 2014г.); на международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (Воронеж, 2014).

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения: п.2 «Обоснование, разработка и оптимизация объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, экономической и конструкционной безопасности на основе математического моделирования с использованием автоматизированных средств исследований и проектирования»; п.7 «Развитие теоретических основ строительно-акустических методов и средств, поиск рациональных объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, направленных на повышение эффективности капиталовложений, энерго- и ресурсосбережение, создание комфортных условий для людей и оптимальных для технологических процессов».

Реализация результатов работы. Исследования выполнялись в НОЦ «ТГТУ-НИИСФ РААСН» в рамках выполнения НИР «Разработка методов оценки шумового режима в зданиях и на прилегающих к ним территориях для использования их при мониторинге шумового загрязнения среды и разработке мер по снижению шума в городской застройке» (код проекта 882) с финансированием из средств Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания. Результаты работы использованы при проектировании средств защиты от шума на предприятии ООО «Картон-тара» и на окружающей его застройке. Теоретические по-

ложения работы использованы в СП «Здания и территории. Система шумоглушения воздушного отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Правила проектирования»; СП «Здания и территории. Правила проектирования защиты от производственного шума». Программный комплекс применяется в Научно-техническом центре по проблемам архитектуры и строительства ТГТУ, а также в учебном процессе ТГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 75 работ, из которых 19 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в журнале, представленном в базе данных Web of Science, зарегистрировано 10 программ для ЭВМ в федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 287 наименований и 2 приложений. Общий объем работы 378 страниц. Основной текст, включая 169 рисунков,

25 таблиц, изложен на 359 страницах, объем приложения 19 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы.

В первой главе показаны место и роль расчетов энергетических параметров шумовых полей в процессе проектирования средств защиты от шума в зданиях. Выбор этих средств зависит от вида источников шума, мест их расположения в зданиях и путей проникновения шума на рабочие места и в защищаемые помещения.

Все мероприятия по защите от шума условно разделены на три группы: на мероприятия по снижению шума в источнике возникновения; на архитектурно-планировочные и организационно-технологические противошумные мероприятия, на строительно-акустические средства снижения шума. Проанализированы основные методы и средства снижения шума, установлены область их применения и границы их возможной акустической эффективности. Определены две группы строительных конструкций, влияющих на шумовой режим помещений. Конструкции первой группы проектируются по условиям обеспечения надлежащего шумового режима, для конструкций другой группы функции защиты от шума не являются основными.

Приведены методики проектирования различных средств шумозащиты в гражданских и промышленных зданиях. Показано, что акустические расчеты энергетических параметров шумовых полей в помещениях,

образующихся от действия внутренних и внешних источников шума, являются основной частью процесса проектирования технологических, архитектурно-планировочных и строительно-акустических мер снижения шума. В конечном итоге сравнение результатов расчета уровней звукового давления до и после применения средств защиты от шума определяет их эффективность. От надежности используемых моделей звуковых полей и разработанных на их основе расчетных методов зависит обоснованность применяемых мероприятий по защите от шума на стадиях выбора объемно-планировочных параметров и разработки конструктивных решений зданий.

Приведен анализ современного состояния автоматизированного проектирования объектов строительства, показаны роль и место акустических расчетов в системе автоматизированного проектирования. Особенностью компьютерного проектирования является возможность использования сложных математических моделей, в наибольшей степени соответствующих реальным условиям формирования шумовых полей, а также выполнение многовариантных расчетов и на их основе поиск наиболее эффективных проектных решений по защите от шума.

Сформулированы требования к методам расчета энергетических параметров звуковых полей, которые представлены в виде двух групп: с точки зрения универсальности и точности расчета параметров шумовых полей, а также с позиций их использования в современных автоматизированных системах проектирования зданий. По требованиям первой группы расчетная модель должна: обеспечивать выполнение расчетов прямого и отраженного звука с учетом максимального количества факторов, влияющих на формирование шумовых полей в помещениях различных пропорций с простой и сложной формой планов и объемов. По требованиям второй группы расчетная модель должна: быть машинно-ориентированной, то есть легко алгоритмизироваться и способствовать разработке эффективных компьютерных моделей шумовых полей с целью их использования при автоматизированном проектировании средств защиты от шума; обеспечивать быстродействие расчетов при многофакторном анализе условий формирования шумовых полей, построении шумовых карт и выполнении многовариантного проектирования; обладать требуемой точностью при решении задач любой сложности. С этих позиций установлена необходимость совершенствования существующих и разработки новых более точных и универсальных математических моделей звуковых полей и их компьютерной реализации для эффективного использования в автоматизированных системах проектирования средств защиты от шума.

Во второй главе проанализированы существующие способы моде-

лирования звуковых полей помещений с целью оценки соответствия предъявляемым к ним требованиям и возможности их использования для компьютерного проектирования средств защиты от шума.

В главе приведены общие сведения о моделировании применительно к расчету звуковых полей помещений. В процессе разработки новых моделей следует учитывать особую роль начального исследовательского этапа, на стадии которого генерируются новые идеи, основывающиеся на результатах изучения параметров и закономерностей формирования звуковых полей помещений. В качестве базы могут быть как натурные измерения, так и результаты компьютерного моделирования. Моделирование в этом случае будет выступать как инструмент получения новых знаний об исходной системе и способствовать разработке новых моделей.

Приведена классификация моделей звуковых полей помещений по различным критериям. По уровню разработки модели делятся на феноменологические и статистические, детерминированные и стохастические, функциональные и структурные, аналоговые, физически подобные и математические. Наибольшую группу составляют математические модели, которые после алгоритмизации и программирования становятся компьютерными моделями звуковых полей.

Математической моделью акустических процессов являются волновые уравнения математической физики, в результате решения которых можно получить значения звукового давления в расчетных точках в любой момент времени. Сложности реализации данной модели способствовали переходу от определения звукового давления к оценке плотности звуковой энергии, как базовой энергетической некогерентной характеристике звукового поля.

В помещениях часто разделяют прямой и отраженный от ограждающих конструкций звук, и, соответственно, применяют различные модели для его описания.

Анализ *моделирования прямого звука* показал, что существующие методы расчета не обладают достаточной точностью при расчете распределения звуковой энергии ближнего поля большеразмерных источников звука. Усреднение звуковой энергии в пределах равноудаленной от источника эквивалентной поверхности является оправданным только для соизмерных источников. В случае несопоставимых источников шума и, особенно, для источников шума сложных форм требуется разработка новых более точных математических моделей и расчетных методов.

Для *отраженной звуковой энергии* используются более сложные модели, так как на формирование отраженных звуковых полей оказывает влияние большое количество различных факторов: геометрическая форма

помещения, звукопоглощающие характеристики ограждений, характер отражения звука от поверхностей, наличие рассеивающих звук предметов и оборудования, акустической связи помещений и др. Показано, что модели отраженных звуковых полей помещений целесообразно классифицировать по реализуемой в них модели отражения звука от ограждений или по граничным условиям. В волновой теории применяются граничные условия в виде заданного импеданса отражающей поверхности. В геометрической и статистической теориях акустики используют идеальные модели в виде зеркального или диффузного отражения звука от ограждений. Более сложные модели отражения звука в виде комбинированной зеркально-диффузной или направленно-рассеянной моделей пока не получили надлежащего воплощения в практические методы расчета.

Сложные граничные условия из-за неоднородности акустических характеристик, неправильной формы помещений, наличия мебели и оборудования не позволяют разработать практические расчетные методы звуковых полей помещений на основе *волновой теории*. При решении отдельных задач в практике проектирования средств защиты от шума применяют *методы геометрической акустики* на основе *модели зеркального отражения* звука от ограждающих конструкций. В работах Бреховских Л.М., Лейзера И.Г., Скучика Е. показано, что геометрические методы справедливы при размерах отражающих поверхностей больше длины волны. Основы геометрической теории акустики заложили в своих трудах Чигринский Г.А., Розенберг Л.Д., Jeske W., Schroeder M.R., Kraak W. и др. Для расчета шумовых полей в помещениях в форме прямоугольных параллелепипедов предложен метод мнимых источников, согласно которому отраженная энергия рассматривается как результат суммирования вкладов пространственной решетки мнимых источников звука, построенной по законам зеркального отражения звука. Подобные условия в реальных помещениях выполняются крайне редко. В связи с развитием вычислительной техники Schroeder M.R. предложил использовать компьютерное моделирование акустических процессов на основе прослеживания траекторий определенного количества звуковых лучей. При этом помещение может иметь достаточно сложную форму, что расширяет область использования и повышает точность расчетов. Метод прослеживания лучей в начале реализовывал зеркальное отражение звука. Модель зеркального отражения звука и методы, ее реализующие, в настоящее время в практике проектирования средств защиты от шума применяются ограниченно. Это связано с низкой точностью расчета энергетических параметров звуковых полей и прежде всего в несоразмерных помещениях. Основной причиной низкой точности является не зеркальный характер отражения звука от поверхно-

стей и наличие в помещениях рассеивающих звук предметов и оборудования.

