

На правах рукописи



ЯРОВАЯ ТАТЬЯНА СЕРГЕЕВНА

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

Специальность 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

Научный руководитель:

Антонов Александр Иванович,

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Архитектура и градостроительство» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

Монич Дмитрий Викторович,

доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Крышов Сергей Иванович,

кандидат технических наук, доцент, начальник отдела строительной акустики и обследования фасадов ГБУ города Москвы «Центр экспертиз, исследований и испытаний в строительстве»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2024 г. в ___ часов 00 минут на заседании диссертационного совета 39.1.001.01 при ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» по адресу: 127328, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, светотехнический корпус, тел.: (495) 482-40-76, факс: (495) 482-40-60, e-mail: niisf@niisf.ru.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:



Шмаров Игорь Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

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

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

Основные задачи работы: дать характеристику объектов с массовым пребыванием людей с точки зрения их шумового воздействия на окружающую среду; исследовать условия формирования шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей и определить основные факторы, влияющие на него; выполнить оценку существующих методов расчета энергетических параметров шума с позиции возможности их использования на объектах с массовым пребыванием

людей; исследовать энергетические параметры речи с учетом пола и возраста людей как специфических источников звуковой энергии и дать аналитическое описание факторов направленности на основе аппроксимации экспериментальных данных; разработать метод компьютерного моделирования прямого звука, образующегося в местах массового пребывания разговаривающих людей; разработать метод расчета прямого звука от разговаривающих людей как от излучающей звуковую энергию плоскости; разработать методы расчета отраженного шума в помещениях от распределенных источников (людей) при зеркальном и диффузном отражении звука от ограждений; разработать методику расчета и проектирования акустического благоустройства помещений с массовым пребыванием людей путем использования перегородок неполной высоты; разработать компьютерные программы для реализации предложенных методов и методик; произвести экспериментальную проверку разработанных методов и методик на натурных объектах с массовым пребыванием людей.

Научная новизна работы:

- на основе оценки степени воздействия возникающего при разговорах людей шума на окружающую среду впервые дано определение объектов с массовым пребыванием людей с позиции их шумовых характеристик;

- путем экспериментальных исследований в лабораторных и натурных условиях получены энергетические характеристики речи людей разного пола и возраста, предложены новые зависимости для определения факторов направленности речи;

- разработан новый метод компьютерного моделирования прямого звука, образующегося в местах массового пребывания разговаривающих людей;

- разработан новый метод расчета прямого звука, возникающего при разговорах людей в местах их массового скопления, как от излучающей звуковую энергию плоскости;

- на основе методов статистической и геометрической теорий акустики помещений предложены методики расчета отраженного шума в помещениях, учитывающие особенности излучения звуковой энергии находящимися в помещениях людьми как плоскими источниками звука;

- разработана новая методика расчета и проектирования акустического благоустройства в помещениях с массовым пребыванием людей путем использования перегородок неполной высоты.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается: в представлении разговаривающих людей в местах их массового скопления как специфических источников звука, обладающих особенностями случайного размещения и перемещения, и направленностью излучения звуковой энергии; во всестороннем изучении речи как источника шума в местах массового скопления людей и в выражениях, полученных для определения факторов направленности излучаемой людьми звуковой энергии; в разработке новых методов и в совершенствовании существующих методов и методик расчетов прямого и отраженного звука, возникающего в зданиях и сооружениях при массовом скоплении

разговаривающих людей; в разработке методики расчета и проектирования акустического благоустройства в помещениях с массовым пребыванием людей путем устройства в них перегородок неполной высоты; в разработке компьютерных программ для определения энергетических параметров шума на объектах с массовым пребыванием людей и в проектировании на этой основе мероприятий по акустическому благоустройству объектов и защите от их шума прилегающих городских территорий.

Методология и методы исследования. При разработке темы выполнялись теоретические и экспериментальные исследования. Целью теоретических исследований являлось установление особенностей формирования и распространения прямого и отраженного звука на объектах с массовым пребыванием разговаривающих людей. Экспериментальные исследования выполнялись с целью определения энергетических характеристик речи, а также для подтверждения точности предложенных методов и методик расчета. Разработка методов и методик выполнена с использованием основополагающих положений геометрической и статистической теорий акустики. Все расчеты выполнены с использованием специально разработанных компьютерных программ.

Положения, выносимые на защиту:

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

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

Апробация работы. Материалы, изложенные в диссертации,

представлялись и обсуждались на 3, 4 и 9-й Международных научно-практических конференциях Института архитектуры, строительства и транспорта ТГТУ «Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт» (Тамбов, 2016, 2017, 2022); на Международной научно-практической конференции «В.И. Вернадский: Устойчивое развитие регионов» (Тамбов, 2016); на Всероссийских научно-технических конференциях «Актуальные проблемы городского строительства» (Пенза, 2019, 2020); на 1 и 2-ой Всероссийских (национальных) научно-практических конференциях «Современная наука: теория, методология, практика» (Тамбов, 2019, 2020); на VIII, XIII, XIV Международных научных конференциях «Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г. Л.» (Москва, 2017, 2022, 2023); на VIII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Тамбов, 2023).

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

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

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, из которых 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, зарегистрировано 4 программы для ЭВМ в федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов работы, списка литературы из 134 наименований и 4 приложений. Общий объем работы 206 страниц. Основной текст, включая 71 рисунок, 61 таблицу, изложен на 175 страницах, объем приложений - 31 страница.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы.

