

На правах рукописи

ЖОГОЛЕВА ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА

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

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и
сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Леденев Владимир Иванович**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кочкин Александр Александрович**

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

Герасимов Анатолий Иванович

кандидат технических наук, профессор
кафедры «Архитектура гражданских и про-
мышленных зданий» ФГБОУ ВО «Националь-
ный исследовательский Московский государ-
ственный строительный университет»

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

Защита состоится «28» сентября 2016 г. в 13:00 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 «20» июля 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Умякова Нина Павловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

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

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

Цель и задачи диссертационной работы.

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

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

Научная новизна работы:

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

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

- разработаны новая методика расчета шума для проектирования строительно-акустических средств шумозащиты в системах помещений, акустически связанных через пространство потолков технологического

назначения и компьютерная программа для ее реализации. В методике учитываются условия поступления в пространство потолка звуковой энергии от транзитных воздуховодов и из шумных помещений и особенности распространения в нем звуковой энергии как в плоском помещении;

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

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается:

- в применении для исследования шумовых полей в системах акустически связанных помещений подхода, позволяющего рассматривать на основе интегрального уравнения Куттруфа процесс формирования и распространения звуковой энергии в системе как единый взаимосвязанный процесс для всех ее акустически связанных объемов;

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

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

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

Методология и методы исследования.

При разработке темы выполнены теоретические и экспериментальные исследования. Целью теоретических исследований являлась оценка процессов формирования общего шумового поля в системах акустически

связанных воздушных объемов помещений и разработка методов и методик расчета энергетических характеристик шума помещений в зданиях с различными планировочными системами. Исследования выполнены с использованием геометрической и статистической теории акустики помещений. Расчеты произведены с использованием разработанных компьютерных программ. Экспериментальные исследования выполнены для подтверждения результатов, полученных на основе разработанных методов.

Положения, выносимые на защиту: результаты исследований процессов формирования шумовых полей в системах связанных соразмерных помещений и влияния на них акустических связей, выполненные на основе статистического метода расчета шума и уравнения Кутруффа; метод расчета шума в системах с ячейково-коридорной и коридорной системами планировки; методики расчета шума для проектирования строительно-акустических средств шумозащиты в сложных системах помещений с потолками технологического назначения и с общим воздушным пространством; компьютерные программы, реализующие разработанные методы и методики расчетов.

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

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

городского строительства» (Пенза, 2013г.); на международной научно-практической конференции «Проблемы экологической безопасности и энергосбережения в строительстве и ЖКХ» (Москва-Кавала, 2014г.); на международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт» (Тамбов, 2015 г.).

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения: п.6 «Поиск рациональных форм, размеров зданий, помещений и их ограждений исходя из условий их размещения в застройке, деятельности людей и движения людских потоков, технологических процессов, протекающих в здании, санитарно-гигиенических условий, экологической безопасности»; п.7 «Развитие теоретических основ строительно-акустических методов и средств, поиск рациональных объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, направленных на повышение эффективности капиталовложений, энерго- и ресурсосбережение, создание комфортных условий для людей и оптимальных для технологических процессов».

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

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

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены особенности формирования шумовых полей в гражданских зданиях как в системах акустически связанных по-

мещениях и дана оценка возможности расчета их энергетических характеристик с использованием существующих методов, определены основные направления исследований.

Установлено что, формирование шумового режима в любом отдельном объеме является следствием единого взаимосвязанного процесса распространения воздушного шума во всех объемах пространственной структуры здания, имеющих между собой акустические связи через звукоизолирующие преграды, открытые проемы и через общее воздушное пространство. На шумовой режим оказывают влияние характеристики источника шума и его положение в системе, объемно-планировочные параметры помещений, пространственная структура системы помещений, звукопоглощающие и звукоизолирующие свойства ограждений, характер отражения звука от ограждений. Влияние этих факторов рассмотрено для зданий различного назначения, установлена необходимость их учета при расчете энергетических характеристик шума в процессе проектирования средств шумозащиты. Показано, что процесс распространения энергии в системах помещений является многофакторным, во многом связанным с видом планировок, определяющих акустические связи в системе. В гражданских зданиях к ним относятся ячейковые, ячейково-коридорные, коридорные планировки, а также планировки с общим воздушным пространством. Показано, что для снижения шума необходимо применять строительно-акустические средства в виде звукопоглощающих облицовок и звукоизолирующих конструкций. Выбор средств зависит от точности расчета шума и оценки на его основе их акустической эффективности.