В практике проектирования методы геометрической теории акустики находит применение в качестве составной части комбинированных методов расчета, реализующих зеркально-диффузную модель отражения звука от поверхностей.

Другой расчетной моделью отражения звука является модель идеально диффузного отражения по закону Ламберта. Для расчета энергетических характеристик звуковых полей в этом случае Н. Kuttruff предложил использовать интегральное уравнение. Сложность реализации уравнения ограничивает его применение в основном исследовательскими задачами. Для реализации диффузного отражения звука от ограждений также был приспособлен метод прослеживания лучей, использующий вероятностную модель отражения лучей от ограждения согласно диаграмме рассеивания.

В проектировании шумозащиты наиболее распространены методы расчета, основанные на положениях *статистической теории акустики*. Статистические модели получены на основе постулирования определенных принципов и закономерностей. Так, основываясь на положении о диффузном звуковом поле с равенством энергии во всех точках поля и равномерным приходом звуковых волн со всех направлений получены значения средней длины свободного пробега и зависимости интенсивности энергии от плотности звуковой энергии в расчетной точке. На основе этого для диффузного поля получены выражения для средней плотности звуковой энергии и для оценки ее затухания.

В квазидиффузных звуковых полях, определение для которых впервые дал Schroeder M.R., имеется наличие устойчивых спадов отраженной звуковой энергии. В этом случае в отраженном звуковом поле имеется связь между плотностью потока и градиентом плотности отраженной звуковой энергии в виде уравнения переноса. На основе этой связи нами разработан ряд расчетных методов, объединенных статистическим энергетическим подходом к расчету звуковых полей помещений. Среди этих методов требованиям автоматизированного проектирования в наибольшей степени соответствует численный метод реализации.

Статистические и статистические энергетические методы напрямую не используют определенную модель отражения звука от ограждений. Однако, наши исследования показали, что только при диффузном отражении звука от ограждений обеспечивается выполнение основополагающих характеристик и закономерностей, использованных при разработке этих методов. Методы, реализующие диффузное отражение звука от ограждений,

продемонстрировали высокую точность расчетов и хорошее совпадение с экспериментальными данными и, особенно, в несоразмерных промышленных помещениях. В то же время существует ряд помещений, в которых экспериментальные данные занимают промежуточные значения между результатами расчетов, полученных методами, реализующими модели зеркального и диффузного отражения звука. В этих случаях необходимо использование более сложных моделей отражения звука и, соответственно, других расчетных методов. Этот вывод относится и к звуковым полям, образующимся при действии источников непостоянного шума.

Полученные в главах 1 и 2 результаты определили указанные выше основные направления исследований и задачи работы.

В третьей главе представлены исследования и модели распространения прямого звука от источников шума с различными акустическими и геометрическими параметрами.

Акустическими параметрами источников звука являются: пространственный угол излучения, фактор направленности, акустическая мощность. Способы их определения приведены в нормативной литературе. В зависимости от соотношения размеров источника и расстояния от его геометрического центра до расчетной точки источник считается точечным или большеразмерным (линейным, плоским, объемным). Объемные источники шума могут иметь правильную или сложную форму, быть соразмерными и несоразмерными.

Моделирование распространения прямого звука должно учитывать перечисленные свойства источников звука. Расчет прямого шума имеет ряд нерешенных проблем: недостаточно внимания удалено определению фактора направленности; метод эквивалентной огибающей поверхности для расчета звуковой энергии в ближнем звуковом поле не обладает достаточной точностью, особенно для несоразмерных источников и источников сложной формы.

В общем случае энергию прямого звука от источников шума с различными акустическими и геометрическими параметрами можно рассчитать на основе интеграла, как результат действия элементарных точечных источников шума от участков поверхности dS

$$\varepsilon_{np} = \int_S \frac{w''\Phi}{\Omega R^2 c} ds, \quad (1)$$

где w'' - поверхностная мощность излучения звуковой энергии источником шума, $\text{Вт}/\text{м}^2$, Φ – фактор направленности, Ω – пространственный угол излучения, R – расстояние от элемента dS до расчетной точки, м, S – поверхность излучения шума источником, c – скорость звука. Таким образом,

достоверные модели распространения энергии прямого звука от точечных источников шума являются основой для высокой точности расчета прямого звука и от источников других сложных форм.

С помощью интеграла Гюйгенса-Рэлея рассчитан звук в точке пространства от излучающего плоского элемента площадью S_0

$$p_m = \frac{p}{2\lambda} \int_{S_0} \frac{\sin(\omega t - kr + \varphi)}{r} (1 + \cos\theta_r) ds_0, \quad (2)$$

где p – амплитуда звукового давления; ω – круговая частота; t – время; k – волновое число; r – расстояние от элемента излучателя ds_0 до расчетной точки M ; φ – начальная фаза колебаний; θ_r – угол между r и нормалью к элементу поверхности ds_0 .

На рисунке 1 показаны диаграммы излучения пластины 1x1 м на расстоянии 4 м от нее на разных частотах.

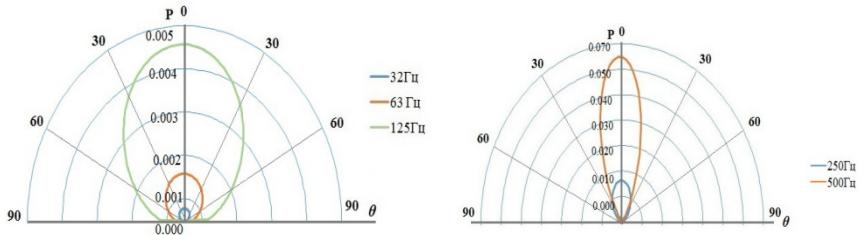


Рисунок 1. Диаграммы излучения пластины: а) на частотах 32, 63, 125 Гц; б) – на частотах 250, 500 Гц.

Результаты расчетов и анализа позволяют выделить три идеальные модели распределения излученной энергии в пространстве излучения с факторами направленности источника шума: равномерная в пределах угла излучения $\Phi_p=1$; излучение по зависимости Ламберта, пропорциональное косинусу угла с центральной осью излучателя $\Phi_\lambda=2\cos\theta$; на высоких частотах наблюдается направленное излучение в виде узкого пучка в пределах конуса при $\theta < 0.5\theta_k$ как

$$\Phi_k = \frac{1}{1 - \cos(0.5\theta_k)}, \quad (3)$$

где θ – угол между осью конуса и направлением на расчетную точку, θ_k – угол раствора конуса. Расчетная модель излучения шума может быть записана как комбинация идеальных моделей с коэффициентами пропорциональности k_i

$$\Phi = k_1 \Phi_p + k_2 \Phi_\lambda + k_3 \Phi_k \quad (4)$$

при $k_1 + k_2 + k_3 = 1$. На основании комбинации трех моделей излучения можно получить диаграммы излучения различных точечных излучателей шума. Приведена методика расчета фактора направленности точечных источников шума по результатам натурных измерений. В работе получены выражения для факторов направленности открытого конца воздуховода, вентиляционной шахты, открытого проема, излучающего шум из помещения.

Значения плотности прямой звуковой энергии от линейных источников в расчетных точках можно получить в результате суммирования вкладов энергии от всех точечных элементарных источников, на которые разбивается протяженный линейный источник шума, то есть на основе аналитического или численного решения интеграла (1). Расчетная схема для интегрирования показана на рисунке 2.

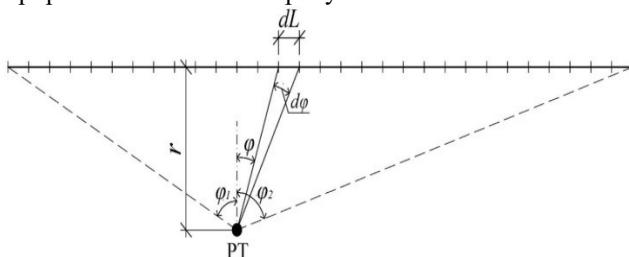


Рисунок 2 – Схема к расчету звуковой энергии от линейного источника в полярной системе координат

В таблице 1 приведены результаты расчета плотности звуковой энергии прямого звука для характерных вариантов линейных источников звука с постоянной по длине линейной акустической мощностью w' , Вт/м. Также получены формулы для расчета плотности звуковой энергии прямого звука от воздуховодов прямоугольного сечения с постоянной и переменной по длине акустической мощностью.

