



На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВА АНАСТАСИЯ ВЛАДИМИРОВНА

**СНИЖЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ШУМА НА
СУЩЕСТВУЮЩУЮ И ПРОЕКТИРУЕМУЮ ЖИЛУЮ ЗАСТРОЙКУ**

1.3.7 – Акустика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», на кафедре «Экология и производственная безопасность».

Научный руководитель:

Буторина Марина Вадимовна - доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Экология и производственная безопасность» ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты:

Иголкин Александр Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок имени академика РАН Владимира Павловича Шорина ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», (Самарский университет), г. Самара;

Копытенкова Ольга Ивановна – доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры «Техносферная и экологическая безопасность», заведующая Испытательным центром «Экологическая безопасность и охрана труда» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), г. Ростов-на-Дону.

Защита состоится «___» марта 2025 г. в __:00 на заседании диссертационного совета 24.2.272.02 в ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» и на сайте <https://voenmeh.ru/>.

Автореферат разослан __.01.2025 г. Отзывы на автореферат направлять по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 1-ая Красноармейская ул., д. 1, каф. Е5.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



Тюрина Наталья Васильевна

Общая характеристика работы

Актуальность работы обусловлена проблемой сверхнормативного воздействия шума на население. Ежегодные доклады Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека подтверждают наличие большого количества жалоб населения на повышенные уровни шума. По результатам исследований, проведенных в рамках разработки карты шума Санкт-Петербурга, созданной в 2006 году, приблизительно 10 % городской территории попадает в зону превышения нормативных уровней шума из-за железнодорожного транспорта. Превышения уровней шума от железнодорожного транспорта варьируются от 4 до 20 дБА в зависимости от расстояния от железной дороги до ближайшей застройки.

Вопросами изучения распространения и снижения транспортного шума в жилой застройке в нашей стране занимались М.В. Буторина, А.В. Васильев, В.Н. Зинкин, Н.И. Иванов, В.Ю. Кирпичников, Д.А. Куклин, П.В. Матвеев, Н.Н. Минина, Г.Л. Осипов, Н.В. Тюрина, А.Е. Шашурин, И.Л. Шубин, Ю.И. Элькин, Е.Я. Юдин и др. За рубежом над данными вопросами работали: Л.Л. Беранек, Р.Х. Болт, Т. Климпель, М. Дж. Крокер, З. Маекава, Р.Б. Ньюман, Х. Паукерт, Д. Томпсон и др.

На сегодняшний день в городах также имеет место проблема нехватки территорий для строительства в связи с большим ростом объема строительства нового жилья. Зоны санитарного разрыва вдоль линий железных дорог помогают решить проблему сверхнормативного воздействия шума, но их размер может быть очень большим, и тогда значительная часть территории не может быть использована для строительства жилых домов. Данная проблема может быть решена путем применения шумозащитных мероприятий, которые позволят снизить акустическое воздействие железнодорожного транспорта на прилегающую территорию. Для выбора наиболее эффективных шумозащитных мероприятий необходимо учитывать все особенности будущей застройки. Корректное расположение зданий различного назначения на застраиваемой, прилегающей к железной дороге, территории, также, позволит улучшить акустическую ситуацию в новых кварталах.

Проблема повышенного шума при близком расположении жилых домов к железной дороге существует не только для перспективного строительства, но и для существующей застройки. Помимо городской многоэтажной застройки существует сельская застройка, представляющая собой отдельно стоящие малоэтажные дома. В подобных местах, где железные дороги проходят прямо по территории поселков, часто можно наблюдать расположенные очень близко к железной дороге дома. Сложность реализации шумозащитных мероприятий в таких условиях обусловлена тем, что их выбор достаточно ограничен и зависит от технической возможности их реализации на небольших площадях земли.

Рекомендации по выбору шумозащитных мероприятий и размещению нормируемых объектов вблизи железных дорог позволят минимизировать трудовые затраты на разработку шумозащитных мероприятий и подобрать наиболее правильный с точки зрения акустического комфорта вариант расположений жилых домов вблизи железной дороги.