Проанализированы существующие методы расчета шума с целью оценки возможности их использования для расчетов шума в системах связанных помещений. Установлено, что их применение зависит от вида отраженного звукового поля в помещениях и от характера отражения звука от ограждений. Показано, что в системах планировок из соразмерных помещений можно использовать методы статистической теории акустики, а при несоразмерных помещениях комбинированные методы, основанные на представлении о зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений. Методы требуют адаптации для применения их в системах акустически связанных помещений. Показано также, что при анализе путей совершенствования методов расчета применительно к системам связанных помещений и разработке методик для их реализации можно эффективно использовать интегральное уравнение Куттруфа.

Во второй главе на основе статистического метода акустики исследовано распространение звуковой энергии в гражданских зданиях с ячейковой и анфиладной системами планировки.

Ячейковые системы квартир и анфиладные системы в общественных зданиях в основном состоят из соразмерных помещений, для расчета шума в которых могут быть применены статистические методы. Известно, что они имеют ряд допущений, которые могут приводить к погрешностям. В частности, в них не учитываются раздельно прямая и отраженная составляющие звука, не учитывается нарушение диффузности звукового поля в местах открытых проемов между помещениями, не учитывается без достаточных обоснований обратный обмен энергии между помещениями.

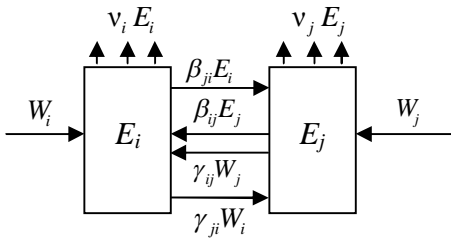


Рисунок 1 – Схема баланса отраженной звуковой энергии для i -го помещения

Для исключения погрешностей предложена модель звукового поля в помещениях, учитывающая в полном объеме обмен энергиями между связанными помещениями (см. рисунок 1).

Уравнение, характеризующее изменение плотности отраженной энергии ε_i в i -м помещении системы, имеет вид

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

а для стационарных условий записывается как

$$\left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ji}\right) \frac{W_i}{V_i} + \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \varepsilon_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} (1 - \alpha_i) \frac{W_j}{V_i} - v_i \varepsilon_i - \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \varepsilon_i = 0. \quad (2)$$

На рисунке 1 и уравнениях (1) и (2): W_i, W_j, E_i, E_j - акустические мощности источников шума и звуковые энергии в i -м и j -м помещениях; N - общее количество связанных с i -м помещением j -х помещений; α_i - средний коэффициент звукопоглощения в i -ом помещении; v_i - коэффициент потерь звуковой энергии в i -ом помещении; β_{ij}, β_{ji} - коэффициенты передачи отраженной звуковой энергии из j -го помещения в i -е помещение и наоборот из i -го в j -е; γ_{ij}, γ_{ji} - тоже коэффициенты передачи прямой энергии через ограждения; V_i - объем i -го помещения; $\varepsilon_i, \varepsilon_j$ - плотности звуковой энергии в i -м и j -м помещениях.