В первой главе: сформулировано определение объектов с массовым пребыванием людей с точки зрения строительной акустики; проанализированы особенности формирования звуковых полей в зданиях и сооружениях с массовым пребыванием людей; установлены особенности распространения и формирования звуковой энергии в зданиях и сооружениях с массовым пребыванием людей; показана необходимость определения акустических параметров речи и разработки новых методов расчета прямого звука и усовершенствования методов расчета отраженного звука с целью их применения при проектировании мер по акустическому благоустройству на объектах с массовым пребыванием людей.

Показано, что, находясь в местах совместного пребывания, посетители обмениваются между собой звуковой информацией, которая для других находящихся на объекте, не участвующих в разговоре людей является шумовой нагрузкой, создаваемой разговаривающими людьми как специфическими источниками шума. По этой причине объекты с массовым пребыванием людей следует рассматривать как источники шумовых воздействий на людей, находящихся в пределах объекта, и на окружающую объект внешнюю среду. Шумовая нагрузка в этом случае зависит от количества одновременно разговаривающих людей, плотности их размещения на объекте, уровней мощности излучаемой ими энергии, области пространства, занимаемого ими на объекте.

Для оценки шумовых воздействий, возникающих в местах массового скопления людей, необходимо выполнять расчеты прямого звука на открытых и закрытых объектах и отраженного шума, возникающего в закрытых объемах. В главе показано, что при расчетах шума необходимо учитывать особенности речи человека с позиций ее характеристики как источника шума, а именно: мощность излучаемой энергии, ее направленность, частотный спектр, а также поведение людей как источников шума, характеризующихся высокой мобильностью, случайностью перемещений, случайностью направлений излучения энергии. Установлено, что такие исследования речи человека как источника шума ранее не производились.

Анализ существующих методов расчета прямого звука показал, что в технической литературе не используется отдельный тип источников шума в виде динамической стохастической среды, заполняющей некоторое пространство массового пребывания людей. Специфические особенности таких источников не позволяют напрямую использовать существующие подходы для расчета прямого звука в местах массового нахождения людей. В этом случае для расчета может быть использован метод компьютерного моделирования случайных процессов. При большом количестве разговаривающих людей и их высокой плотности размещения можно также использовать менее трудоемкие методы расчета, основанные на представлениях о распространении прямого звука от разговаривающих людей как от излучающих звуковую энергию плоскостей.

Выполнен анализ существующих методов расчета отраженной энергии в

замкнутых объемах помещений с целью их использования при решении поставленных в работе задач. Подробно рассмотрены методы расчета, разработанные в России на основе исследований А. И. Антонова, В. П. Гусева, С. И. Крышова, В. И. Леденева, И. Л. Шубина и др. За рубежом такие исследования выполняли Schroeder M. R., Kuttruff H., Hodson M., Foy C., Visentin C., Picaud J. A. и др. Показано, что выбор метода зависит от характера отражения звука от ограждений. Наиболее приемлемой в этом случае является расчетная модель, реализующая зеркально-диффузный характер отражения.

На основе полученных в главе результатов определены основные направления исследований.

Во второй главе: разработана методика экспериментальных исследований характеристик речи, необходимых при оценке шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей; на ее основе получены значения энергетических параметров мужской, женской и детской речи, а также выражения для определения факторов направленности речи.

Экспериментальное определение направленности и акустической мощности речи проводилось в заглушенной камере НИИСФа и в условиях реальных соотнесенных помещений. В заглушенной камере согласно требованиям ГОСТ 31252-2004 измерение параметров речи производилось точным методом по ГОСТ 31273-2003 (ИСО 3745-2003). Для измерений в камере в качестве измерительной поверхности использовалась сфера радиусом 1 м с центром в акустическом центре источника. Микрофоны располагались в заданных точках измерительной поверхности согласно рекомендациям ГОСТ. Измерения в реальных помещениях проводились в двух характерных точках: в ближней к источнику звуковой зоне, где присутствуют прямая и отраженная составляющие звуковой энергии, и в дальней, где преобладает отраженная составляющая звуковой энергии, и, следовательно, прямым звуком можно пренебречь. При математической обработке результатов измерений в этих точках определялась энергия прямого звука, а затем акустическая мощность и фактор направленности речи.

В главе приведены полученные частотные зависимости фактора направленности речи $\Phi(\theta)$, учитывающие пол и возраст разговаривающего человека. Экспериментальные данные были аппроксимированы с помощью функции:

$$\Phi(\theta) = K_1 + K_2 \cos \theta / 2 + K_3 \sin \theta, \quad (1)$$

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

Ниже приведены выражения $\Phi(\theta)$ с усредненными коэффициентами по двум группам частот – низким и средним (125–1000 Гц) и высоким (2000–4000 Гц). Усреднение коэффициентов по двум полосам частот обосновано характером диаграммы направленности (см. рис. 1). Видно, что на высоких частотах фактор направленности принимает ярко выраженную вытянутую форму в направлении $\theta = 0^\circ$.