Прямой звук от плоских и объемных излучателей следует в общем случае вычислять интегрированием (1). Простые аналитические выражения получены при излучении шума по закону Ламберта (см. рисунок 1,а и работы Морза Ф.). Например, приближенное выражение для плотности энергии прямого звука прямоугольного излучателя имеет вид

$$\varepsilon_{np} = \frac{w'(\alpha_2 - \alpha_1)(\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)}{\pi c}. \quad (5)$$

Углы φ и α задают границы плоского источника в горизонтальном и вертикальном направлениях. Использование зависимости Ламберта позволило установить зависимость энергии прямого звука от величины телесного

угла, под которым из расчетной точки виден источник звука

$$\varepsilon_{np} = \frac{wp}{\pi c} \Theta, \quad (6)$$

где Θ – телесный угол с вершиной в расчетной точке и охватывающий поверхность источника шума. Выражение (6) особенно удобно для объемных и плоских источников сложной формы, так как легко алгоритмизируется.

Таблица 1 – Формулы для расчета прямого звука некоторых типов линейных источников звука

Тип	Источник	Фактор направленности, Φ	Угол излучения, Ω	Плотность звуковой энергии, $\text{Дж}/\text{м}^3$	
				Общий случай	Ближнее поле для источника бесконечной длины
1	Автодорога	1	2π	$\frac{w'}{2\pi rc} (\varphi_2 - \varphi_1)$	$\frac{w'}{2rc}$
2	Конвейер	1	4π	$\frac{w'}{4\pi rc} (\varphi_2 - \varphi_1)$	$\frac{w'}{4rc}$
3	Ленточное остекление	$2 \cos \alpha \cdot \cos \varphi *$	2π	$\frac{w' \cos \alpha}{\pi rc} (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)$	$\frac{2w' \cos \alpha}{\pi rc}$
4	Круглый воздуховод	$4/\pi \cos(\varphi)$	4π	$\frac{2w'}{\pi^2 rc} (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)$	$\frac{4w'}{\pi^2 rc}$

* α – угол наклона плоскости остекления к расчетной точке

В большинстве случаев на практике при конечных линейных размерах источника в дальнем поле расчеты производят приближенно, рассматривая линейный или плоский источник конечной длины как точечный источник. Рядом с источником в ближнем поле источники часто считают бесконечно протяженными. При этом, как правило, оценка погрешности, возникающей за счет идеализации источника, не производится. В работе определены границы возможного представления линейных и плоских источников звука в виде точечных источников, получены выражения для расчета погрешностей таких представлений. Аналогичные исследования выполнены для расчета погрешностей при использовании модели бесконечного источника шума вместо источника конечных размеров.

Выполнена экспериментальная проверка разработанных моделей расчета прямого звука для плоского и объемного излучателей, которая показала хорошее совпадение измеренных и рассчитанных значений энергетиче-

ских параметров прямого звука.

В четвертой главе приведены результаты исследования параметров и структуры звуковых полей при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений для разработки моделей распространения отраженной звуковой энергии в помещениях.

Выполнено теоретическое обоснование зеркально-диффузной модели отражения звука элементами ограждений на основе решения дифракционной формулы Френеля-Кирхгофа. В качестве примера на рисунке 3 показано распределение звукового давления отраженной волны от элемента 1.5×1.5 м в определенный момент времени.

Выполненные расчеты позволили получить величину отраженной энергии в пределах проекции площади отражающего элемента (зеркальное отражение) и энергию, отраженную в других направлениях, которая считается диффузно отраженной. Приведена методика расчета соотношения зеркально и диффузно отраженной энергии. На рисунке 4 показаны распределения энергии отраженной волны, рассчитанные на основе дифракционной формулы и полученные на ее основе распределения по зеркально-диффузной модели отражения. Формы графиков достаточно хорошо согласуются. Результаты исследования подтвердили возможность использования зеркально-диффузной модели отражения звука.

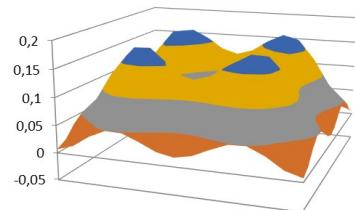


Рисунок 3. Карта звукового давления в отраженной волне

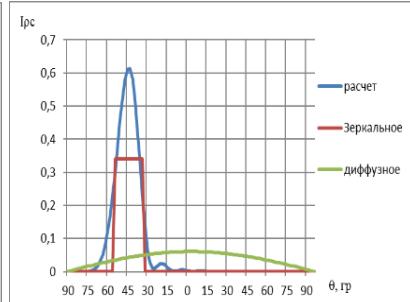
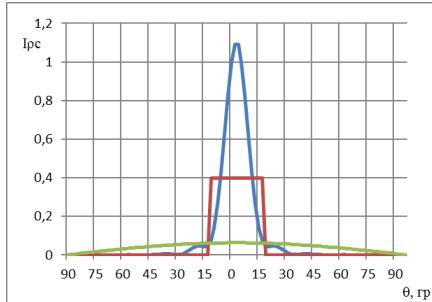


Рисунок 4 – Схема распределения энергии отраженной волны: а) – при нормальном падении волны; б) – при угле падения 45^0

Проведен анализ влияния размеров отражающего элемента, частоты звука, положения расчетной точки, углов падения звуковых волн и других факторов на распределение отраженной энергии между зеркально и диффузно отраженными составляющими. В большинстве случаев диффузно отраженная энергия составляет более 20% от всей отраженной.

Наличие зеркально и диффузно отраженных составляющих звукового поля послужило причиной более подробного сравнительного исследования параметров звукового поля при зеркальном и диффузном отражении звука от ограждений.

Наиболее важной статистической характеристикой звукового поля является средняя длина свободного пробега звука в помещениях. Разработана программа по моделированию акустических процессов в помещениях, в результате которого рассчитываются распределения и средние значения длин свободного пробега \bar{l} . Установлено, что при диффузном отражении звука в помещениях различных форм и пропорций рассчитанная средняя длина свободного пробега соответствует выражению

$$\bar{l} = 4V/S, \quad (7)$$

где V – объем, S – площадь ограждений помещения.

В случае зеркального отражения звука в помещении образуются отдельные устойчивые группы звуковых лучей. По аналогии с видами звуковых волн эти группы лучей названы осевыми, касательными и косыми, которые распространяются соответственно вдоль основных размеров помещения, в различно ориентированных плоскостях или занимают весь объем помещения. Каждая группа лучей имеет собственные длины свободного пробега. Косые подчиняются выражению (7), для касательных средняя длина свободного пробега соответствует выражению

$$\bar{l}_{xy} = \frac{\pi l_x l_y}{2(l_x + l_y)}, \quad (8)$$

где l_x, l_y – характерные размеры плоскости распространения касательных лучей. Длина пробега осевых лучей соответствует размеру помещения в соответствующем направлении.

Скорость затухания каждой группы лучей различна и зависит от их длины свободного пробега и звукопоглощения встречающихся поверхностей. На рисунке 5 показано изменение гистограммы распределения длин свободного пробега в помещении с пропорциями 5:5:1 от длительно действующего источника шума и через время Δt после его отключения. Происходит быстрое затухание лучей с короткой длиной свободного пробега, наблюдается выравнивание диаграммы и значительное увеличение общего среднего значения длины свободного пробега звуковых лучей.

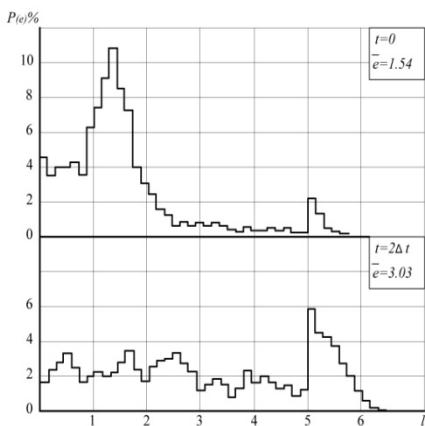


Рисунок 5 - Распределение длин свободного пробега в помещении при зеркальном отражении звука

Распределение звуковых лучей. Распределение общей зеркально отраженной энергии по группам лучей использовано для оценки структуры отраженного звукового поля при зеркально-диффузной модели отражения звука.

Согласно зеркально-диффузной модели при каждом акте отражения часть энергии отражается зеркально, а другая часть рассеивается, то есть отражается диффузно. При каждом акте отражения происходит увеличение диффузной энергии за счет рассеивания зеркально распространяющейся энергии. Обратный переход диффузной энергии в зеркальную невозможен. На рисунке 6 показана принципиальная схема, используемая для расчета зеркальной и рассеянной (диффузной) компонент звукового поля. В верхней части графика показано затухание порции энергии, зеркально отраженной от ограждений. Затухание происходит за счет звукопоглощения и рассеивания звука ограждениями. Ниже на графике рисунка 6 показано образование трех порций диффузно отраженной энергии. Время и место образования диффузных отражений определяется закономерностями распределения зеркальной составляющей звукового поля согласно геометрической теории акустики.