Для оценки распределения отраженной звуковой энергии при нестационарных и стационарных режимах решаются системы уравнения (1)

и (2) с их числом, равным количеству помещений. Для решения системы уравнений (1) используется метод конечных разностей по явной схеме. В этом случае величина плотности отраженной звуковой энергии $\varepsilon_i^{t+\Delta t}$ во время $t + \Delta t$ выражается через плотность ε_i^t во время t с учетом начальных условий $\varepsilon_i^{t_0} = \varepsilon_{0i}$

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^{t+\Delta t} = \varepsilon_i^t + \Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i^t & \left[1 - \left(v_i + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \right) \Delta t \right] + \\ & + \left[\sum_{j=1}^N (1 - \alpha_i) \gamma_{ij} \frac{W_j^t}{V_j} + \beta_{ij} \varepsilon_j^t + \left(1 - \alpha_i - \sum_{i=1}^N \gamma_{ji} \right) \frac{W_i^t}{V_i} \right] \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

При решении уравнений (2) используется метод Гаусса. Для реализации расчетной модели разработана компьютерная программа. Для оценки точности метода выполнены экспериментальные исследования распространения шума в квартире при открытых и закрытых дверях. Расхождение экспериментов и расчетов не превышает 2 дБ. Метод хорошо реагирует на изменение акустических связей в системе. С использованием программы и точного метода расчета на основе интегрального уравнения Куттруфа выполнен анализ принимаемых допущений в применяемых на практике упрощенных статистических методах. Произведена оценка погрешности, возникающей при неучете разделения прямого и отраженного звука. Установлено, что при расчетах необходимо учитывать это разделение, конкретное положение источника шума в системе и передачу прямого звука через ограждения. Получено выражение для коэффициента передачи прямой энергии через ограждения в виде

$$\gamma_{ij} = \Omega \tau_{ij} / 4\pi, \quad (4)$$

где τ_{ij} - коэффициент звукопроницаемости ограждения между i -м и j -м помещениями; Ω - телесный угол облучения ограждения прямым звуком. Для его определения предложена формула

$$\Omega = S \cos \theta / R^2, \quad (5)$$

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

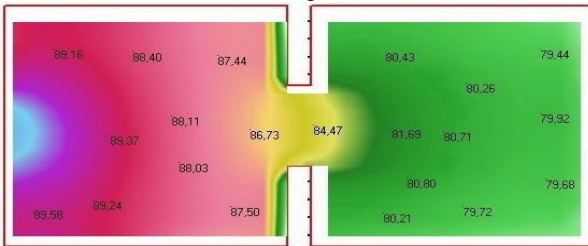
На основе расчетного метода и интегрального уравнения Куттруфа исследовано влияние обратного прихода энергии из «тихих» помещений на шумовой режим в системе. Установлено, что во всех практических случаях этой энергией можно пренебречь. С учетом этого получено выражение для системы уравнений при анфиладной планировке, которое в общем случае при размещении источника в k -м помещении имеет вид

$$\begin{cases} v_k \varepsilon_k V_k = W_k (1 - \alpha_k); \\ v_k \varepsilon_k V_k = \beta_{kn} \varepsilon_k V_k + \gamma_{kn} W_k \text{ при } n = k \pm 1; \\ \dots\dots \\ v_k \varepsilon_k V_i = \beta_{ji} \varepsilon_j V_j \text{ где } j = i - 1 \text{ при } i > k + 1; j = i + 1 \text{ при } i < k - 1 \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) решается методом последовательной подстановки. С использованием интегрального уравнения Куттруфа проанализировано распределение энергии в помещениях, связанных открытым проемом. Установлено, что в месте проема диффузность отраженного поля нарушается (см. рисунок 2). Однако, в соразмерных помещениях это нарушение не влияет существенно на точность расчетов статистическим методом. В несооразмерных помещениях это нарушение необходимо учитывать. Установлено, что наличие открытого проема изменяет коэффициент звукопоглощения помещения. Для определения коэффициента звукопоглощения открытого проема «шумного» помещения получено выражение

$$\alpha_{\text{прш}} = 1 - A / \alpha_T S_T, \quad (7)$$

где α_T, S_T - коэффициент звукопоглощения и площадь ограждений «тихого» помещения; A – площадь проема.



На основании предложенного метода расчета с учетом обоснованных в нем допущений и уточнений произведены исследования шумового режима в квартирах и помещениях.