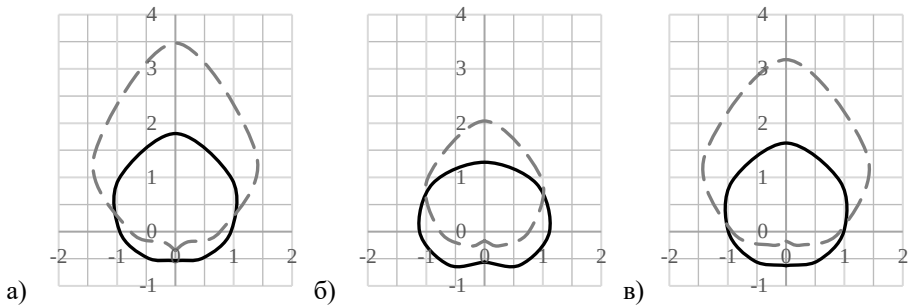


Рисунок 1. Диаграммы фактора направленности мужской (а), женской (б) и детской (в) речи в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125–1000 Гц (сплошная линия) и 2000–4000 Гц (пунктирная линия)

Формулы для выражения (1) с учетом диапазона частот и пола людей имеют вид:

1) для мужского голоса

- в полосах частот с f_{cp} 125–1000 Гц: $\Phi(\theta) = 0.59 + 1.16\cos(\theta / 2) - 0.44\sin\theta$;

- в полосах частот с f_{cp} 2000–4000 Гц: $\Phi(\theta) = 0.27 + 2.96\cos(\theta / 2) - 1.42\sin\theta$;

2) для женского голоса

- в полосах частот с f_{cp} 125–1000 Гц: $\Phi(\theta) = 0.54 + 0.74\cos(\theta / 2) + 0.06\sin\theta$;

- в полосах частот с f_{cp} 2000–4000 Гц: $\Phi(\theta) = 0.17 + 1.86\cos(\theta / 2) - 0.73\sin\theta$;

3) для детского голоса

- в полосах частот с f_{cp} 125–1000 Гц: $\Phi(\theta) = 0.63 + 1.01\cos(\theta / 2) - 0.35\sin\theta$;

- в полосах частот с f_{cp} 2000–4000 Гц: $\Phi(\theta) = 0.18 + 3.00\cos(\theta / 2) - 1.37\sin\theta$.

По результатам экспериментов также установлены средние уровни акустической мощности женской, мужской и детской речи (см. табл. 1).

Таблица 1. Акустическая мощность речи людей разного пола и возраста

Тип речи	Уровни акустической мощности речи L_w , дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Женский	47.1	65.1	65.6	56.1	51.9	49.0	45.9
Мужской	69.3	67.5	68.8	56.5	53.6	47.9	43.4
Детский	31.6	65.4	65.3	63.4	54.8	50.3	48.1

Видно, что уровни звуковой мощности мужских и женских голосов в октавных полосах частот с f_{cp} 500–2000 Гц практически совпадают. В то же время имеются и некоторые отличия. Например, в октаве с $f_{cp} = 125$ Гц уровень мощности мужской речи выше на 22.2 дБ, а на частоте 250 Гц – на 2.4 дБ. На высоких частотах (4000 и 8000 Гц) громкость женской речи выше мужской на 1.1–2.5 дБ. Спектр детской речи слабо зависит от пола ребенка, формы их частотных графиков близки между собой.

Результаты исследований могут быть использованы при практических

расчетах шума в местах массового нахождения людей с учетом структуры скопления людей по возрасту и полу. Для определения в этом случае усредненного спектра акустической мощности скопления людей в i -ой частотной полосе можно использовать формулу

$$\overline{L_{w_i}} = \Delta L_{\Gamma} + 10 \lg (k_{\text{м}} 10^{0.1 L_{W,\text{м}}} + k_{\text{ж}} 10^{0.1 L_{W,\text{ж}}} + k_{\text{д}} 10^{0.1 L_{W,\text{д}}}), \quad (2)$$

где $L_{W,\text{м}}$, $L_{W,\text{ж}}$, $L_{W,\text{д}}$ – уровни мужского, женского и детского голосов в i -ой частотной полосе; ΔL_{Γ} – поправка на громкость речи ($\Delta L_{\Gamma} = -6$ дБ для тихой речи, $\Delta L_{\Gamma} = 0$ дБ для разговора средней громкости и $\Delta L_{\Gamma} = 6$ дБ для громкой речи); $k_{\text{м}}$, $k_{\text{ж}}$, $k_{\text{д}}$ – коэффициенты, соответствующие долям мужчин, женщин и детей в местах массового пребывания людей, при этом $k_{\text{м}} + k_{\text{ж}} + k_{\text{д}} = 1$.

В третьей главе представлены методы и методики расчета прямого звука от источников шума в виде большого скопления людей и возникающего при этом в замкнутых воздушных объемах помещений отраженного шума. Для реализации предложенных методов и методик разработаны компьютерные программы.

Для расчета прямого звука разработаны два метода.

В местах массового пребывания людей при относительно небольшом количестве разговаривающих посетителей, как правило менее 1000 человек, для расчета прямого звука предложен метод компьютерного моделирования. Метод основан на случайной расстановке N_0 посетителей M_0 раз вероятностным образом пропорционально распределению плотности людей в рассматриваемом случае. Угол между направлением речи и направлением на расчетную точку, в которой определяется уровень звукового давления, также устанавливается случайно. Для реализации случайной функции выполняются расчеты с учетом нахождения вероятности расположения и ориентации каждого из источников шума. В методе учтено, что посетители разговаривают с коэффициентом одновременности речи $K_{\text{од}} < 1$. При этом используется функция (генератор) случайных чисел RND с равномерным распределением вероятности событий в диапазоне $\{0...1\}$. Для говорящего человека принимается $K_0 = 1$ при $RND < K_{\text{од}}$, в ином случае $K_0 = 0$.

