

На правах рукописи

БАЦУНОВА АНАСТАСИЯ ВАЛЕРЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА НЕПОСТОЯННОГО ШУМА
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ В ЗДАНИЯХ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и
сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Шубин Игорь Любимович**
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

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

Монич Дмитрий Викторович
кандидат технических наук, доцент,
начальник управления научных исследова-
ний, инноваций и проектных работ ФГБОУ
ВПО «Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет»

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

Защита состоится «16» декабря 2015 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 « » октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 007.001.01, к.т.н. Умнякова Нина Павловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Снижение воздействия шума на человека в быту и на производстве имеет важное социально-экономическое и экологическое значение. Воздействие шума во многом определяется его временными параметрами. Наиболее негативно влияние непостоянного во времени шума, и особенно, при работе в помещениях источников шума периодического действия. К таким источникам, в частности, относятся источники импульсного шума. Формирование непостоянных шумовых полей имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при расчетах энергетических характеристик шума и проектировании строительно-акустических средств его снижения. В отличие от методов расчетов постоянного шума методы для непостоянного шума должны определять пространственно-временные изменения уровней звукового давления, максимальные и минимальные уровни, их соотношение с фоновым шумом, учитывать характер отражения звука от поверхностей и его влияние на энергетические характеристики непостоянного шума. Большинство методов расчета разработано применительно к постоянному шуму. В этой связи исследование процессов формирования непостоянного шума и разработка на этой основе методов для его расчета является актуальной научной задачей, имеющей практическое значение.

Степень разработанности темы. Имеющиеся методы расчета непостоянного шума не в полной мере учитывают условия возникновения и формирования шумовых полей при работе в помещениях источников с непостоянной звуковой мощностью. Методы весьма формально оценивают распределение отраженной звуковой энергии между зеркальной и рассеянной составляющими при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений и не учитывают в должной мере их взаимосвязь в процессе возникновения отраженной энергии. В этой связи необходимы исследования процессов формирования непостоянных шумовых полей и разработка методов расчета непостоянного шума помещений, учитывающих условия, влияющие на его пространственно-временные изменения.

Цель и задачи диссертационной работы.

Цель работы – разработка методов расчета энергетических характеристик непостоянного шума, позволяющих исследовать процессы его формирования в помещениях с разными объемно-планировочными и аку-

стическими параметрами и выполнять достоверные расчеты уровней звукового давления при проектировании строительно-акустических средств снижения шума.

Задачи работы: исследовать условия, определяющие формирование шумовых полей в помещениях с непостоянными во времени источниками шума и выполнить анализ методов расчета шумовых полей с точки зрения возможности их использования для расчета непостоянного шума; разработать методы расчета непостоянного шума в помещениях с зеркально-диффузным отражением звука от ограждений; основываясь на разработанных методах расчета, определить границы применения методов расчета, использующих диффузную модель отражения звука; разработать методы расчета непостоянного шума в помещениях с диффузным отражением звука от ограждений; разработать методику оценки непостоянного шума в помещениях с источниками звука периодического действия с различной формой излучения ими звуковой энергии; разработать программный комплекс для реализации расчетных методов; выполнить экспериментальную оценку точности разработанных методов.

Научная новизна работы:

- предложена новая расчетная модель для определения энергетических характеристик непостоянного шума помещений при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений, основанная на комбинированном использовании для расчетов зеркальной составляющей отраженного шумового поля геометрических методов акустики, а для рассеянной составляющей – интегрального уравнения Куттруфа;

- разработан метод расчета энергетических характеристик непостоянного шума помещений при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений, основанный на совместном применении геометрического и численного статистического энергетического методов. Метод позволяет упростить вычислительный процесс и сократить время расчетов при проектировании строительно-акустических средств снижения непостоянного шума;

- получены новые данные о распределении в отраженном шумовом поле звуковой энергии между зеркальной и рассеянной составляющими при зеркально-диффузном характере отражения звука. Данные позволяют

определить границы применимости более простых методов расчета, использующих диффузную модель отражения звука;

- разработаны новые методы расчета непостоянного шума в помещениях при диффузном отражении звука, отличающиеся тем, что они учитывают форму излучения звуковой энергии источником во времени и могут использоваться при расчетах в помещениях сложных форм;