Рисунок 2 – Шумовая карта связанных проемом в анфиладных системах помещений

Выполнен анализ влияния времени реверберации на шумовой режим квартир. Установлено, что наличие акустических связей значительно увеличивает время реверберации за счет перераспределения энергии между помещениями. В этом случае шумовой режим квартиры возможно целенаправленно регулировать за счет соответствующего размещения звукопоглощения. Оценено влияние звукоизоляции внутренних ограждений на шумовой режим квартир. Показана методика подбора звукоизоляции ограждений исходя из обеспечения требований к шумовому режиму при известной мощности источника шума. Проанализировано совместное влияние звукопоглощения и звукоизоляции дверей на распределение звуковой энергии в анфиладных системах помещений, показана их акустическая

эффективность и возможность ее изменения за счет целенаправленного подбора средств снижения шума. В целом на основании исследований установлено, что метод и методика его компьютерной реализации могут эффективно использоваться при проектировании строительно-акустических средств защиты в системах планировок с соразмерными помещениями.

В третьей главе предложен метод расчета шума в ячейково-коридорных и коридорных системах планировок.

Показано, что в таких системах распределение звуковой энергии во многом определяется распространением ее в коридорах. Для расчета предложен численный метод. В этом случае коридор и связанные с ним помещения разделяются на элементарные объемы V_i , в пределах которых плотность отраженной энергии постоянна (см. рисунок 3).

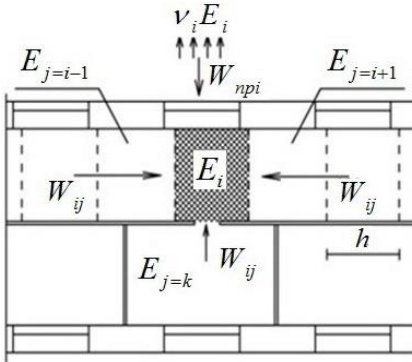


Рисунок 3 – Схема к расчету баланса энергии для i -го элементарного объема

В данном случае в α_i учитываются также потери энергии за счет ухода ее в смежные объемы через ограждения.

Величина W_{ij} для границы раздела с ограждениями определяется как

$$W_{ij} = E_j c S_{ij} \tau_{ij} / 2(2 - \alpha_i) V_i \quad (10)$$

где E_j - звуковая энергия в j -м объеме; τ_{ij}, S_{ij} - коэффициент звукопроницаемости и площадь ограждения между i -м и j -м объемами.

Для воздушной границы между элементами коридора W_{ij} равна

$$W_{ij} = -\frac{c l_{cp}}{2} \cdot \frac{(E_j - E_i) \cdot S_k}{V_i \cdot h} \quad (11)$$

где h - шаг разбиения коридора; S_k - площадь поперечного сечения коридора; l_{cp} - средняя длина свободного пробега лучей.

Величина W_i для коридора с источником шума при зеркально-диффузном характере отражения звука определяется прямой энергией источника W_i^{np} , зеркально W_i^3 и диффузно W_i^d отраженными энергиями. Величины W_i^{np} и W_i^3 вычисляются методом прослеживания лучей как

$$W_i^{np} = \sum_{k=1}^K W_{ki}^{np} = \sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp(-m_g R_{ki}), \quad (12)$$

$$W_i^3 = \sum_{k=1}^K W_{ki}^3 = \sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp(-m_g R_{ki}) \prod_{p=1}^P [(1 - \alpha_p) \xi_p]^{D_p}, \quad (13)$$

В выражениях (12) и (13) принято: W – звуковая мощность источника, Вт; N – количество лучей, исходящих из источника; m_g – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе, m^{-1} ; R_{ki} – расстояние, проходимое k -м лучом от источника звука до i -го элементарного объема, м; α_p – коэффициент звукопоглощения p -й поверхности ограждения, на которую падал прослеживаемый луч; P – общее число актов отражения k -го луча от всех отражающих поверхностей, встречающихся на его пути в процессе распространения его на расстояние R_{ki} до i -го элементарного объема; D_p – число актов падения k -го луча на p -ю поверхность в процессе распространения его на расстояние R_{ki} ; ξ_p – доля энергии, направляемая по k -му лучу после его отражения от p -ой поверхности ограждения.