Немаловажную роль в подборе шумозащитных мероприятий играет точный расчет распространения шума в застройке. В ходе исследования были проведены натурные измерения затухания шума в застройке и проведены сравнения полученных экспериментально значений с расчетными величинами. Результаты показали неудовлетворительную сходимости, что позволяет сделать вывод о том, что существующие методики не учитывают всех особенностей распространения шума в жилых массивах. Кроме того, существующие методики достаточно сложны для использования, их применение требует специальных навыков, что затрудняет принятие решения о шумозащите на стадии оценки инвестиций, когда акустические расчеты еще не выполнены. Результатом чего становятся малоэффективные дорогостоящие мероприятия, не позволяющие обеспечить акустический комфорт на всей территории защищаемой застройки. Инвесторам и заказчикам строительства объектов необходимо предоставить удобный инструмент для проведения предварительной оценки объема шумозащитных мероприятий, а также планирования застройки.

Научно-техническая гипотеза:

Разработка расчетной модели и расчетных формул для определения снижения звука в типовых массивах застройки позволит уточнить и упростить оценку уровней шума железнодорожного транспорта на селитебной территории, а также разработать наиболее эффективные шумозащитные мероприятия.

Целью работы является выявление типовых, с точки зрения распространения шума, массивов зданий в городской и сельской застройке и разработка расчетной модели распространения шума в этих массивах, разработка расчетной методики для оценки затухания звука для разработанных расчетных схем, а также рекомендации по размещению жилой застройки на территориях вдоль существующих железных дорог.

Задачи исследования:

- выявление типовых, с точки зрения распространения шума, массивов зданий в городской и сельской застройке;
- выполнение теоретических исследований распространения и затухания звука от железной дороги в различных типах застройки;
- разработка методики экспериментальных исследований затухания шума железнодорожного транспорта в различных типах застройки;
- выполнение экспериментальных исследований по уточнению и выявлению влияния различных свойств элементов застройки на затухание шума;

- разработка расчетных схем для оценки снижения шума на территории типовой застройки с учетом особенностей распространения звука;
- разработка расчетных формул для расчета затухания звука в данных расчетных схемах;
- разработка классификации железных дорог по их шумовым характеристикам на основе «Методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД» от 13.01.2020;
- разработка рекомендаций по выбору шумозащитных мероприятий исходя из типов застройки;
- разработка рекомендаций по размещению нормируемых объектов на территориях вдоль существующих железных дорог;
- апробация на практике предложенных методик и подходов.

Объекты исследования – железные дороги как источник шума и жилая застройка как зона распространения звука.

Предмет исследования – распространение шума железных дорог в жилой застройке.

Научная новизна:

1. Разработаны расчетные схемы распространения шума на территории застройки для типовых жилых массивов с учетом особенностей распространения звука (экранирования, диффрактирования, звукопоглощения, отражения, дивергенции);
2. Установлена взаимосвязь между параметрами застройки и снижением шума железнодорожного транспорта при распространении в ней;
3. Получены формулы расчета распространения шума в типовых жилых массивах для городской и сельской застройки;
4. Исследованы шумозащитные мероприятия, наиболее эффективные для различных типов жилой застройки и существующие приемы размещения нормируемых объектов на территориях вдоль существующих железных дорог.

Теоретическая значимость работы заключается в установлении основных закономерностей распространения звука в различных типах застройки, в разработке методов оценки снижения шума и способов выбора шумозащитных мероприятий исходя из типов застройки, разработке способов шумозащитного размещения застройки относительно источника шума.

Практическая значимость работы:

1. Разработана методика экспериментальных исследований затухания шума железнодорожного транспорта в различных типах застройки;
2. Получены результаты экспериментальных исследований, позволяющие установить связь между параметрами застройки и снижением звука в ней;

3. Разработаны расчетные схемы распространения шума на территории застройки для типовых жилых массивов, разработан инженерный метод оценки снижения шума для разработанных схем;

4. Разработаны рекомендации по выбору шумозащитных мероприятий исходя из типов жилой застройки;

5. Разработаны рекомендации по размещению нормируемых объектов на территориях вдоль существующих железных дорог.