- на основе нового метода расчета шума при диффузном отражении звука разработана методика оценки непостоянного шума от источников периодического действия с любой формой излучения ими энергии;

- разработан новый программный комплекс, реализующий предложенные в работе расчетные методы. Комплекс позволяет решать задачи исследовательского характера и практические задачи проектирования строительно-акустических средств снижения шума.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается: в разработке комбинированной расчетной модели непостоянного шумового поля помещения, позволяющей рассматривать процесс формирования отраженного поля при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений, как единый взаимосвязанный процесс возникновения зеркальной и рассеянной составляющих отраженной энергии; в определении возможности и границ применимости для расчетов непостоянного шума расчетных моделей, использующих представления о диффузном характере отражения звука от ограждений, и разработке на этой основе новых методов расчета, учитывающих процессы формирования диффузно отраженной звуковой энергии; в разработке методики оценки непостоянного шума в помещениях с источниками звука периодического действия, дающей возможность учитывать форму излучения ими звуковой энергии, в том числе и импульсное излучение.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработанные методы расчета уровней звукового давления непостоянного шума позволяют производить оценку шумового режима в помещениях с источниками при любой форме излучения ими звуковой энергии, в том числе с источниками периодического действия и с импульсными источниками, обеспечивая тем самым надежное проектирование строительно-акустических средств снижения непостоянного шума;

- разработанный программный комплекс позволяет определять необходимые для оценки непостоянного шума характеристики и выполнять разработку строительно-акустических средств снижения шума с учетом влияния на распределение отраженной звуковой энергии в помещениях временных параметров источника, характера отражения звука, объемно-планировочных параметров и акустических характеристик помещений.

Методология и методы исследования. В работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования. Теоретические исследования производились с целью оценки процессов формирования непостоянных отраженных звуковых полей и разработки методов расчета энергетических характеристик непостоянного шума. Исследования выполнены на основе геометрической и статистической теорий акустики помещений. Экспериментальные исследования выполнены с целью подтверждения результатов, полученных на основе разработанных расчетных методов.

Положения, выносимые на защиту: расчетная модель для определения энергетических характеристик непостоянного шума при зеркально-диффузном характере отражения звука и практический метод расчета шума при зеркально-диффузном отражении; данные о соотношениях зеркальной и диффузной составляющих отраженного поля при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений; методы расчета непостоянного шума в помещениях с диффузным характером отражения звука от ограждений; методика оценки непостоянного шума при работе в помещении источников звука периодического действия; программный комплекс, реализующий разработанные методы расчета.

Степень достоверности результатов. При разработке методов и выполненных исследований использованы положения классических геометрической и статистической теорий акустики помещений. Допущения, использованные при разработке методов, общеприняты в работах российских и зарубежных авторов. Достоверность разработанных методов подтверждена сравнением расчетных и экспериментальных данных, полученных в помещениях сложной формы при работе в них источников периодического действия с разной формой излучения энергии. Эксперименты произведены с использованием прецизионной акустической аппаратуры.

Апробация результатов. Результаты диссертации представлялись и обсуждались: на международных научных конференциях «Академические

чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г.Л.» (г. Москва, 2010, 2011, 2012 г.); на 8-ой Всероссийской научно-технической конференции Вологодского государственного технического университета (Вологда, 2010 г.); на международной конференции «Энергосбережение и экология в строительстве и ЖКХ, транспортная и промышленная экология» (Москва-Будва, 2010 г.); на XV международной научно-практической конференции «Проблемы и пути развития энергосбережения и защиты от шума в строительстве и ЖКХ» (Москва-Будва, 2011 г.); на международной научно-практической конференции «Проблемы экологической безопасности и энергосбережения в строительстве и ЖКХ» (Москва-Кавала, 2014 г.).

Область исследования соответствует требованиям паспорта 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 строительного 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. Разработанная расчетная программа передана для использования в НИИСФ РААСН. Программный комплекс применяется в Научно-техническом центре по проблемам архитектуры и строительства ТГТУ, а также в учебном процессе ТГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из которых 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 114 наименований и 2 приложений. Общий объем работы 175 страниц. Основной текст, включая 58 рисунков, 11 таблиц, изложен на 139 страницах, объем приложения 36 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены особенности формирования непостоянных во времени шумовых полей помещений и дана оценка возможности расчета их энергетических характеристик на основе современных методов исследования шумовых полей, определены направления исследований.