Диффузно отраженная энергия имеет другое значение средней длины свободного пробега по сравнению с зеркально отраженной, другую скорость затухания. Для ее расчета используется статистическая теория акустики.

На рисунке 7 показан процесс изменения энергии отдельного им-

Для помещений в форме прямоугольного параллелепипеда приведена инженерная методика расчета распределения общей энергии отраженного звукового поля по группам соответствующих лучей, получены выражения для средних коэффициентов звукопоглощения поверхностей, от которых отражаются группы лучей. Выполнены расчеты процессов затухания звуковой энергии в помещениях с помощью компьютерного моделирования и с учетом затухания групп звуковых лучей с соответствующими собственными длинами пробегов и коэффициентами поглощения. Удовлетворительное совпадение результатов подтвердило возможность предложенного разделения звуковых лучей. Распределение общей зеркально отраженной энергии по группам лучей использовано для оценки структуры отраженного звукового поля при зеркально-диффузной модели отражения звука.

Согласно зеркально-диффузной модели при каждом акте отражения

часть энергии отражается зеркально, а другая часть рассеивается, то есть отражается диффузно. При каждом акте отражения происходит увеличение диффузной энергии за счет рассеивания зеркально распространяющейся энергии. Обратный переход диффузной энергии в зеркальную невозможен. На рисунке 6 показана принципиальная схема, используемая для расчета зеркальной и рассеянной (диффузной) компонент звукового поля. В верхней части графика показано затухание порции энергии, зеркально отраженной от ограждений. Затухание происходит за счет звукопоглощения и рассеивания звука ограждениями. Ниже на графике рисунка 6 показано образование трех порций диффузно отраженной энергии. Время и место образования диффузных отражений определяются закономерностями распределения зеркальной составляющей звукового поля согласно геометрической теории акустики.

Диффузно отраженная энергия имеет другое значение средней длины

свободного пробега по сравнению с зеркально отраженной, другую скорость затухания. Для ее расчета используется статистическая теория акустики.

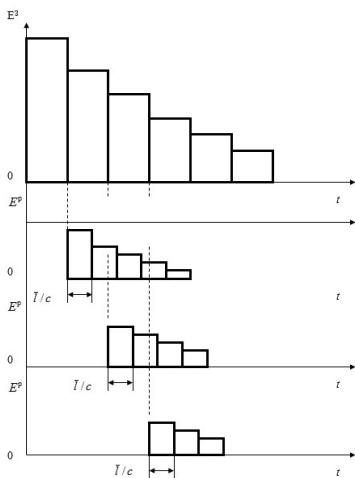


Рисунок 6. Принципиальная схема образования диффузной составляющей поля при зеркально-диффузной модели отражения

пульса, откуда видно, что в данном случае зеркальная составляющая поля формируется несколькими первыми отражениями. Диффузно отраженная энергия постоянно накапливается до уровня стабилизации и вносит определяющий вклад в формирование общего отраженного поля.

В соразмерных помещениях с близкими звукопоглощающими характеристиками ограждений зеркально и диффузно отраженная энергии имеют близкие длины свободного пробегов. Это позволило получить простые выражения для зеркальной и диффузной плотности отраженной энергии

$$\begin{aligned}\varepsilon_o^3 &= \frac{4W(1-\bar{\alpha})(1-\beta)}{(\bar{\alpha}+\beta-\bar{\alpha}\beta)Sc}, \\ \varepsilon_o^p &= \frac{4W(1-\bar{\alpha})\beta}{\bar{\alpha}(\bar{\alpha}+\beta-\bar{\alpha}\beta)Sc},\end{aligned}\quad (9)$$

где W – акустическая мощность источника звука, $\bar{\alpha}$ – средний коэффици-

ент звукопоглощения помещения, β – коэффициент рассеивания.

Исследования показали принципиальные различия в условиях образования, характеристиках и затухании зеркальной и диффузно отраженной звуковой энергии. Для их расчета необходимы различные методики.

В пятой главе приведены методики расчета постоянных шумовых полей помещений с использованием комбинированного зеркально-диффузного метода.

Основываясь на результатах четвертой главы для расчета энергетических параметров отраженных звуковых полей предлагается использовать зеркально-диффузную модель отражения звука от ограждений. В четвертой главе показано, что при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений в отраженном звуковом поле образуются две составляющие звуковой энергии – зеркальная и диффузная, имеющие различные закономерности формирования. Поэтому для их расчета необходимо использовать комбинированный метод, при котором зеркальная и диффузная составляющие определяются раздельно. Окончательный результат расчета определяется согласно

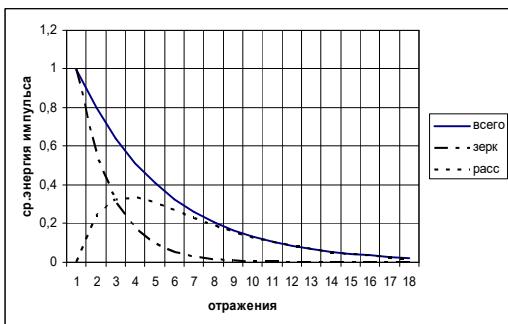


Рисунок 7. Структура энергии отдельного импульса

методами. Выполненный их анализ показал, что наиболее приемлемым для комбинированной модели является метод прослеживания лучей, позволяющий определять не только зеркально отраженную энергию, но и находить энергию, переходящую при отражении в диффузную. При расчете зеркально отраженной энергии должен использоваться условный коэффициент звукопоглощения, учитывающий при отражении лучей не только поглощение зеркальной энергии, но и ее частичный переход в диффузную энергию

$$\alpha_{yc} = 1 - (1 - \alpha)(1 - \beta) = \alpha + \beta - \alpha\beta. \quad (10)$$

При анализе расчетных методов с точки зрения их использования для расчета диффузной составляющей установлено, что наиболее приемлемыми являются методы, разработанные на основе статистического энергетического подхода.

В основу подхода принята взаимосвязь плотности потока и градиента плотности отраженной энергии в виде

$$\bar{q} = -\eta \cdot grade \quad (11)$$

с коэффициентом пропорциональности η , который относится к коэффициентам переноса.

Ранее на основе теоретических исследований нами получено выражение для коэффициента переноса $\eta = 0.5c\bar{l}$, которое было подтверждено расчетами для некоторых видов помещений. Учитывая важность соотношения (11) выполнено компьютерное моделирование звуковых полей при диффузном отражении звука от ограждений и исследована зависимость коэффициента переноса η от геометрических и акустических характеристик для широкого круга помещений. В основе компьютерной модели,

принципу суперпозиции суммой плотностей прямой звуковой энергии, зеркальной и диффузной составляющих отраженной энергии. Расчет плотности прямой энергии производится методами, предложенными в третьей главе.

Расчет зеркальной компоненты звукового поля основательно проработан, хорошо алгоритмизирован и может реализовываться различными расчетными

позволившей выполнить это исследование, использовано математическое описание отраженного звукового поля в виде интегрального уравнения Куттруфа. Расчет энергетических параметров звуковых полей при зеркальном отражении звука выполнен с использованием методов мнимых источников и прослеживания лучей. Выполнены исследования энергетических параметров отраженных звуковых полей, в том числе векторных полей потоков плотности и градиентов плотности звуковой энергии, и на их основе находились величины коэффициента η . Анализировалась их зависимость для различных помещений.

На рисунке 8 видно, что при зеркальном характере отражений формы графиков потока и градиента плотности не совпадают и, соответственно, коэффициент переноса не является постоянной величиной. При диффузном отражении формы графиков изменения потока плотности и градиента плотности звуковой энергии вдоль оси помещения имеют определенное совпадение и, следовательно, их связь может быть описана выражением (11).

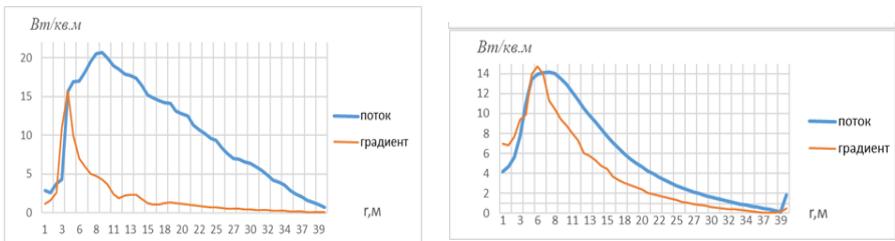


Рисунок 8 – Графики изменения $q \cdot 10^5$ и $grade \cdot 340 \cdot 10^5$ вдоль оси помещения при зеркальном (справа) и диффузном (слева) отражениях

В тоже время установлено, что в несоразмерных помещениях коэффициент переноса изменяется в следующих диапазонах: в плоском помещении $\eta \in cl(1/3 \div 1/2)$; в коридоре $\eta \in cl(1/5 \div 1/1,5)$; в помещении сложной формы $\eta \in cl(1/4 \div 1/1,3)$.