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

$$L_{\text{пр}} = L_{WP} + 10 \lg \left[\frac{1}{M_0} \sum_{M_0} \sum_{i=1}^{N_0} \frac{K_0 \Phi_{(\theta)}}{4\pi r_i^2} \right], \quad (3)$$

где L_{WP} – акустическая мощность речи; $\Phi_{(\theta)}$ – фактор направленности речи; r_i – расстояние от разговаривающего человека до i -ой расчетной точки.

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

Для случая большого скопления людей (более 1000 человек), когда метод компьютерного моделирования становится трудоемким, в работе предложен метод расчета прямого звука от большого количества людей как от однотипных

стохастических источников шума. Метод основан на принципе замены системы локальных точечных источников шума (говорящих людей) на плоский источник с соответствующими энергетическими характеристиками по акустической мощности и направленности излучения.

Удельная акустическая мощность источника в виде разговаривающих людей, приходящаяся на единицу излучающей плоскости, определяется выражением

$$W'' = \frac{W_0 N K_{\text{од}} \cdot 10^{0.1 L_{WP}}}{S_0}, \quad (4)$$

где $W_0 = 10^{-12}$ Вт – пороговое значение акустической мощности; S_0 – площадь, занятая N количеством посетителей; $K_{\text{од}}$ – коэффициент, определяющий одновременность речи N посетителей, находящихся в пределах плоскости с площадью S_0 ; L_{WP} – уровень акустической мощности одного разговаривающего человека, зависящий от частотного диапазона и уровня звукового давления, создаваемого речью человека.

В работе величину плотности прямой звуковой энергии от такого плоского источника предложено определять с использованием выражения

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{W''}{\Omega c} \int_{S_0} \frac{\Phi}{r^2} dS. \quad (5)$$

Реализация выражения (5) производится численным методом. Исходная плоскость S_0 с равномерно распределенными источниками звука разбивается сеткой на M элементов равной площади с последующим суммированием энергии, излучаемой от каждого элемента, как от точечного источника звука. Окончательно уровень звукового давления в i -ой расчетной точке определяется по формуле

$$L_{\text{при}} = L_{WP} + 10 \lg \left(\frac{N K_{\text{од}}}{4\pi M} \right) + 10 \lg \left(\sum_{m=1}^M \frac{1}{r_{m_i}^2} \right). \quad (6)$$

При записи выражения (6) принято, что для большинства случаев в местах массового нахождения людей пространственный угол излучения звуковой энергии человеком Ω равен 4π , а фактор направленности речи при условиях случайной ориентации людей в пределах плоскости их нахождения равен $\Phi = 1$. При других ситуациях в выражении (6) могут быть использованы другие конкретные значения величин Ω и Φ .

Сравнительный анализ результатов расчета прямого звука рассмотренными выше методами показал, что максимальная разница уровней прямого звука в расчетных точках тестового помещения составляет не более 0.5 дБ. Это свидетельствует о достаточной точности более простого и менее трудоемкого численного метода расчета.

В главе проанализированы существующие методы расчета отраженного шума в помещениях с позиции возможности их использования при расчетах в помещениях с массовым пребыванием людей. Оценка методов выполнена с учетом геометрических форм помещений и характера отражения звука от ограждений.

При зеркальном отражении звука могут быть использованы геометрические методы, а именно: метод мнимых источников и метод прослеживания лучей. Наиболее универсальным является метод прослеживания лучей. Он позволяет выполнять расчеты в помещениях любой сложной формы. При диффузном отражении звука наиболее применимым является численный статистический энергетический метод. При зеркально-диффузном отражении звука предложено использовать комбинированный метод расчета, включающий в себя метод прослеживания лучей и численный статистический энергетический метод. Для указанных методов разработаны алгоритмы расчета. Их особенностью является то, что разговаривающие посетители массовых мероприятий рассматриваются как плоские источники, которые затем при расчете заменяются на систему точечных источников.

Для реализации методов разработаны компьютерные программы, которые для удобства использования были объединены в одну комплексную программу, позволяющую производить расчет в помещениях с массовым пребыванием людей при различном характере отражения звука от ограждений. В качестве среды для разработки программ приняты продукты фирмы Microsoft. Программирование выполнено на языке Visual Basic версии 6.0. Программы построены на основе блочно-модульного принципа, который характеризуется иерархической структурой. В этом случае для решения поставленной задачи необходимо выполнять в определенной последовательности ряд действий. Особенностью структуры является возвращение после каждого выполненного действия в основное меню программы.

Методы и их компьютерная реализация позволяют производить расчеты и построение шумовых карт как при полном заполнении помещений посетителями, так и при их частичном размещении. Примеры таких карт, построенных с использованием численного статистического энергетического метода, даны на рис. 2 для помещения размерами $12 \times 12 \times 3(h)$ м в октавной полосе с $f_{cp} = 1000$ Гц.