В настоящее время в России на основе работ Антонова А.И., Борисова Л.А., Гусева В.П., Иванова Н.И., Леденева В.И., Ковригина С.Д., Крышова С.И., Матвеевой И.В., Осипова Г.Л., Шубина И.Л. и др. разработаны методы расчетов энергетических характеристик постоянного шума, эффективно используемые в практике проектирования строительно-акустических средств снижения шума. За рубежом исследования формирования шумовых полей помещений выполняли Hodgson M., Kuttruff H., Picaud J., Jing Y., Foy C., Simon J. и др. В то же время имеется ограниченное количество работ, связанных с исследованиями непостоянного шума помещений.

Разработка методов расчета энергетических характеристик непостоянных шумовых полей требует всестороннего учета условий их формирования. Установлено, что при разработке методов необходимо учитывать пространственные и временные характеристики источников шума, объемно-планировочные и акустические характеристики помещений, характер отражения звука от ограждений.

Проанализированы существующие методы расчетов шумовых полей помещений с целью оценки возможности их использования для разработки методов расчета непостоянного шума. Установлено, что их применение зависит от характера отражения звука от ограждений и формы помещений. При зеркально-диффузном отражении расчеты следует выполнять комбинарованными методами, в которых зеркальная составляющая отраженной звуковой энергии определяется методами геометрической акустики, а рас-

сеянная энергия - на основе уравнения Кугтруфа или статистическими методами. В комбинированных методах должен учитываться процесс перехода во времени зеркальной части энергии в рассеянную энергию. При диффузном отражении звука для разработки методов возможно использовать статистическую теорию акустики. Анализ полученных в главе результатов определил направления исследований.

Во второй главе разработаны методы расчета энергетических характеристик непостоянного шума при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений.

При зеркально-диффузном отражении в структуре отраженного шумового поля присутствуют две составляющие – зеркальная и рассеянная, которые различаются по длинам пробега звуковых лучей, скоростям затухания энергии, условиям образования и переноса энергии и т.д. При каждом отражении часть падающей зеркальной энергии переходит в рассеянную. При этом обратный переход невозможен. В этой связи при расчете энергетических характеристик шумового поля необходимо определять кроме прямой энергии величины зеркально и рассеянно отраженных энергий. В этом случае уровни звукового давления в расчетных точках в любое время t будут определяться как

$$L_t = 10 \lg \left[c (\varepsilon_t^{np} + \varepsilon_t^3 + \varepsilon_t^p) / I_0 \right], \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность звука на пороге слышимости, ε_t^{np} , ε_t^3 , ε_t^p – плотности звуковой энергии прямого звука, зеркальной и рассеянной составляющих отраженного звука в расчетной точке помещения в момент времени t ; c – скорость звука в воздухе. Расчет плотности прямой энергии не вызывает трудностей. При расчете отраженных составляющих необходимо учитывать процессы их формирования (см. рисунок 1).

На рисунке 1 I^{nad} , I^{noz} , I^3 , I^p – соответственно интенсивности падающей, поглощенной, зеркальной и рассеянной энергий. Величина поглощенной энергии определяется коэффициентом звукопоглощения α как $I^{noz} = \alpha I^{nad}$. Распределение зеркальной и рассеянной энергии определяется величинами α и β , где β – доля рассеянной энергии во всей отраженной энергии. В этом случае $I^3 = I^{nad} (1 - \alpha)(1 - \beta) = I^{nad} (1 - \alpha_{yc})$, где $\alpha_{yc} = \alpha + \beta - \alpha\beta$ – условный коэффициент потери зеркальной энергии за

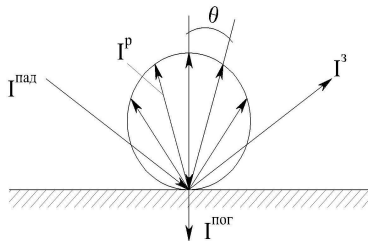


Рисунок 1 – Распределение отраженной энергии при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений

При использовании метода прослеживания лучей плотность зеркально отраженной звуковой энергии в i -ой расчетной точке в момент времени t определяется как

$$\varepsilon_{i,t}^3 = \frac{1}{c S_{np} N} \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M P_{(t-r_k/c)} \exp(-m_g r_k) \prod_{j=1}^k (1 - \alpha_{yc,j}), \quad (2)$$

где $P_{(t-r_k/c)}$ – переменная во времени звуковая мощность источника шума с учетом запаздывания прихода энергии в расчетную точку; N – количество лучей, исходящих из источника; r_k – общий путь, пройденный лучом; $\alpha_{yc,j}$ – условный коэффициент потери зеркальной энергии участка ограждения, с которым столкнулся луч при j -м акте отражения; $S_{np} = \pi r_{np}^2$ – площадь сечения приемника луча, принимаемого в виде сферы с радиусом r_{np} ; M – количество прохождения i -го луча через область приемника; m_g – показатель затухания звука в воздухе. В помещениях правильной формы для определения ε_t^3 используется также метод мнимых источников.

Плотность рассеянно отраженной энергии в случае использования интегрального уравнения определяется как

$$\varepsilon_t^p = \int_S \frac{I(ds', t-r_{s'}/c) (1 - \alpha_{s'}) \cos \theta ds'}{r_{s'}^2 c} \exp(-m_g r_{s'}), \quad (3)$$

счет поглощения и рассеяния. Рассеянно отраженная энергия подчиняется закону Ламберта

$$I^p = I^{nad} (1 - \alpha) \beta \cos \theta / \pi.$$

Для расчета отраженной энергии предложена комбинированная расчетная модель, суть которой заключается в следующем. Зеркальная составляющая определяется геометрическими методами, а рассеянная энергия на основе интегрального уравнения Куттруфа.

где $I_{(ds',t-r_{s'}/c)}(1-\alpha_{s'})$ – интенсивность рассеянной энергии, излучаемой в расчетную точку от поверхности ds' ; $r_{s'}$ – расстояние от поверхности ds' до расчетной точки; θ – угол направления от площадки ds' на расчетную точку; $\alpha_{s'}$ – коэффициент звукопоглощения поверхности ds' .

Величина $I_{(ds',t)}$ определяется в виде

$$I_{(ds',t)} = \int_S \frac{I_{(ds,t-R/c)}(1-\alpha_s) \cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi R^2} ds + I_{ds',t}^0, \quad (4)$$

где $I_{(ds,t)}$ – интенсивность падающей на участок ds' звуковой энергии, определяемая вкладами отражений рассеянной энергии от всех других участков ограждений ds ; R – расстояние между элементами ds и ds' ; θ_1 и θ_2 – углы между нормальными к элементам ds , ds' и линией, их соединяющей; $I_{ds',t}^0$ – интенсивность рассеянной энергии от прямого звука и звука от зеркальных отражений, падающих на участок ds' .

Для определения $I_{ds',t}^0$ можно использовать метод прослеживания лучей. В этом случае

$$I_{ds',t}^0 = \frac{\beta}{ds' \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M P_{(t-r_k/c)} \exp(-m_\theta r_k) \prod_{j=1}^{k-1} (1-\alpha_{yc,j}), \quad (5)$$

где β – коэффициент рассеяния звуковой энергии, принятый в данном случае одинаковым для всех ограждений; ds' – площадка поверхности, на которую падает луч; M – общее количество падений i -го луча на площадку ds' . Остальные обозначения те же, что и в (2).

Расчет рассеянной составляющей ε_i^P производится численным методом. Для его реализации разработана программа, позволяющая производить исследования влияния различных факторов на формирование непостоянных шумовых полей. Так как для реализации расчетной модели требуется большое время, разработан также практический метод, при котором зеркальная составляющая определяется, как и прежде по формуле (2), а рассеянная на основе выражения, полученного в 3 главе для оценки отраженной энергии при диффузном отражении звука

$$\varepsilon_i^p = \frac{\varepsilon_n^p \alpha_{cp} c}{l_{cp} P_n} \int_{t_n}^{t_s} P_t \exp\left(\frac{-\alpha_{cp} c(\tau - t - r/c)}{l_{cp}}\right) dt, \quad (6)$$