В целом выполненные расчеты показали, что при диффузном отражении звука от ограждений имеются незначительные изменения коэффициента переноса по мере удаления от источника звука. Учитывая достаточную стабильность коэффициента переноса и слабую зависимость результатов расчета параметров звуковых полей от его небольших колебаний рекомендовано в практических методах, основанных на статистическом энергетическом подходе, использовать постоянное значение $\eta \approx cl / 2$. Установлено также, что при зеркальном отражении звука коэффициент переноса является переменной величиной, изменяющейся в широких пределах. В этом случае недопустимо

использование зависимости (11).

Выполнен анализ возможности использования для расчета диффузно отраженной энергии разработанных нами статистических энергетических методов. Установлено, что наиболее приемлем в этом случае численный метод. Метод позволяет учитывать фактические места ввода энергии, возникающей при частичном рассеивании зеркальной составляющей звуковых лучей, любую сложную форму помещения и конкретные коэффициенты звукопоглощения поверхностей.

Метод основан на использовании математической модели распределения в объеме помещения плотности диффузно отраженной энергии в виде уравнения

$$\eta \nabla^2 \varepsilon_\delta + cm_a \varepsilon_\delta = 0 \quad (12)$$

с граничными условиями

$$\bar{q} \Big|_{dS} = \frac{-c\alpha}{2(2-\alpha)} \varepsilon_\delta \Big|_{dS} + \beta(1-\alpha) I_3 \Big|_{dS}. \quad (13)$$

Здесь ∇^2 – оператор Лапласа; m_a – пространственный коэффициент затухания звука.

Граничные условия устанавливают величину плотности потока звуковой энергии к элементу ограждения dS через интенсивность поглощенной диффузной энергии ε_δ и диффузно отраженной компоненты интенсивности зеркальной звуковой энергии I_3 , падающей на этот элемент. Величина I_3 определяется в процессе расчета методом прослеживания лучей зеркальной составляющей отраженного звукового поля.

Наиболее важной величиной, влияющей на точность расчетов комбинированным методом, является коэффициент рассеивания β . Показано, что его величина определяется дифракцией звука, формой поверхностей, наличием рассеивателей. На основе комбинированной расчетной модели, реализующей зеркально-диффузный характер отражения звуковой энергии, разработана методика определения коэффициента рассеивания и его составляющих на основе статистической обработки и сравнения экспериментальных и расчетных уровней звуковой энергии при различных исходных условиях, например, при наличии и отсутствии рассеивающих звук элементов.

Использование методики показано на примере помещения коридорного типа (см. рисунок 9). Измерения уровней звукового давления выполнены при отсутствии и наличии в нем 12 и 23 рассеивателей. Форма помещения принималась при расчетах реальной, а также упрощенной в виде прямоугольного параллелепипеда.

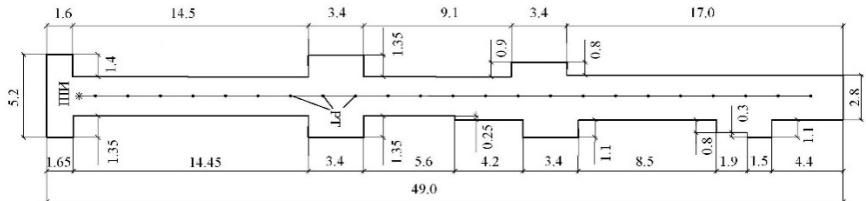


Рисунок 9 – Расчетная схема помещения коридорного типа: \square - источник шума; • точка измерения уровней звукового давления.

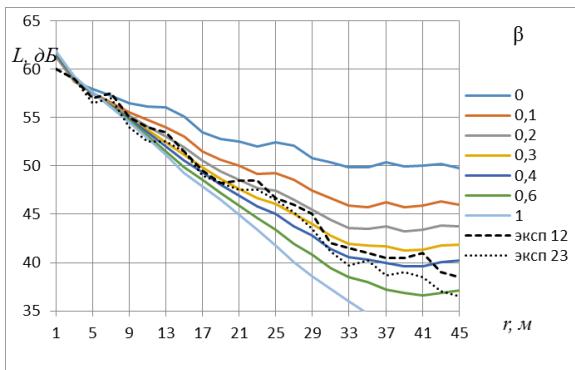


Рисунок 10 – Пример определения коэффициента рассеивания на основе сравнения измеренных и рассчитанных уровней звукового давления

Чем точнее расчетная модель учитывает форму помещения, тем ниже значение коэффициента рассеивания и тем более оно приближается к величине, определяемой дифракцией.

Выполненные результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных для различных объектов позволили определить рекомендуемые значения средних коэффициентов рассеивания отраженной энергии для помещений разного назначения. Полученные значения коэффициентов рассеивания в таблице 3 приведены для расчетных методов, в максимальной степени учитывающих геометрию помещений, и в частности для численного метода. В случае использования усредненных простых форм помещений следует применять более высокие значения коэффициентов рассеивания.

На рисунке 10 показаны экспериментальные и рассчитанные при разных значениях коэффициента рассеивания уровни звукового давления при наличии 12 и 23 рассеивателей.

Результаты анализа (см. таблицу 2) показали большое влияние на коэффициент рассеивания наличие рассеивателей, а также его зависимость от степени упрощения формы помещения.

Таблица 2 – Компоненты коэффициента рассеивания

Составляющие коэффициента рассеивания	Пустое помещение		12 рассеивателей		23 рассеивателя	
	Исходное помещение	Форма параллелепипеда	Исходное помещение	Форма параллелепипеда	Исходное помещение	Форма параллелепипеда
По расчету	0.15	0.25	0.35	0.45	0.45	0.60
Факторы	дифракция	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	форма	0.05	0.15	0.05	0.15	0.05
	рассеиватели	-	-	0.20	0.20	0.30

Таблица 3 – Рекомендуемые значения коэффициентов рассеивания

№	Характеристика помещения	Примеры помещений	Коэффициент рассеивания
1	2	3	4
1	Пустые помещения и сооружения простой формы с плоскими ограждающими поверхностями	Воздуховоды, каналы, переходы, тоннели	0.1
2	Пустые помещения с незначительными отклонениями формы помещения от плоских поверхностей	Коридоры, пустые помещения без мебели и оборудования,	0.2
3	Помещения простой формы с плоским потолком при наличии мебели или оборудования	Офисные, учебные и жилые помещения	0.3 - 0.4
4	Помещения сложной формы с плоским потолком при наличии мебели, оборудования, людей	Торговые и промышленные помещения	0.5 - 0.8
5	Помещения с большим количеством оборудования, в том числе и крупногабаритным и с рассеивающими элементами на потолке	Промышленные помещения, зрелищные сооружения	0.9 - 1

В шестой главе приведены методики расчета непостоянных шумовых полей.

Компьютерные модели непостоянных звуковых полей предлагается разрабатывать на основе импульсного представления процессов формирования звукового поля. Такой подход нами использован при разработке стати-

стического энергетического метода разделения переменных.

Реакция помещения на импульсное возбуждение называется откликом помещения $f_{(t)}$, равным изменению плотности звуковой энергии в расчетной точке за интервал времени

$$f = \frac{d\mathcal{E}_{\text{им}}}{dt}. \quad (14)$$

С помощью отклика помещения рассчитываются энергетические параметры в расчетной точке при действии источника с переменной акустической мощностью, в том числе и уровни постоянного шума по выражению

$$\mathcal{E}_{(\tau)} = \int_{t_{\text{и}}}^{t_{\text{k}}} d\mathcal{E}_{\text{им}} = \int_{t_{\text{и}}}^{t_{\text{k}}} \frac{W_{(t)}}{W_{\text{и}}} f_{(\tau-t-r/c)} dt, \quad (15)$$

где $W_{(t)}$ – переменная во времени акустическая мощность источника звука, $W_{\text{и}}$ – акустическая мощность короткого импульса энергии, τ – расчетное время, $t_{\text{и}}, t_{\text{k}}$ – интервал времени действия источника шума, r – расстояние между источником и расчетной точкой.

Функция отклика может иметь аналитический, табличный или графический вид. В случае численных расчетов удобно ее представлять в виде гистограммы или цифрового ряда. Функция отклика позволяет существенно снизить трудоемкость вычислений, так как после ее одноразового определения дальнейший расчет энергетических параметров звукового поля в расчетной точке от источников шума с различной акустической мощностью сводится к простому суммированию членов ряда.

Свойства функции отклика: площадь графика функции отклика равна плотности звуковой энергии в расчетной точке от постоянного источника шума; форма графика отклика помещения с точностью до постоянного коэффициента повторяет измеренную форму графика изменения плотности звуковой энергии одиночного импульса; отклик помещения можно рассчитать на основе обработки измеренного затухания звуковой энергии длительно действующего источника постоянной мощности; только при экспоненциальном затухании плотности звуковой энергии формы графиков затухания постоянного и импульсного шумов совпадают.