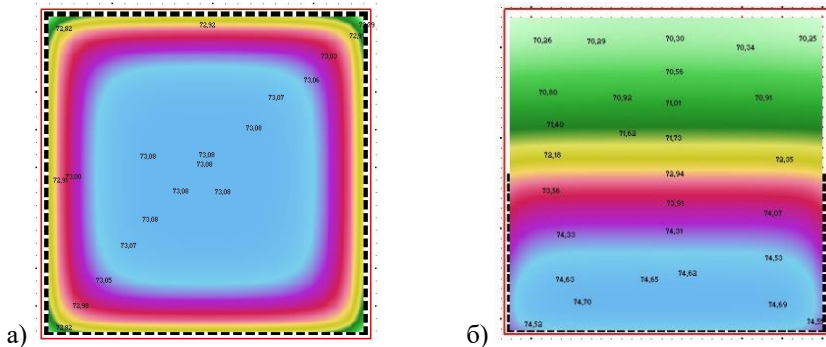


Рисунок 2. Шумовая карта помещения: а) с равномерно распределенными посетителями; б) при их расположении на одной половине помещения

Численный метод может также использоваться при расчетах шума от посетителей в системах офисных помещений, связанных проемами. На рис. 3 дан

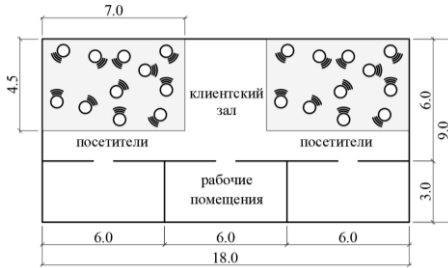


Рисунок 3. Схема помещений офиса (размеры даны в м)

пример расчета в такой системе. Видно проникновение шума из зала с посетителями в рабочие помещения офиса (см. рис. 4). Для снижения шума в данном случае предложено устройство звукопоглощающего потолка, в результате применения которого существенно снизились уровни шума в рабочих помещениях. Это приводит к улучшению в них слышимости и разборчивости речи.

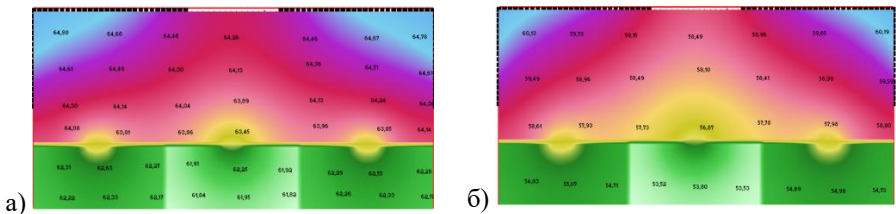


Рисунок 4. Распределение уровней звукового давления в офисе (дБ):
а) карта суммарных уровней при $\alpha_{ср} = 0.10$; б) то же при $\alpha_{пт} = 0.80$

В главе приведены результаты экспериментальной проверки предложенных расчетных методов.

Для оценки шумового режима в помещениях с массовым пребыванием людей произведены исследования в различных помещениях общеобразовательной школы (классы, спортзал, коридоры, фойе) при разных шумовых ситуациях. Установлено, что расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышают ± 2.7 дБ. Это соответствует требуемой точности практических расчетов уровней шума при проектировании шумозащитных мероприятий.

Для оценки точности методов расчета прямого звука выполнены исследования шумового режима на стадионе во время футбольного матча. Установлено,

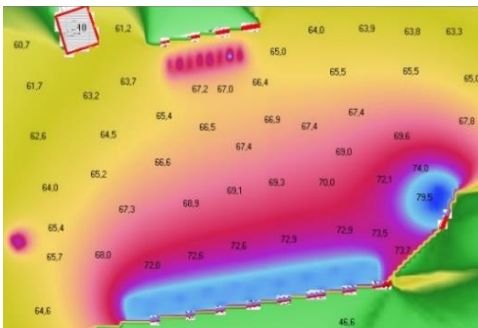


Рисунок 5. Шумовая карта стадиона

что расхождения расчетов и экспериментов в основном не превышают 3.0 дБ на основных участках трибун. Во время матча наблюдались отдельные превышения экспериментальных уровней от 4.5 до 7.0 дБ над расчетными уровнями. Последнее было связано со спонтанной активностью отдельной группы фанатов. На рис. 5 приведена шумовая карта стадиона в октавной полосе с $f_{ср} = 1000$ Гц.

В четвертой главе исследовано влияние перегородок неполной высоты на процессы формирования шумовых полей в помещениях с массовым пребыванием людей с целью проектирования перегородок по условиям обеспечения ими требуемого акустического режима помещений.

Перегородки неполной высоты, разделяющие внутренний объем помещений с массовым пребыванием людей, позволяют обеспечить в них улучшение акустического режима. В результате устройства перегородок происходят изменения в структуре звукового поля, а именно: возрастает изотропность поля, изменяется средняя длина свободного пробега, улучшается слышимость и разборчивость речи.

Путем компьютерного моделирования установлено, что устройство перегородок повышает изотропность отраженного звукового поля. В результате этого отражение звука от ограждений приближается к диффузному и, соответственно, длину среднего свободного пробега волн при расчетах с достаточной точностью можно принимать равной $l_{\text{ср}} = 4V/S$, где V – объем, а S – площадь всех поверхностей помещения.

В помещениях с перегородками происходят изменения уровней звукового давления из-за снижения отраженной энергии за счет увеличения актов поглощения звуковой энергии на поверхностях ограждений помещений и перегородок, а также за счет экранирующего эффекта перегородок. Эти обстоятельства необходимо учитывать в методах расчета уровней звукового давления.