где l_{cp} – длина пробега звуковых лучей, α_{cp} – средний коэффициент звукопоглощения помещения. Входящую в формулу величину плотности звуковой энергии ε_n^p , возникающей при действии источника постоянной звуковой мощности P_n возможно рассчитать на основе численного решения дифференциального уравнения, записанного в виде

$$\frac{cl_{cp}}{2} \nabla^2 \varepsilon_n^p - cm_g \varepsilon_n^p = 0, \quad (7)$$

с граничными условиями в виде

$$\frac{cl_{cp}}{2} \cdot \frac{\partial \varepsilon_n^p}{\partial n} \Big|_{ds} = -\frac{\alpha_s \varepsilon_n^p \cdot c}{2(2 - \alpha_s)} + I_{ds}^0, \quad (8)$$

где I_{ds}^0 – интенсивность, вызванная рассеянными отражениями, возникающими при отражениях от поверхностей ds лучей, несущих зеркальную энергию. Для определения I_{ds}^0 использовано выражение (5) в виде

$$I_{ds,t}^0 = \frac{\beta}{ds \cdot N(1 - \beta)} \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M P_{(t-r_k/c)} \exp(-m_g r_k) \prod_{j=1}^k (1 - \alpha_{yc,j}). \quad (9)$$

Расчет I_{ds}^0 с использованием выражения (9) производится для случая, когда $P_t = P_n = const$.

Расчетная модель использована для оценки влияния доли рассеянной энергии на выбор модели отражения звука. Установлено, что при определенных величинах коэффициента β можно вместо зеркально-диффузной модели отражения звука от ограждений использовать диффузную модель отражения. Пределы ее применения зависят от пропорций помещений и звукопоглощения ограждений. В соразмерных помещениях без дополнительного звукопоглощения величина β должна быть $\beta \geq \beta_s = 0.05$, а при звукопоглощении $\beta \geq \beta_s = 0.20$. В несоразмерных помещениях без звукопоглощения условия замены выполняется при $\beta \geq \beta_s = 0.20$, а со звукопоглощением при $\beta \geq \beta_s = 0.40$.

В третьей главе работы предложены методы расчета непостоянного шума при диффузном характере отражения звука.

Для расчета шума в помещениях сложной формы и с различным звукопоглощением ограждений разработан метод, основанный на статистической энергетической модели распределения отраженной энергии в помещении с непостоянным во времени источником шума в виде уравнения (10) с граничными условиями (11) и начальными условиями (12)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{cl_{cp}}{2} \nabla^2 \varepsilon + cm_g \varepsilon - f_p = 0; \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} \right|_s = \frac{\alpha_s}{(2 - \alpha_s)l_{cp}} \varepsilon \Big|_s; \quad (11)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{P(1 - \alpha_{cp})\Delta\tau}{V_{uc}}; x \in V_{uc} \\ \varepsilon = 0; x \notin V_{uc} \end{cases}. \quad (12)$$

В выражениях (10) – (12): $f_p = P(1 - \alpha_{cp})/dv$ – плотность излученной отраженной энергии $P(1 - \alpha_{cp})$ в элемент dv в момент времени t ; P – мощность источника звука; α_s – коэффициент звукопоглощения на участке поверхности s ; V_{uc} – малая по сравнению с объемом помещения область первоначального распределения порции энергии.

Для реализации модели использован прямой разностный метод. В этом случае весь объем помещения разбивается на ряд элементарных объемов dv (см. рисунок 2). Для каждого объема записываются уравнения баланса отраженной энергии. Полученные уравнения позволяют вычислять разностным методом значения плотности звуковой энергии во всех элементарных объемах во все последующие временные интервалы dt , то есть оценивать изменение плотности звуковой энергии во всех точках объема во времени. В данном случае использована двухмерная модель, когда высота элементарных объемов равна высоте помещения.