Для некоторых случаев в работе получены аналитические выражения функции отклика. Импульсный подход применен для расчета непостоянного прямого шума от бесконечной пластины, излучающей шум с направленностью по закону Ламберта

$$f_{(t)} = \frac{2w_0'' \cdot r}{(\tau - t)^2 c^2}, \quad (16)$$

где w_0'' – поверхностную акустическую мощность импульсного излучателя.

С помощью выражения (16) получены уравнения для расчета прямого

го звука при длительном действии, включении и отключении источника шума в виде излучающей плоскости с поверхностной мощностью w''

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cm} &= \int_{-\infty}^{\tau-r/c} \frac{2w''r}{(\tau-t)^2 c^2} dt = \frac{2w''}{c} ; \quad \varepsilon = \int_{t_n}^{\tau-r/c} \frac{2w''r}{(\tau-t)^2 c^2} dt = \varepsilon_{cm} \left(1 - \frac{r}{c(\tau-t_n)}\right); \\ \varepsilon &= \int_{-\infty}^{r/c} \frac{2w''r}{(\tau-t)^2 c^2} dt = \varepsilon_{cm} \frac{r}{\tau \cdot c + r}.\end{aligned}\quad (17)$$

Для помещения с диффузным звуковым полем функция отклика имеет вид

$$f_{(T)} = \frac{W_n}{V} \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}cT}{l}\right) \text{при } T=\tau - t \cdot r/c. \quad (18)$$

На основании выражения (18) можно получить значения плотности звуковой энергии при нарастании, отключении и длительном действии источника постоянного шума, а также выражения для общего случая изменения во времени акустической мощности источника.

Для квазидиффузных звуковых полей предлагается упрощенный метод расчета функции отклика на основе предположения, что известно пространственное распределение энергии по помещению при стационарных условиях, а изменение звуковой энергии во времени определяется на основании реверберационных уравнений Сэбина или Эйринга как для диффузного поля. Функция отклика имеет вид

$$f_{(T)} = \varepsilon_n \frac{\bar{\alpha}c}{l} \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}cT}{l}\right), \quad (19)$$

где ε_n – плотность отраженной звуковой энергии в расчетной точке от источника шума с акустической мощностью W_n .

Для реальных помещений при зеркальной или диффузной моделях отражения звука функция отклика рассчитывается численным методом. На рисунке 11 показаны гистограммы функций отклика в помещении с размерами 40x20x4 м при зеркальном и диффузном отражении звука от ограждений для точки на расстоянии 20 м от источника звука.

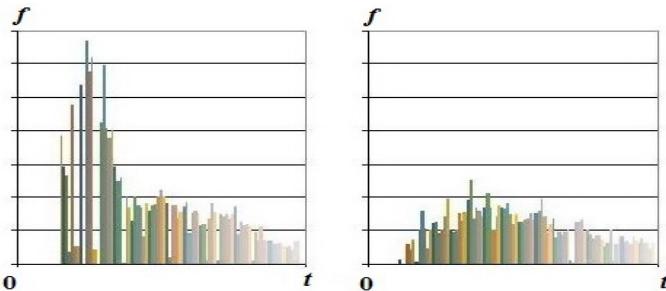


Рисунок 11 – Гистограммы отклика помещений на импульсное возбуждение: слева – при зеркальном отражении, справа – при диффузном отражении

Достаточно распространены источники шума периодического действия. В этом случае вместо функции отклика от импульсного источника удобнее применять более общую функцию отклика от порции энергии продолжительностью ΔT (см. таблицу 4). В случае длительного действия источников периодического действия получены простые выражения для устанавлившегося шумового режима на основе вычисления сумм функций отклика.

Таблица 4 –Функции отклика порций энергии

Графики акустической мощности источников	Акустическая мощность источников при $0 < t < \Delta T$	Формулы для расчета функции отклика при $t_h + r/c \leq \tau \leq t_h + r/c + \Delta T$ $T = \tau - t_h - r/c \leq \Delta T$
	$W_t = W_{uM}$	$\frac{\varepsilon_n}{W_n} W_{uM} \left(1 - e^{-\frac{\bar{a}c}{l} T} \right)$
	$W_t = \frac{2W_{uM}t}{\Delta T}$	$\frac{\varepsilon_n}{W_n} 2W_{uM} \left[\frac{T}{\Delta T} - \frac{\bar{l}}{\Delta T \bar{a}c} \left(1 - e^{-\frac{\bar{a}c}{l} T} \right) \right]$
	$W_t = 2W_{uM} \left(1 - \frac{t}{\Delta T} \right)$	$\frac{\varepsilon_n}{W_n} 2W_{uM} \left[\left(1 - e^{-\frac{\bar{a}c}{l} T} \right) \cdot \left(1 + \frac{\bar{l}}{\Delta T \bar{a}c} \right) - \frac{T}{\Delta T} \right]$

Импульсный подход может также применяться для расчета непостоянных шумовых полей в помещениях при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений. Расчет зеркальной составляющей функции отклика

производится методом прослеживания лучей при использовании условных коэффициентов звукопоглощения, включающих частичное рассеивание отраженной энергии по выражению (10). Диффузно отраженная часть мощности лучей от элементов ограждений представляется в виде распределенных во времени и по поверхности ограждения источников звука. На рисунке 12 показан процесс формирования источников рассеянного звука при прослеживании одного из лучей импульсного источника звука. Расчет диффузно отраженной компоненты функции отклика выполняется с помощью интегрально-го уравнения Куттруфа или численным статистическим энергетическим ме-тодом.

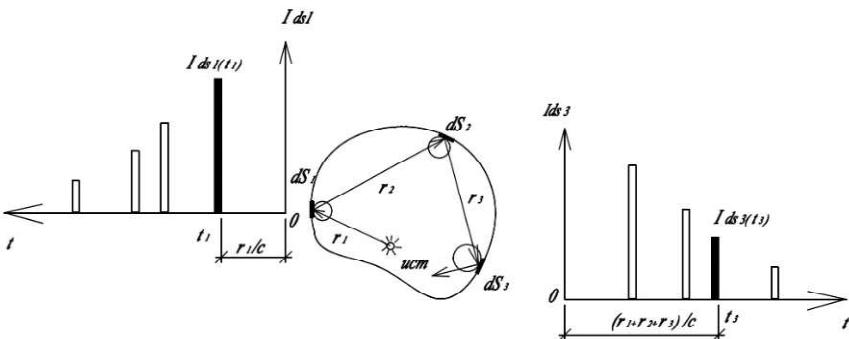


Рисунок 12 – Схема прослеживания звукового луча и формирования распределенных источников рассеянного звука

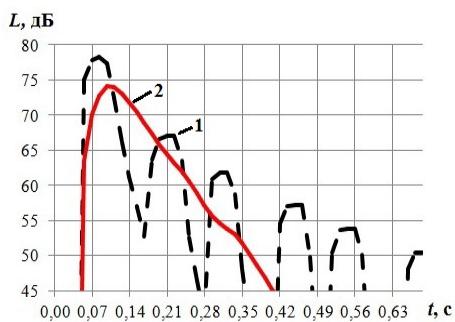


Рисунок 13 - Функция отклика поме-щения при зеркально-диффузной мо-дели отражения звука от ограждения: 1 - зеркальная составляющая; 2 – рас-сеянная составляющая

На рисунке 13 приведен рассчитанный график отклика помещения с размерами $40 \times 2.8 \times 3$ м на отдельный импульс энергии. На графике видна пульсация зеркальной составляющей и плавное нарастание и затухание рассеянной составляющей. График изменения суммарной зеркальной и диффузно отраженной энергии имеет сложный вид.

Выполненные сравнения измеренных и рассчитанных гра-фиковых уровней звукового давле-ния при действии нескольких им-пульсов показало хорошее совпа-

дение результатов и более высокую точность расчетов при использовании комбинированной зеркально-диффузной модели отражения звука от ограждений.

В седьмой главе представлен программный комплекс, состоящий из ряда компьютерных модулей, реализующих рассмотренные в предыдущих главах методы расчета прямого звука внутри помещений и на территории застройки, отраженного звука внутри замкнутых объемов при различных геометрических и акустических свойствах помещений и источников шума.

В качестве базового языка программирования для разработки программного комплекса по проектированию средств защиты от шума выбран Visual Basic 6 (VB6) благодаря возможности выполнять и эффективно реализовывать объектное и модульное программирование. Преимуществом языка является его интеграция со многими приложениями Microsoft Office. Наряду с другими разработками компании Microsoft язык программирования VB6 является средой разработки программного комплекса.