На защиту выносятся:

1. Методика экспериментальных исследований затухания шума железнодорожного транспорта в различных типах застройки;

2. Результаты экспериментальных исследований, позволяющие установить связь между параметрами застройки и снижением звука в ней;

3. Формулы расчета распространения шума в типовых жилых массивах для городской и сельской застройки;

4. Рекомендации по выбору шумозащитных мероприятий исходя из типов жилой застройки;

5. Рекомендации по размещению нормируемых объектов на территориях вдоль существующих железных дорог.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой данной работы служат результаты фундаментальных и прикладных исследований в области процессов распространения звука в условиях застройки и шумообразования потоков железнодорожного транспорта. При разработке исследовательского подхода и проведении экспериментальных исследований применялись современные методы системного анализа, математического моделирования и статистической обработки данных. Эмпирическая база исследований сформирована путем проведения серии натурных измерений на более чем 30 объектах.

Степень достоверности диссертационного исследования подтверждается серией экспериментов, выполненных в натурных условиях с использованием прецизионной акустической аппаратуры, использованием современных методик испытаний и обработки информации. Результаты выполненных теоретических исследований распространения шума удовлетворительно согласуются с результатами натурных измерений. Кроме этого, достоверность результатов исследований обоснована применением методического комплекса исследований, разработанной с учетом действующих нормативных документов РФ – СП, ГОСТ и т.д., успешной апробацией и внедрением полученных результатов исследований в практику проектирования шумозащиты.

Апробация результатов исследования:

Основные положения диссертации представлены и обсуждались на заседаниях кафедры «Экология и производственная безопасность» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в 2024 г.; на IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», Санкт-Петербург (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова), 26 – 28 апреля 2023 г.; на XIV международной научно-практической конференции «Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения», г. Томск (ТГАСУ), 12 – 14 марта 2024 г.; на IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания», г. Москва (МГТУ им. Н.Э. Баумана), 23 – 24 мая 2024 г.

Внедрение результатов исследования:

Результаты работы были использованы при разработке «Методических указаний по выбору шумозащитных мероприятий при выявлении сверхнормативного акустического воздействия от объектов железнодорожного транспорта» по заказу ОАО «РЖД». Разработаны карты шума для более 50 участков железных дорог, при помощи которых были разработаны шумозащитные мероприятия, позволяющие обеспечить нормативные уровни шума на территории, прилегающей к железной дороге и в нормируемых объектах. Наиболее масштабными проектами являются разработка карт шума участка железной дороги Хабаровск I – Хабаровск II Дальневосточной железной дороги и Московских центральных диаметров.

Личный вклад соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в том, что автором выполнены обзор литературных источников, экспериментальные исследования, разработаны расчетные схемы и формулы. Диссертационная работа в полном объеме является самостоятельным исследованием. В работах, написанных в соавторстве, автор описал проводимые эксперименты и их результаты, выявил зависимости различных параметров, сформулировал окончательные выводы по проведенным исследованиям.

Публикации:

По материалам диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 6 в журналах, входящий в перечень ВАК РФ (K2), в 2 статьях и материалах международных конференций, индексируемых в базах SCOPUS и WoS.

Соответствие научно-квалификационной работы паспорту научной специальности:

Тема диссертации соответствует пункту 6 паспорта научной специальности 1.3.7 «Акустика», отрасль науки – технические науки:

«6. Акустика газовых сред, аэроакустика, прием и обработка звуковых сигналов в воздухе, мониторинг источников акустического шума в атмосфере, акустическая экология».

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 140 наименований, 4 приложений; изложена на 217 страницах машинописного текста, в т. ч. содержит 45 таблиц, 117 рисунков.

Основное содержание работы

Во введении отражена актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе проведен анализ состояния проблемы и обзор существующих методов ее решения, представлено описание объекта исследования, поставлены основные задачи исследования.

Объектами исследования являются железные дороги и жилая застройка, как источник шума и зона распространения шума. Распространение шума в застройке рассматривается в зависимости от типа застройки. Было выделено два основных типа застройки – городская и сельская.

Особенностью городской застройки является то, что многоэтажные дома выступают в роли экранирующих сооружений, препятствуя свободному распространению звука на территории. Эффект экранирования в таком случае зависит от расположения зданий по отношению к источнику шума и друг к другу. Существует несколько основных видов городской застройки, которые рассмотрены в данной работе: периметральная, строчная параллельная и перпендикулярная, ленточная.