В общем виде уравнение баланса отраженной энергии для объема с источником шума имеет вид

$$\Delta V \varepsilon_{i,j}^{t+\Delta t} = \Delta V \varepsilon_{i,j}^t + P(1 - \alpha_{cp}) \cdot dt - \Delta^2 (q_{nl} + q_{nm}) dt - \sum_4 q_{i\pm 1, j\pm 1} S dt, \quad (13)$$

где $\Delta V = h\Delta^2$ – объем параллелепипеда; q_{nl}, q_{nm} – плотности потоков звуковой энергии через нижнюю и верхнюю грани параллелепипеда (пол и потолок помещения); $q_{i\pm 1, j\pm 1}$ – плотности потоков через боковые грани параллелепипеда; $S = h\Delta$ – площадь боковой поверхности.

а)

б)

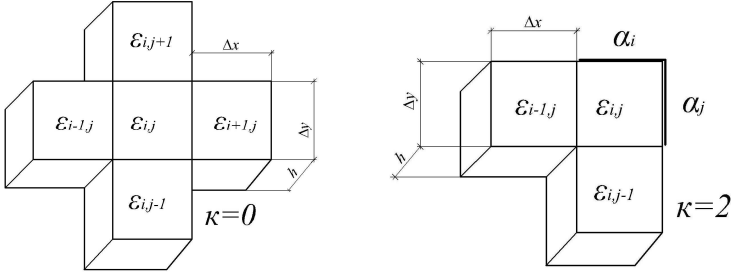


Рисунок 2 - Схемы к уравнению баланса звуковой энергии для элементарных объемов dv : а - внутреннего; б – граничащего с ограждениями.

Плотности потоков $q_{i\pm 1, j\pm 1}$ (рисунок 2, а) между объемами i, j и объемами $i\pm 1, j\pm 1$ определяются как

$$q_{i\pm 1, j\pm 1} = \frac{cl_{cp}}{2} \frac{(\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i\pm 1, j\pm 1})}{\Delta}. \quad (14)$$

Для поверхностей объемов, совпадающих с поверхностями помещения (см. рисунок 2, б), вычисление плотности потоков производится как

$$q_{(\alpha)i,k} = \frac{c\alpha_{i,k}\varepsilon_{i,j}}{2(2 - \alpha_{i,k})}; \quad q_{(\alpha)j,k} = \frac{c\alpha_{j,k}\varepsilon_{i,j}}{2(2 - \alpha_{j,k})}, \quad (15)$$

где $\alpha_{i,k}, \alpha_{j,k}$ – коэффициенты звукопоглощения k -поверхностей i, j -го элементарного объема.

Плотности потоков через пол и потолок определяются как

$$q_{i,j,nl} = \frac{c\alpha_{i,j,nl}\varepsilon_{i,j}}{2(2 - \alpha_{i,j,nl})}; \quad q_{i,j,nm} = \frac{c\alpha_{i,j,nm}\varepsilon_{i,j}}{2(2 - \alpha_{i,j,nm})}, \quad (16)$$

где $\alpha_{i,j,nl}, \alpha_{i,j,nm}$ – коэффициенты звукопоглощения пола и потолка в пределах i, j -го элементарного объема.

С учетом формул (14)-(16) уравнение (13) имеет вид

$$\varepsilon_{i,j}^{t+\Delta t} = \varepsilon_{i,j}^t \left[1 - \frac{(4-k)c\ell_{cp}dt}{2\Delta^2} - \frac{c}{2h} \left(\frac{\alpha_{i,j,нл}}{2-\alpha_{пт}} + \frac{\alpha_{i,j,пт}}{2-\alpha_{пт}} \right) dt - \sum_k \frac{c\alpha_{j,k}dt}{2\Delta(2-\alpha_{i,k})} \right] + \frac{P(1-\alpha_{cp})dt}{\Delta^2 h} + \frac{c\ell_{cp}}{2\Delta^2} \sum_{4-k} \varepsilon_{i\pm 1, j\pm 1}^t dt, \quad (17)$$

где k – количество боковых поверхностей i, j -го объема, являющихся поверхностями помещения.

Уравнение (17) описывает изменение во времени плотности отраженной энергии от отдельного импульса энергии в пределах i, j -го объема. Для реализации метода разработана компьютерная программа.

Для расчетов непостоянных шумовых полей при разработке строительно-акустических средств снижения шума предложен комбинированный метод, в котором пространственное распределение энергии определяется численным методом для постоянного источника шума, а временные изменения энергии оцениваются диффузным методом.