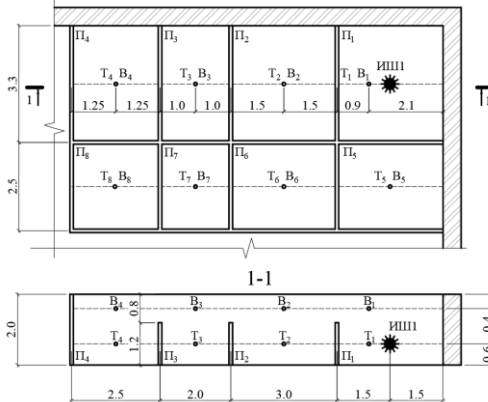


Рисунок 6. Схема помещения с перегородками неполной высоты и расчетных точек

Произведена оценка возможности использования для расчета шума в помещениях с перегородками метода прослеживания лучей и численного статического энергетического метода (см. рис. 6). При оценке в методах произведен учет наличия в помещениях перегородок неполной высоты. На рис. 7 приведены результаты расчета уровней звукового давления в помещении с перегородками от одного точечного источника шума и экспериментальные данные.

Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными. Наибольшие расхождения (до 3.0 дБ) наблюдаются в ближних к источнику расчетных точках Т1 и В1. В остальных точках погрешность расчетов не превышает 2.0 дБ. Методы, учитывающие наличие в помещении перегородок, могут быть использованы для анализа энергетических характеристик звукового поля в помещениях с перегородками неполной высоты.

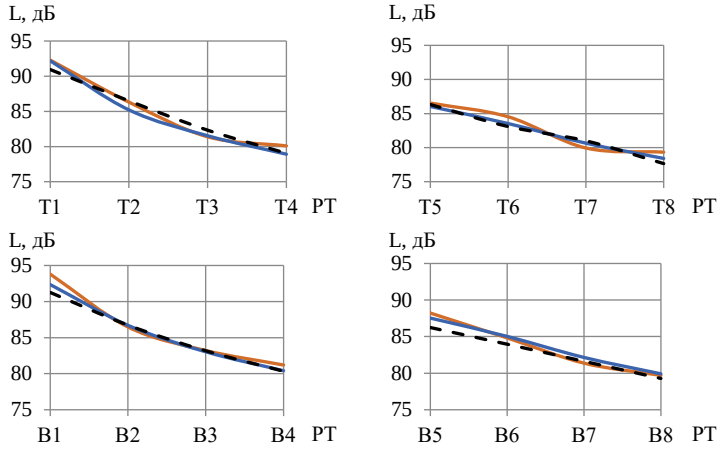


Рисунок 7. Результаты расчета уровней звукового давления и экспериментальные данные в помещении с перегородками неполной высоты: — — методом прослеживания лучей; — — численным методом; --- — экспериментальные данные

Перегородки неполной высоты имеют важное значение при обеспечении разборчивости речи в офисных помещениях. В главе проанализировано их влияние на разборчивость речи при различных характеристиках помещений и, в частности, при изменении звукопоглощения ограждений помещений. Оценка влияния перегородок на изменение разборчивости речи выполнена методом реверберационных помех с использованием критерия Сухаревского-Стретта. Для определения критерия Сухаревского-Стретта разработана методика, основанная на методах расчета прямой и отраженной звуковой энергии, предложенная в работе для помещений с массовым пребыванием людей, в том числе и в помещениях с перегородками. Ниже приведены результаты оценки разборчивости в помещении при отсутствии и наличии в нем перегородок (см. рис. 8). В качестве источника шума принимался разговор оператора с клиентом. Разговор происходил одновременно на всех 8 рабочих местах.

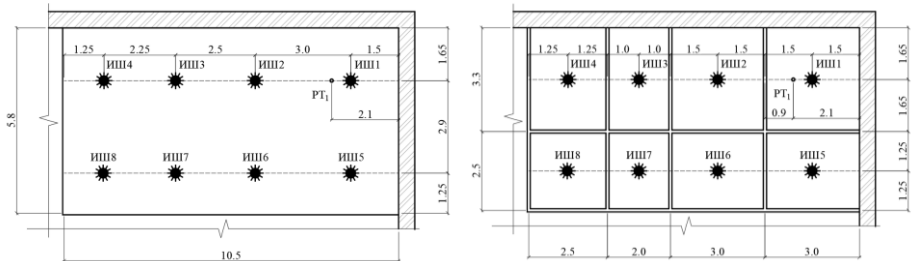


Рисунок 8. Схема помещения без перегородок и с перегородками неполной высоты: ИШ – источник шума

Результаты определения фактора реверберационных помех Q'' приведены в табл. 2 для различных планировочных и акустических характеристик помещения.

Таблица 2. Факторы реверберационных помех Q'' в октавной полосе частот с $f_{\text{ср}} = 1000$ Гц при различных расчетных ситуациях

Расчетная ситуация	$L_{\text{пр}}, \text{дБ}$	$L_{\text{отпр}}, \text{дБ}$	Q''
Пустое помещение, $\bar{\alpha} = 0.11$	68.44	76.42	0.48
Помещение с перегородками, $\bar{\alpha} = 0.11$	68.44	74.58	0.68
Пустое помещение, со звукопоглощением на потолке $\alpha = 0.35$	68.44	69.62	0.47
Помещение с перегородками и звукопоглощением на потолке $\alpha = 0.35$	68.44	67.64	1.10

Из таблицы видно, что в помещении без перегородок разборчивость речи существенно ниже требуемой величины $Q''_{\text{тр}} = 1.10$. Видно, что требуемую величину разборчивости в данном случае можно обеспечить путем устройства перегородок и размещения звукопоглощающих облицовок.