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

$$W_i^d = \sum_{m=1}^4 W_m^d = (1 - \alpha_m)(1 - \xi_m) \left(\sum_{k=1}^K W_{ki}^3 + \sum_{k=1}^K W_{ki}^{np} \right), \quad (14)$$

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

Для соразмерных помещений W_i определяется методами статистической акустики, рассмотренными в главе 2.

Для реализации метода разработана компьютерная программа. При наличии в системе помещений источника шума в программе выполняется расчет величины W_i и затем производится решение системы уравнений (8).

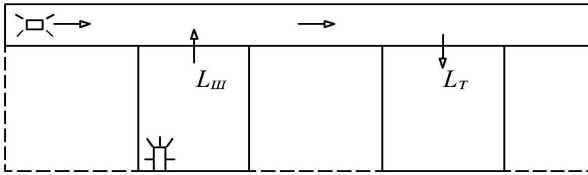
После этого, исходя из того, что $\varepsilon_i = E_i / V_i$, определяются уровни шума $L_i = 10 \lg(c\varepsilon_i / I_0)$, где I_0 - интенсивность звука на пороге слышимости.

Программа, позволяет производить расчет распределения энергии при различных планировочных решениях коридорных систем.

Метод расчета экспериментально проверен на примерах квартиры с ячейково-коридорной и общественного здания с коридорной системами планировки. Расхождения расчетов с экспериментом в основном не превышают ± 3 дБ. Метод пригоден для проектирования строительно-акустических средств защиты в системах с коридорными планировками.

В четвертой главе приведены методики расчета шума в зданиях со сложными системами планировок.

В последнее время широкое распространение в практике находят здания свободной планировки с общими пространствами технологических потолков. Принципиальная схема такой планировки дана на рисунке 4.



В пространство потолков шум попадает из шумных помещений, а также от воздуховодов, размещаемых в потолках, и, распространяясь в них, зашумляет ниже лежащие помещения.

Рисунок 4 - Принципиальная схема помещений и технологического потолка, имеющих общее звуковое поле

Для расчета шума в такой системе разработана методика, учитывающая характер распространения шума в потолках как в плоских помещениях от воздуховода как от линейного источника, так и от «шумного» помещения, звуковая энергия из которого проникает в пространство через потолок.

Общая методика расчетов шума и проектирования шумозащиты заключается в следующем: производится расчет звуковой энергии, распространяющейся внутри воздуховода; при известных значениях звукоизоляции стенок воздуховода определяется интенсивность, излучаемой его поверхностями звуковой энергии; производится расчет уровней прямого шума, образующегося в пространстве потолка от транзитного воздуховода как от линейного источника; производится расчет уровней отраженного шума, образующегося в пространстве потолка от звуковой энергии транзитного воздуховода и от звуковой энергии, проникающей в пространство потолка из «шумных» помещений системы (при их наличии); определяются уровни шума в помещениях, образующегося от звуковой энергии, проникающей в них через конструкцию потолка; производится оценка соответствия уров-

ней шума нормативным требованиям и в случае превышения норм производятся расчет требуемой звукоизоляции ограждений воздуховода и потолка и проектирование звукоизолирующих конструкций.

Расчет шума в воздуховоде выполняется как в одномерном канале при зеркально-диффузном отражении звука от его стенок. Расчет отраженной энергии в пространстве потолка производится численным статистическим энергетическим методом, реализующим дифференциальное уравнение

$$0.5cl_{cp}\nabla^2\varepsilon + cm_g\varepsilon = 0 \quad (15)$$

с граничными условиями

$$\bar{q}|_{ds} = \frac{-c\alpha_n}{2(2-\alpha_n)}\varepsilon\Big|_{ds} + (1-\alpha)I_{np}|_{ds} + \frac{I_0 10^{0.1(L_{ш}-R_{шт})}}{2(2-\alpha_{шт})}\Big|_{ds}, \quad (16)$$