Программный комплекс построен по модульному принципу и состоит из 39 программных модулей. Несколько модулей, близких по решаемым задачам, объединяются в программные блоки. Последовательность выполнения действий различными блоками программного комплекса устанавливает пользователь, таким образом реализуя принцип автоматизированного проектирования. К основным блокам программного комплекса относятся блоки: подготовки исходных данных, расчетный блок, анализа и проектирования, исследовательский и блок документирования и выдачи результатов.

Взаимодействие между модулями производится посредством нескольких блоков управления, с помощью которых проектировщик принимает решения о дальнейших действиях. В качестве помощника для выбора стратегии проектирования средств защиты от шума выступают результаты расчета и анализа звуковых полей помещений, сравнения измеренных, рассчитанных и нормативных данных, справочная информация. Структура программного комплекса позволяет реализовать алгоритмы проектирования средств защиты от шума, приведенные в 1 главе диссертации.

Взаимоотношение и обмен данными между модулями осуществляется через систему глобальных переменных. При этом использованы элементы объектного принципа программирования. В программном комплексе использованы такие объекты, как источник шума (точечный, линейный, плоский и объемный), цифровая модель помещения, акустические характеристики ограждений, соразмерное акустически связанное помещение и др. У каждого объекта имеются соответствующие свойства: размеры, звукопоглощающие характеристики, акустическая мощность и т.п. Расчетные модули проектной и исследовательской частей комплекса реализуют математические модели рас-

пространения прямого и отраженного звука, изложенные в 3 – 6 главах.

В состав комплекса входят 10 программ, на которые получены свидетельства о государственной регистрации.

В приложении работы приведены примеры решения прикладных задач на основе программного комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы позволяют представить ее следующие итоги:

1. На основе анализа методик проектирования различных средств шумозащиты в зданиях показано, что акустические расчеты энергетических параметров шумовых полей, образующихся в помещениях, являются основной частью процесса проектирования технологических, архитектурно-планировочных и строительно-акустических мер снижения шума. От их надежности зависят обоснованность и акустическая эффективность разрабатываемых средств защиты. Сформулированы требования к методам расчета энергетических параметров звуковых полей.

2. Выполнен анализ существующих методов расчета шумовых полей помещений с точки зрения возможности их использования в современных системах проектирования. Определены направления совершенствования существующих и разработки новых расчетных моделей и методов.

3. На основе исследования свойств прямого звука, излучаемого точечными источниками, разработаны методики и компьютерные модели расчета прямого звука от источников шума со сложными геометрическими и акустическими характеристиками. Установлены погрешности использования упрощенных расчетных моделей в результате замены крупноразмерных источников точечными или линейными.

4. С помощью принципа Гюйгенса обосновано образование рассеянного звука при отражении плоских волн от ограниченного элемента ограждения. Выполнены исследования параметров отраженных звуковых полей помещений при различных моделях отражения звука от ограждений. Теоретическими методами и методами компьютерного моделирования показаны принципиальные отличия в свойствах и закономерностях процессов формирования отраженных звуковых полей при зеркальном и диффузном характерах отражения звука от ограждений.

5. Представлены результаты исследований процессов формирования звуковых полей при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений. В результате отражения и частичного рассеивания зеркально отраженной энергии образуются распределенные по ограждениям помещения источники рассеянной энергии. Разработана методика расчета

структуры отраженного звукового поля, определены факторы, влияющие на зеркальную и рассеянную составляющие поля.

6. Разработаны компьютерные модели для расчета энергетических характеристик звуковых полей: распределения плотности отраженной энергии, их градиентов и потоков. Для помещений различных форм, пропорций и акустических характеристик получены коэффициенты связи, устанавливающие связь между плотностью потока и градиентом плотности отраженной звуковой энергии при диффузном отражении звука.

7. Разработана методика, алгоритмы и компьютерная модель расчета постоянных звуковых полей при зеркально-диффузной модели отражения звука от ограждений. На основе сравнения экспериментальных и расчетных данных установлены количественные параметры составляющих коэффициента рассеивания, зависящих от дифракции, формы поверхностей помещения и количества рассеивателей звука. Получены рекомендуемые значения коэффициентов рассеивания для помещений различного назначения.

8. Предложена импульсная модель формирования звуковых полей посредством функции отклика. Установлены свойства функции отклика помещений на импульсное возбуждение. Для простейших звуковых полей получены аналитические выражения функции отклика. В квазидиффузных звуковых полях отклик помещения предлагается определять по упрощенной методике в виде затухания по законам диффузного поля значений звуковой энергии, полученных из решения стационарной задачи.

9. Разработана инженерная методика расчета шумовых полей при действии периодических источников шума. В качестве источника для функции отклика использован не короткий импульс, а повторяющаяся порция звуковой энергии. Для нескольких характерных видов порций энергии предложены аналитические выражения отклика помещения.

10. Разработана компьютерная модель определения функции отклика помещения и методика расчета звуковых полей источников переменной акустической мощности при зеркально-диффузном отражении звука. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало высокую точность модели.

11. Для реализации предложенных математических моделей расчета прямого и отраженного шума при действии источников постоянного и непостоянного шума разработан программный комплекс. Комплекс позволяет производить расчеты шума и разрабатывать строительно-акустические и архитектурно-планировочные средства защиты от шума в помещениях сложной формы, с крупногабаритным оборудованием, со сложным характером отражения звука от поверхностей, при работе источ-

ников с различными геометрическими и акустическими характеристиками.

Рекомендации по использованию результатов диссертации:

- разработанные методики расчета звуковых полей и компьютерные модели следует использовать в практике проектирования архитектурно-планировочных и строительно-акустических средств защиты от шума в зданиях на основе компьютерных технологий;

- методы расчета шума и программные средства могут использоваться в автоматизированных системах проектирования при разработке новых объемно-планировочных и конструктивных решений зданий с учетом защиты от шума.

Перспективы разработки темы исследований. На основе предложенных методик и их компьютерных реализаций возможно использование других моделей отражения звука от ограждений, например, направленно-рассеянной с другими закономерностями распределения рассеянно отраженной энергии и другими компьютерными моделями их реализации. Перспективным является согласование или объединение методик расчета параметров звуковых полей помещений и методик проектирования звукоизолирующих и звукопоглощающих конструкций.

Список публикаций по теме диссертации

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

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

2. **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

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

4. **Антонов, А.И.** Математическое моделирование процессов распространения звуковой энергии в зданиях / А.И. Антонов // Вопросы со-

временной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. - Тамбов. - 2014. - № 3 (53). - С. 17-23

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

6. **Антонов, А.И.** Метод оценки шумового режима в производственных помещениях энергетических объектов / А.И. Антонов, В.П. Гусев, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. - №5. – С.250-252.

7. **Антонов, А.И.** Метод оценки шумовых полей помещений при проектировании шумозащиты в гражданских зданиях с непостоянными во времени источниками шума / А.И. Антонов, А.В. Бацунова, С.И. Крышов // Жилищное строительство. - 2012. - №6. – С.58-59.

8. **Антонов, А.И.** Метод расчета нестационарных шумовых полей в несоразмерных помещениях и помещениях сложных форм / А.И. Антонов, А.В. Бацунова, О.Б. Демин // Academia. Архитектура и строительство. – М., 2010. - С.183-185.

9. **Антонов, А.И.** Метод расчета шума в длинных помещениях / А.И. Антонов, Е. О. Соломатин, А. В. Цева // Научно-технический журнал Вестник МГСУ. – М. - 2013. – №1. - С. 19-25

10. **Антонов, А.И.** Метод расчета шума в квартирах с ячейковыми системами планировки / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев, И.Л. Шубин // Жилищное строительство. М. 2013. - № 7. - С. 33-35

11. **Антонов, А.И.** Метод расчета шумового режима в зданиях с коридорными системами планировки / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев // Строительство и реконструкция. –Орел. - 2013. - № 3 (47). - С. 28-32.

12. **Антонов, А.И.** Методы расчета уровней прямого звука, излучаемого плоскими источниками шума в городской застройке / А.И. Антонов, В.П. Гусев, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин // Жилищное строительство. - 2013. - № 6. - С. 13-15.

13. **Антонов, А.И.** Оценка шума в помещениях с источниками импульсного звука периодического действия / А.И. Антонов, А.В. Бацунова, С.И. Крышов // Вестник МГСУ. – 2011. – №3-1. С. 48-53

14. **Антонов, А.И.** Расчет нестационарных звуковых полей при зеркально-диффузной модели отражения звука от ограждений / А.И. Антонов, А.В. Бацунова, И.Л. Шубин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. -№6(53). – С.71-77

15. **Антонов, А.И.** Расчет шума при проектировании звукоизолирующих кожухов технологического оборудования / А.И. Антонов, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин, И.Л. Шубин // Строительные материалы. – 2015. - №6. – С.39-41.