В приложениях диссертации приведены результаты экспериментального определения направленности и акустической мощности речи людей разного возраста и пола; свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ; акты о внедрении результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в работе, позволяют предоставить основные выводы:

1. Определена область исследования в виде мест с массовым пребыванием людей, установлена проблема отсутствия методов расчета звуковых полей от динамичных стохастических источников шума, какими являются люди в местах их скопления. Приведена классификация объектов с массовым пребыванием людей. Выполнены исследования факторов, влияющих на процессы формирования звуковых полей от источников в виде большого количества людей. Определены специфические свойства толпы людей, как источника шума. Сформулированы требования к методам расчета звуковых полей. В работе поставлены задачи модификации существующих и разработка новых методов расчета шума на объектах с массовым пребыванием людей.

2. В справочной литературе отсутствуют сведения об энергетических параметрах речи, как источника шума. В этой связи разработана методика и выполнены экспериментальные измерения с целью определения фактора направленности речи различных категорий людей по полу и возрасту. Получены экспериментальные значения факторов направленности и акустической мощности женской, мужской и детской речи в основных октавных полосах частот. Выполнена аппроксимация экспериментальных данных, и получены аналитические выражения

для фактора направленности, как осесимметричного акустического сигнала.

3. Разработаны два новых метода расчета прямого звука на объектах с массовым пребыванием разговаривающих людей: метод непосредственного компьютерного моделирования прямого звука, излучаемого разговаривающими людьми как точечными источниками; метод расчета прямого звука от разговаривающих людей как от равномерно излучающей звуковую энергию плоскости. Сравнительный анализ расчетов прямого звука разработанными методами в тестовом помещении показал, что результаты расчетов хорошо согласуются между собой. При этом второй метод при определенных условиях обладает меньшей трудоемкостью.

4. Разработаны методики расчета шума в помещениях с массовым пребыванием людей при различном характере отражения звука от ограждений. Для расчета шума в помещениях с зеркальным отражением звука разработаны методики оценки отраженной составляющей шума на основе геометрических методов мнимых источников и прослеживания лучей. Для расчета шума в помещениях с диффузным отражением звука разработана методика расчета отраженной составляющей шума на основе численного статистического энергетического метода. Для расчета шума в помещениях при зеркально-диффузном отражении звука разработана методика расчета отраженного шума, основанная на комбинированной расчетной модели, обеспечивающей расчет зеркальной составляющей отраженного шума методом прослеживания лучей, а диффузно рассеянной составляющей численным статистическим энергетическим методом. Сравнительный анализ расчетов с использованием разработанных методик для тестового помещения показал, что при одинаковых условиях результаты расчетов хорошо согласуются между собой.

5. Разработанные методы и методики расчета энергетических параметров шумовых полей объектов с массовым пребыванием людей алгоритмизированы и реализованы в виде компьютерных программ. Компьютерные программы построены по модульному принципу с элементами объектно-ориентированного программирования. Программы предназначены для расчета энергетических параметров шумовых полей и проектирования архитектурно-планировочных и конструктивных средств защиты от шума. Экспериментальная проверка предложенных методик расчета прямого звука на стадионе во время футбольного матча и шумового режима в помещениях с массовым пребыванием людей показала их достаточную точность и надежность. Расхождение экспериментальных и расчетных данных в большинстве случаев не превышает ± 3 дБ.

6. Выполнено исследование процессов распространения звуковых волн в ячейках помещения между перегородками неполной высоты. Показано, что происходит преобразование структуры звукового поля, и зеркальное отражение звука от перегородок переходит в модель рассеянного отражения звука по зависимости Ламберта. Сравнительные расчеты в помещении с массовым пребыванием людей до и после устройства перегородок неполной высоты показали, что перегородки улучшают акустический режим помещений, улучшают слышимость и

разборчивость речи при одновременном повышении конфиденциальности информации.

7. Разработанные методы расчета и их компьютерная реализация позволяют производить надежную оценку распространения звуковой энергии внутри зданий и на открытых территориях с учетом массового пребывания людей. Компьютерное моделирование дает возможность оценивать эффективность принимаемых мер по снижению шума и производить выбор и проектирование наиболее экономичных средств акустического благоустройства.

Рекомендации по дальнейшему применению результатов работы:

- экспериментальные значения факторов направленности и акустической мощности женской, мужской и детской речи и разработанные методы расчета шума могут быть использованы проектировщиками для снижения шума в помещениях и обеспечения разборчивости речи, а также для определения необходимых параметров электроусиления музыки и речи в зрительных залах, для проектирования систем речевого оповещения при пожарах и других аварийных ситуациях;

- полученные результаты могут использоваться при подготовке методических рекомендаций по акустическому проектированию спортивных, торговых помещений, зрительных залов и других объектов с массовым пребыванием людей.

Перспективы дальнейших исследований. На основе предложенных методов расчета прямого и отраженного звука могут быть уточнены методики расчета и проектирования слышимости и разборчивости речи в помещениях с массовым пребыванием людей, усовершенствованы методы оценки акустических качеств зрительных залов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи, опубликованные в научной периодике перечня ВАК РФ

1. Антонов, А. И. Расчеты шума при акустическом благоустройстве в помещениях с массовым пребыванием людей / А. И. Антонов, В. И. Леденев, **Т. С. Яровая** // Строительство и реконструкция. - 2017. - № 4(72). - С. 94-100.