Здесь ∇^2 - оператор Лапласа; $\alpha_n, \alpha_{шт}$ - коэффициенты звукопоглощения элемента поверхностей потолка сверху и со стороны шумного помещения; I_{np} - интенсивность прямого звука, приходящего от воздуховода и падающего на элемент ограждения ds ; $R_{шт}$ - звукоизоляция потолка над «шумным» помещением. В условиях над помещениями без собственных источников шума третий член в правой части формулы (16) отсутствует.

Методика реализована в компьютерной программе. Особенностью рассмотренного метода является учет в граничных условиях (16) интенсивности поступления отраженной энергии в объем через первые отражения прямого звука, а также учет в них интенсивности энергии, проникающей в пространство потолка из нижних помещений через его конструкцию.

Уровень акустической мощности энергии, поступающей в находящиеся под потолком помещения, определяется как

$$L_{wп} = 10 \lg \left(\frac{1}{W_0} \sum_{k=1}^K \frac{\varepsilon_k c 10^{-0.1R_{нк}}}{2(2-\alpha_n)} \Delta S_k \right), \quad (17)$$

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

Окончательно, при известной мощности излучения $L_{wп}$, средний уровень звукового давления в соразмерных помещениях, находящихся под потолком, определяется по формулам диффузного поля.

В главе приведен пример практической реализации методики.

Разработана методика расчета шума в системах помещений с перегородками неполной высоты. Методика построена на использовании расчетной модели, дающей возможность расчетов шума при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений. Модель реализуется методами прослеживания лучей и численным статистическим энергетическим методом. В этом случае все отдельные объемы и общее воздушное пространство системы помещений с перегородками неполной высоты делятся на элементарные объемы (см. рисунок 5). При этом учитываются положение и размеры перегородок и размеры общего воздушного пространства.

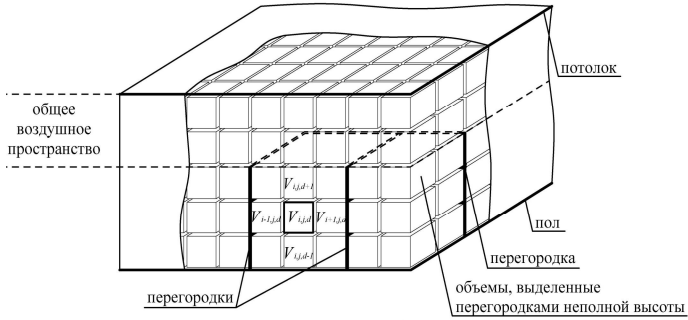


Рисунок 5 - Схема помещений к расче-

Для каждого i,j,d -го объема производятся расчеты плотностей прямой ε_i^{np} , зеркально ε_i^3 и диффузно ε_i^d отраженной энергии и определяется общий уровень шума как

$$L_i = 10 \lg [c (\varepsilon_i^{np} + \varepsilon_i^3 + \varepsilon_i^d) / I_0]. \quad (18)$$

Величины ε_i^{np} и ε_i^3 определяются методом прослеживания лучей как

$$\varepsilon_{i,j,d}^{np} = W_{i,j,d}^{np} / cS_{np}, \quad \varepsilon_{i,j,d}^3 = W_{i,j,d}^3 / cS_{np}, \quad (19)$$

где $W_{i,j,d}^{np}, W_{i,j,d}^3$ - энергии, определяемые по формулам, аналогичным формулам (12) и (13); S_{np} - приведенная площадь элементарного объема.

Расчет плотности диффузно отраженной энергии $\varepsilon_{i,j,d}^d$ производится численным методом, реализующим уравнение (15) при граничных условиях

$$q|_{ds} = -\frac{c\alpha_s}{2(2-\alpha_s)} \varepsilon \Big|_{ds} + (1-\alpha_s) I^{np} \Big|_{ds} + (1-\alpha) I^3 \Big|_{ds}, \quad (20)$$

где I^{np}, I^3 - интенсивность прямой и зеркально отраженной энергии, падающих на границу и определяемых с учетом выражений (12) и (13) и угла падения лучей на элемент ds .