Выражение для расчета плотности отраженной звуковой энергии в этом случае для любого момента времени τ имеет вид

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_n \alpha_{cp} c}{l_{cp} P_n} \int_{t_n}^{t_k} P_t \exp\left(\frac{-\alpha_{cp} c[\tau - (t + r/c)]}{l_{cp}}\right) dt, \quad (18)$$

где ε_n – плотность отраженной энергии, определенная при работе источника постоянного шума мощностью P_n ; τ – текущий момент времени; $t+r/c$ – время начала излучения импульса; P_t – звуковая мощность непостоянного источника.

На основе данного метода разработана методика оценки непостоянного шума с источниками звука периодического действия. Получены выражения для определения максимальных и минимальных уровней импульсной энергии без учета и с учетом фонового шума, выражения для оценки максимального изменения уровней отраженной энергии, выражение для определения интервалов между импульсами, когда импульсные свойства отраженного поля не будут проявляться.

В главе дана общая методика оценки отраженного шума от источни-

ков периодического действия с произвольной формой излучения звуковой энергии. На ее основе предложены выражения для расчета плотности отраженной энергии источников периодического действия для четырех наиболее распространенных форм излучения энергии.

В четвертой главе работы представлен программный комплекс, реализующий разработанные методы расчета, и приведены результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных.

Программный комплекс построен по блочному принципу. Основными блоками программы являются: блок исходных данных, блоки по расчету характеристик непостоянного шума разработанными методами, блок по формированию и к выводу результатов расчетов. Оценка акустической эффективности строительно-акустических мероприятий производится путем сравнения уровней звукового давления до и после их применения. Для оценки шумового режима в программе определяются максимальные и минимальные уровни звукового давления в исследуемом временном диапазоне, эквивалентные уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука в дБА и другие характеристики, необходимые для оценки строительно-акустических средств снижения шума. Получение результатов возможно как отдельно от каждого метода расчета, так и совместно от всех методов. Последнее удобно при их сравнительном анализе. В расчетных блоках, использующих комбинированные модели, есть возможность отдельного определения зеркальной и рассеянной составляющих отраженного шумового поля. Это позволяет производить анализ влияния разных факторов на его формирование.

Для подтверждения достоверности полученных расчетных методов представлены результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных для помещений сложной формы без звукопоглощающих и со звукопоглощающими облицовками, полученные при работе в них источников периодического действия с различными временными характеристиками. На основе анализа экспериментальных и расчетных данных предложена методика определения величин α и β для реальных условия помещений. Сравнительный анализ показал адекватность расчетных моделей реальным условиям формирования шумовых полей. Процессы нарастания и затухания отраженной звуковой энергии, полученные при расчетах, соответствуют процессам, происходящим в реальных условиях. Расхождения в результатах определения уровней звукового давления не превышают $\pm 2-3$ дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненной работы позволяют представить следующие ее итоги:

1. Разработана комбинированная расчетная модель, оценивающая при зеркально-диффузном отражении звука распределение во времени и пространстве отраженной звуковой энергии при работе в помещениях источников шума с непостоянной звуковой мощностью. При реализации модели расчет зеркальной составляющей отраженной звуковой энергии производится методом прослеживания лучей или методом мнимых источников, а рассеянной составляющей на основе интегрального уравнения Куттруфа. Модель в основном предназначена для решения исследовательских задач. При экспериментальной проверке установлено, что погрешность расчетов не превышает ± 2.0 дБ.

2. Разработан практический метод расчета уровней звукового давления непостоянного шума при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений. Метод основан на совместном применении геометрического и статистического энергетического методов и позволяет значительно сократить время расчетов. Погрешность расчетов по сравнению с результатами оценки общего уровня звукового давления на основе точной расчетной модели не превышает 1.0 дБ.

3. Выполнен анализ формирования отраженных звуковых полей помещений, позволяющий определить границы применения диффузной модели отражения звука вместо зеркально-диффузной модели. Установлено, что границы зависят от пропорций помещений и величины вносимого в помещение звукопоглощения. В соразмерных помещениях без дополнительного звукопоглощения величина β должна быть $\beta_s=0.05$, а со звукопоглощением $\beta \geq \beta_s=0.20$. В несоразмерных помещениях без звукопоглощения $\beta \geq \beta_s=0.20$, а со звукопоглощением $\beta \geq \beta_s=0.40$.