16. **Антонов, А.И.** Расчеты уровней прямого звука от линейных источников шума, располагающихся на промышленных предприятиях и в городской застройке / А.И. Антонов, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. - 2013. - № 31-1 (50). - С. 329-335.

17. **Антонов, А.И.** Условия, определяющие процессы формирования шумового режима в замкнутых объемах, и их учет при оценке распределения звуковой энергии в помещениях / А.И. Антонов, А.В. Бацуна, И.Л. Шубин // Приволжский научный журнал. - 2015. - Т. 3. - № 35. - С. 89-96.

18. Гиясов, Б.И. Проектирование ограждающих конструкций зданий по условиям и с учетом защиты от шума / Б.И. Гиясов, А.И. **Антонов**, И.В. Матвеева // Вестник МГСУ. – 2012. – №12. С. 16-21

19. Гиясов, Б.И. Энергетический метод расчета шума, проникающего в плоские помещения через стены / Б.И. Гиясов, А.И. **Антонов**, И.В. Матвеева // Вестник МГСУ. – 2014. – №9. С. 22-31

Публикация в журнале, представленном в базе данных Web of Science

20. Tsukernikov, I. Acoustic Characteristics Analysis of Industrial Premises with Process Equipment / I. Tsukernikov, **A. Antonov**, V. Ledenev, I. Shubin, T. Nevenchannaya // Journal of Applied Mathematics and Physics, V. 4. - 2016, P. 206-210

Публикации в других изданиях

21. **Антонов, А.И.** Автоматизация проектирования строительных конструкций производственных зданий по условиям защиты от шума / А.И. Антонов, А.Е. Жданов, В.И. Леденев, И.В. Матвеева // Актуальные проблемы современного строительства. Строительные конструкции. сб. тр. – Пенза: ПГАСА, 2003. – Ч.2. – С. 13-17.

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

23. **Антонов, А.И.** Инженерный метод оценки звуковой мощности технологического оборудования в условиях производственных помещений / А.И. Антонов, А.Е. Жданов, В.И. Леденев, В.П. Гусев // Строительная физика в XXI веке: материалы науч.-практ. конф.– М. - 2006. – С. 323-327
24. **Антонов, А.И.** Инженерный метод расчета шума в технических помещениях гражданских зданий / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, Т.С. Яровая // Устойчивое развитие региона: Архитектура, строительство, транспорт: Материалы 2-й Международ. науч.-практ. конф. Тамбов, 2015. С. 50-54.
25. **Антонов, А.И.** Определение уровней звуковой энергии на наружных поверхностях зданий энергетических объектов, излучающих шум в окружающую среду / А.И. Антонов, В.И. Леденев, Е. О. Соломатин // Акустика речи. Медицинская и биологическая акустика. Архитектурная и строительная акустика. Шумы и вибрации: сб. тр. XXIV сес. Рос. акуст. об-ва.– М. - 2011. – Т.3. – С. 143-147.
26. **Антонов, А.И.** Оценка шума в помещениях с источниками периодического действия / А.И. Антонов, А.В. Бацунова, О.Б. Демин // Материалы международной научно-практической конференции «Энергосбережение и экология в строительстве, транспортная и промышленная экология». – Москва-Будва, 2010. - С.190-199.
27. **Антонов, А.И.** Оценка шумового режима акустически связанных помещений на основе статистического энергетического подхода к расчету отраженных шумовых полей / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев, И.Л. Шубин // Материалы Международной научно-практической конференции «Экологическая безопасность и энергосбережение в строительстве». Москва-Кавала, 17-27 августа 2013. – С. 128-133.
28. **Антонов А.И.** Программа по расчету шумовых полей производственных помещений статистическими энергетическими методами / А.И. Антонов, А.Е. Жданов, В.И. Леденев // Архитектурная и строительная акустика. Шумы и вибрации. сб. тр. XI сес. Рос. акуст. об-ва. – М.: НИИСФ, 2001. – Т.4. – С. 113-116.
29. Леденев, В.И. Аналоговое моделирование звуковых полей помещений / В.И. Леденев, **А.И. Антонов** // Труды 29 акустической конференции «Строительная акустика. Архитектурная акустика. Акустика городской среды». – Чехословакия, Высокие Татры. – 1990. – С.26-29.
30. Леденев, В.И. Влияние звукопоглощения на нестационарный шумовой режим производственных помещений / В.И. Леденев, **А.И. Антонов**, П.Ю. Потылицын // Акустика речи. Медицинская и биологическая акустика. Архитектурная и строительная акустика. Шумы и вибрации.

Аэроакустика. Сб. тр. XVI сес. Рос. акуст. об-ва. – М., 2005. – Т.3. – С.202-206.

31. Леденев, В.И. Компьютерное моделирование акустических процессов в производственных помещениях с технологическим оборудованием / В.И. Леденев, **А.И. Антонов**, И.В. Матвеева, А.М. Макаров // Вестник ЦРО РААСН. – Воронеж-Иваново, 2005. – Вып.4. – С. 168-175.

32. Леденев, В.И. Моделирование акустических процессов в производственных помещениях с технологическим оборудованием / В.И. Леденев, **А.И. Антонов**, И.В. Матвеева, А.М. Макаров // Акустика речи. Медицинская и биологическая акустика. Шумы и вибрации. Аэроакустика. Сб. тр. XVI сес. Рос. акуст. об-ва. – М., 2005. – Т.3. – С.187-191.

33. Леденев, В.И. Опыт применения статистического энергетического метода расчета квазидиффузных полей производственных помещений железнодорожного транспорта / В.И. Леденев, **А.И. Антонов**, С.И. Крышов // Совершенствование и повышение долговечности зданий на железнодорожном транспорте: Сб. научных трудов – Хабаровск: ХабИИЖТ. - 1988. – С. 74-79.

34. Леденев, В.И. Расчет шумовых полей в системах акустически связанных помещений / В.И. Леденев, **А.И. Антонов** // Вестник ТГТУ. – Тамбов. - 1996. – Т.2 - № 1-2. – С. 149-157.

35. Макаров, А.М. Звукопоглощение в производственных помещениях с рассеивающим звук оборудованием / А.М. Макаров, **А.И. Антонов**, О.Б. Демин, И.В. Матвеева // Акустика речи. Медицинская и биологическая акустика. Архитектурная и строительная акустика. Шумы и вибрации. Аэроакустика: сб. тр. XIX сес. Рос. акуст. об-ва.– М., 2007. – Т.3. – С.197-201.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661638. Расчет звукового поля в системе соразмерных акустически связанных помещений / **А.И. Антонов**, О.А. Жоголева, И.Л. Шубин. – Заявка №2014619411; дата поступления 17.09.2014; зарегистрирована 10.11.2014

37. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015661741. Расчет нестационарных звуковых полей в помещениях сложных геометрических форм / **А.И. Антонов**, А.В. Бацунова, В.И. Леденев. – Заявка №2015618685; дата поступления 05.09.2015; зарегистрирована 06.11.2015

38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661639. Расчет эффективности звукоизолирующих конструкций в системе акустически связанных помещений / **А.И. Антонов**, О.А. Жоголева, В.И. Леденев. – Заявка №2014619412; дата поступления 17.09.2014; зарегистрирована 10.11.2014

39. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015661739. Расчет прямого звука от звукоизоляционного кожуха в форме прямоугольного параллелепипеда / **А.И. Антонов**, О.А. Жоголева, В.И. Леденев. – Заявка №2015618682; дата поступления 22.09.2015; зарегистрирована 06.11.2015

40. 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

41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610071. Расчет уровней шума нестационарного звукового поля и времени реверберации в производственных помещениях методом прослеживания звуковых лучей / **А.И. Антонов**, А.М. Макаров. – Заявка № 2007614304; дата поступления 31.10.2007; зарегистрирована 09.01.2008

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610131. Расчет шумового поля в производственных помещениях с технологическим оборудованием, комбинированным геометрическим - статистическим методом / А.М. Макаров, **А.И. Антонов**. – Заявка № 2007614376; дата поступления 06.11.2007; зарегистрирована 09.01.2008

43. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615835. Построение шумовой карты города / **А.И. Антонов**, Д.Ю. Шелковников, И.Л. Шубин. – Заявка № 2008614635; дата поступления 13.10.2008; зарегистрирована 05.12.2008

44. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012613166. Расчет шумового поля в производственных помещениях энергетических объектов с крупногабаритным оборудованием / **А.И. Антонов**, Е.О. Соломатин. - Заявка №2012610818; дата поступления 08.02.2012; зарегистрирована 03.04.2012

45. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012613167. Оценка шумового режима на территориях, прилегающих к энергетическим предприятиям / **А. И. Антонов**, Е. О. Соломатин. - Заявка №2012610819; дата поступления 08.02.2012; зарегистрирована 03.04.2012