Для реализации методики разработана компьютерная программа.

Выполнена экспериментальная проверка предложенной методики. Эксперименты выполнялись в моделях помещений с перегородками неполной высоты и в реальном помещении офисного типа. Сравнение расчетов и экспериментов показало хорошую сходимость результатов. Расхождения не превышают ± 3 дБ в самых сложных случаях. Расчетная модель адекватно реагирует на изменение параметров в системе.

В приложении работы приведены данные экспериментальных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы позволяют представить ее следующие итоги:

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

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

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

4. Разработаны методика расчета шума в системах помещений с перегородками неполной высоты, связанных через общее воздушное про-

странство, и компьютерная программа для ее реализации. При разработке использована комбинированная зеркально-диффузная модель распространения отраженного шума в помещениях. Модель адаптирована для решения задач по оценке распространения шума в системах связанных помещений, объединенных общим воздушным пространством. Методика и программа позволяют эффективно проектировать строительно-акустические средства защиты в сложных системах планировок.

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

Рекомендации по использованию результатов диссертации:

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

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

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

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. 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. М., 2012. - № 6. - С. 52-54.

2. 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.

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

4. 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. М., 2014.- № 6. - С. 45-48.

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

6. Гусев, В.П. Компьютерные расчёты уровней шума при проектировании крупногабаритных газовоздушных каналов / В.П. Гусев, **О.А. Жоголева**, В.И. Леденев // Бюллетень строительной техники. М., 2016.- № 6. - С. 15-17.

Публикации в других изданиях

7. **Жоголева, О.А.** Исследование характера отражения звука от поверхностей в крупногабаритных газовоздушных каналах и его влияние на точность расчета распространения шума в них / **О.А. Жоголева**, Е.О. Соломатин // Актуальные вопросы строительной физики – энергосбережение, надежность, экологическая безопасность: материалы конф. IV Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Г.Л. Осипова. г. Москва, 2012.

8. **Жоголева, О.А.** Возможность применения комбинированной расчетной модели для оценки шума в помещениях с рассеивающим звукооборудованием / **О.А. Жоголева**, Е.О. Соломатин // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: сб. науч. тр. междунар. заочной науч.-практ. конф. / Мин-во обр и науки - М., 2013. - Ч. III. - С. 47-49.

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

10. 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 // Экологическая безопасность и энергосбережение в строительстве: Материалы Международной научно-практической конференции. Москва-Кавала, 17-27 августа 2013. – С. 128-133.

11. **Жоголева, О.А.** Оценка влияния звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций на процесс распространения шума в квартирах с

ячейковыми системами планировки / **О.А. Жоголева**, А.А. Родионова, Т.С. Яровая // Актуальные проблемы городского строительства: Сборник трудов Международ. науч.-техн. конф. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2013. - С.252-256.

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

13. Антонов, А.И. Оценка распространения шума в зданиях с анфиладной системой планировки / А.И. Антонов, **О.А. Жоголева**, А.В. Головкин, И.Л. Шубин // Проблемы экологической безопасности и энергосбережения в строительстве и ЖКХ: Материалы Международ. науч.-практ. конф. М. -Ковала, 2014. - С. 233-236.

14. Антонов, А.И. 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.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

15. 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 10.11.2014г.

16. 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 10.11.2014г.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет трехмерных шумовых полей в помещениях с акустическими экранами и перегородками неполной высоты / А.И. Антонов, **О.А. Жоголева**, В.И. Леденев – Заявка №2016614938; дата поступления 16.05.2016г.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет шумового поля в помещениях сложной формы с учетом их акустической связи с соразмерными помещениями / А.И. Антонов, **О.А. Жоголева**, В.И. Леденев – Заявка №2016614939; дата поступления 16.05.2016г.