4. Разработаны методы расчета непостоянного шума при диффузной модели отражения звука от ограждений, заменяющей зеркально-диффузную модель отражения. Предложены численный метод, основанный на прямой реализации статистической энергетической модели отраженного шума, и комбинированный метод, при котором пространственное распределение отраженной энергии оценивается статистическим энергетическим методом, а временные изменения энергии диффузным методом. Погрешность расчетов в границах применения диффузной модели отражения не превышает ± 3.0 дБ. На ос-

нове последнего метода разработана методика оценки непостоянного шума от источников звука периодического действия.

5. Разработан программный комплекс для реализации представленных в работе методов расчета. Выполнены экспериментальные исследования процессов формирования непостоянного шума в сложных по форме помещениях и предложена методика определения акустических параметров помещения на основе экспериментальных и расчетных данных. На основе сравнения расчетных и экспериментальных данных установлено, что предложенные расчетные методы обеспечивают требуемую точность расчетов уровней звукового давления и адекватно реагируют на изменения во времени уровней звукового давления при изменениях звуковой мощности источников шума.

Рекомендации по использованию результатов диссертации:

- предложенные методы расчета энергетических характеристик непостоянных шумовых полей следует использовать в практике проектирования строительно-акустических средств шумозащиты в гражданских и промышленных зданиях, и в первую очередь, при работе импульсных источников;

- методы следует использовать при исследованиях воздействия непостоянного шума на организм человека на стадии определения уровней звукового давления от непостоянных источников шума в помещениях с разными объемно-планировочными и акустическими параметрами.

Перспективы разработки темы исследований. На основе предложенных подходов к оценке непостоянного во времени шумового режима помещений необходимо проведение комплекса исследований изменений шумового режима в помещениях с непостоянными источниками шума при изменении их объемно-планировочных и акустических параметров при различных характеристиках источников шума периодического действия с целью уточнения на их основе нормативных требований к шуму, излучаемому источниками этого вида.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

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

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

3. 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. – М., 2012. – №6 - С. 58-60.

4. Антонов, А.И. Условия, определяющие процессы формирования шумового режима в замкнутых объемах, и их учет при оценке распределения звуковой энергии в помещениях / А.И. Антонов, **А.В. Бацунова**, И.Л. Шубин // Приволжский научный журнал. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2015. - №3. – С.89-95.

5. **Бацунова, А.В.** Расчет шумовых полей производственных помещений при работе источников шума периодического действия / А.В. Бацунова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского, 2015. - № 3 (57). - С. 46-52.

Публикации в других изданиях

6. Антонов, А.И. Оценка шума в помещениях с источниками звука периодического действия / А.И. Антонов, **А.В. Бацунова**, О.Б. Демин // Энергосбережение и экология в строительстве и ЖКХ, транспортная и промышленная экология. Материалы международной научно-практической конференции. Москва-Будва. – М., 2010. – С.190-194.

7. **Бацунова, А.В.** Статистические методы оценки непостоянных шумов помещений / **А.В. Бацунова** // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития: сборник научных статей молодых ученых, аспирантов и студентов ТГТУ. – Тамбов, 2011. – Вып. II. - С. 259-263.

8. Антонов, А.И. Расчет непостоянных шумов в помещениях на основе статистического энергетического подхода / А.И. Антонов, **А.В. Бацунова**, О.Б. Демин, А.А. Казакова // Проблемы и пути развития энергосбережения и защиты от шума в строительстве и ЖКХ. Материалы XV международной научно-практической конференции. Москва-Будва. – М., 2011. - С. 198-202.

9. Антонов, А.И. Экспериментальная проверка метода расчета непостоянного во времени шума в помещениях с импульсным источником периодического действия / А.И. Антонов, **А.В. Бацунова**, О.Б. Демин // Проблемы экологической безопасности и энергосбережения в строительстве и ЖКХ. Материалы Международной научно-практической конференции. – Москва – Кавала. – М., 2014.- С.27-30.