2. Антонов, А. И. Экспериментальное определение энергетических параметров речи с целью использования их при оценке шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, **Т. С. Яровая** // Приволжский научный журнал. - 2017. - № 4(44). - С. 9-15.

3. Шубин, И. Л. О возможности расчета шума в децибелах «А» в местах массового пребывания людей / И. Л. Шубин, А. И. Антонов, **Т. С. Яровая** // Строительство и реконструкция. - 2018. - № 3(77). - С. 83-88.

4. **Яровая, Т.С.** Численные методы расчета энергетических характеристик шума в помещениях с массовым пребыванием людей / Т. С. Яровая,

А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // Приволжский научный журнал. - 2022. - № 4(64). - С. 26-34.

5. Шубин, И.Л. Оценка энергетических параметров речи на основе импульсной характеристики помещения / И. Л. Шубин, А. И. Антонов, И. В. Матвеева, **Т. С. Яровая** // Academia. Архитектура и строительство. - 2023. - № 1. - С. 108-114.

6. **Яровая, Т.С.** Оценка влияния перегородок неполной высоты на акустические параметры помещения / Т. С. Яровая, А. И. Антонов, И. В. Матвеева, Е. О. Соломатин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. - 2023. - Т. 25, № 1. - С. 122-133.

Статьи, опубликованные в научной периодике, индексируемой РИНЦ

7. **Яровая, Т. С.** Математическое моделирование прямого звука при экологической оценке шумового режима в зданиях с массовым пребыванием людей / Т. С. Яровая, А. И. Антонов // В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов: Материалы Международной научно-практической конференции, Тамбов, 07-09 июня 2016 года. Том 4. - Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2016. - С. 204-210.

8. Антонов, А. И. Расчет прямого звука от большого количества людей как от однотипных стохастических источников шума / А. И. Антонов, **Т. С. Яровая** // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт: Материалы 3-й международной научно-практической конференции института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета, Тамбов, 27 июня 2016 года. - Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2016. - С. 64-67.

9. Антонов, А. И. Расчет распространения прямого звука в городской среде от объектов с массовым пребыванием людей / А. И. Антонов, И. Л. Шубин, **Т. С. Яровая** // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. - 2017. - № 3(19). - С. 105-112.

10. **Яровая, Т. С.** Исследование акустического режима общеобразовательной школы как объекта с массовым пребыванием людей / Т. С. Яровая, А. И. Антонов // Современная наука: теория, методология, практика: Материалы 1-ой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Тамбов, 26-27 ноября 2019 года. - Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2019. - С. 70-75.

11. **Яровая, Т. С.** Особенности оценки разборчивости речи в местах с массовым пребыванием людей / Т. С. Яровая, А. И. Антонов // Актуальные проблемы городского строительства: Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, Пенза, 29-30 января 2019 года / Под редакцией А.В. Гречишкина. - Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2019. - С. 125-130.

12. Антонов, А. И. Зависимость средней длины свободного пробега звука

от положения источника в помещении с перегородками неполной высоты / А. И. Антонов, **Т. С. Яровая** // Современная наука: теория, методология, практика: Материалы 2-ой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Тамбов, 28-29 мая 2020 года. - Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2020. - С. 75-78.

13. **Яровая, Т. С.** Средняя длина свободного пробега звука в помещениях с перегородками неполной высоты / Т. С. Яровая // Актуальные проблемы городского строительства: Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, Пенза, 26-27 февраля 2020 года / Под редакцией А.В. Гречишкина. - Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2020. - С. 155-161.

14. Антонов, А. И. Зависимость средней энергии от положения источника шума в несоразмерном помещении / А. И. Антонов, Н. П. Меркушева, **Т. С. Яровая** // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. - 2020. - № 4(15). - С. 82-93.

15. **Яровая, Т. С.** Программное обеспечение расчетов энергетических характеристик шума на объектах с массовым пребыванием людей / Т. С. Яровая, В. И. Леденев, А. И. Антонов // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт: Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е.М., Тамбов, 21-22 сентября 2022 года. - Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2022. - С. 284-288.

16. Антонов, А. И. Моделирование шумового режима на объектах с массовым пребыванием людей / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. Л. Шубин, **Т. С. Яровая** // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума, Тамбов, 17-21 мая 2023 года. - Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2023. - С. 22-24.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619636 Российская Федерация. Расчет шумового режима на территориях с массовым пребыванием людей: № 2017616473: заявл. 04.07.2017: опубл. 30.08.2017 / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, **Т. С. Яровая**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619637 Российская Федерация. Расчет шумового режима в зданиях с массовым пребыванием людей: № 2017616472: заявл. 04.07.2017: опубл. 30.08.2017 / А. И. Антонов, В. И. Леденев, **Т. С. Яровая**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611868 Российская Федерация. Комплексная программа по расчету звуковых полей в помещениях и проектированию средств защиты от шума: № 2019610550: заявл. 22.01.2019; опубл. 05.02.2019 / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев, **Т. С. Яровая**, И. В. Матвеева; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661360 Российская Федерация. Расчет уровней, потоков и градиентов плотности отраженной звуковой энергии в помещениях с зеркально-диффузным отражением звука от ограждений: № 2021660593: заявл. 05.07.2021; опубл. 09.07.2021 / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев, **Т. С. Яровая**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».