Особенностью сельской застройки являются малоэтажные (1 – 2 этажные) жилые дома с участками земли, часто огороженные заборами, на которых могут располагаться различные постройки. Постройки могут быть расположены как вплотную к жилому дому, создавая единый массив построек, так и хаотично по всему участку. Также возможен вариант, когда постройки расположены по периметру участка, огораживая его.

Выявление типовых, с точки зрения распространения шума, массивов зданий в городской и сельской застройке и разработка расчетной модели распространения шума в этих массивах, а также разработка расчетных формул для расчета затухания звука в данных расчетных схемах позволит значительно упростить процесс расчета распространения шума в жилой застройке, а также уточнить его результат. Результат сравнения значений снижения звука при распространении в застройке полученных расчетным путем при помощи различных методик с результатами эксперимента, показал, что существующие расчетные методики дают преимущественно заниженные значения

снижения шума. Это говорит о необходимости разработать формулы, позволяющие оценить снижение шума в застройке, которые бы учитывали специфику как источника шума (железнодорожной), так и особенности жилой застройки.

Вторая глава посвящена методике проведения эксперимента по определению затухания звука в жилой застройке.

Для проведения измерений были выбраны участки с различными типами застройки (городской и сельской) и различными вариантами расположения зданий. Измерение шума на территории жилой застройки проводилось по методике измерений ГОСТ 23337-2014. Так как основным источником шума являлись железные дороги т.е. шум непостоянный, измерялись следующие параметры: эквивалентный уровень звука и максимальный уровень звука.

Точки измерений располагались на расстоянии 25, 50, 100 и 200 м от оси ближайшего железнодорожного пути. По возможности все четыре измерительных микрофона располагались на одной линии, перпендикулярной железнодорожным путям. На рисунке 1 показано расположение измерительных микрофонов. На рисунке 2 показана схема расположения точек измерения на участке.

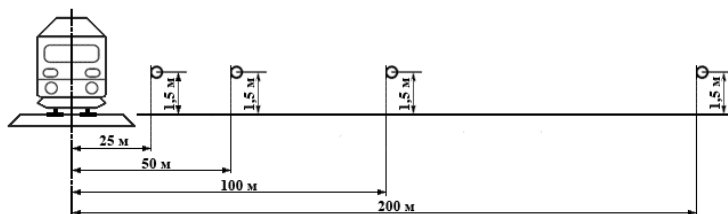


Рисунок 1 – Схема расположения микрофонов

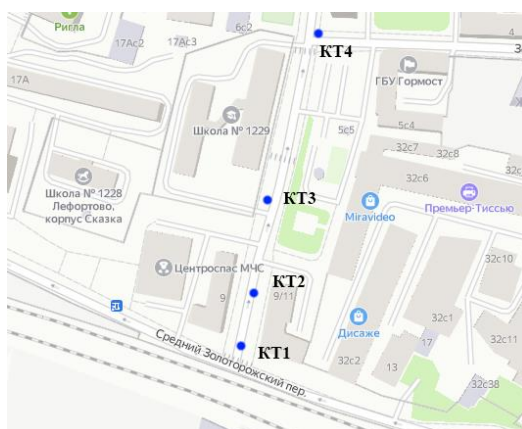


Рисунок 2 – Схема расположения расчетных точек на участке

Измерения проводились синхронно во всех точках измерения во время проезда поезда мимо точки измерения. Измерение во время проезда каждого поезда длилось до тех пор, пока уровень звука не снижался на 10 дБА относительно наибольшего мгновенного уровня звука в момент проезда поезда мимо точки измерения. Измерения проводились в объеме не менее 3 раз для каждой категории поезда.

Результаты измерений во всех точках сравнивались с фоновыми уровнями звука и при необходимости корректировались с применением поправочного коэффициента, в соответствии с п. 8.3 – 8.4 ГОСТ 23337-2014. Результаты измеренных уровней звука, разность которых с уровнями фонового шума менее 3 дБА исключались, и в дальнейших расчетах не учитывались.

Помимо шума на селитебной территории также были измерены шумовые характеристики потоков железнодорожного транспорта в соответствии с ГОСТ 20444-2014.

Так как интенсивность движения поездов была недостаточно велика, измерения проводились путем измерения уровня звукового воздействия при проезде поезда и в дальнейшем пересчитывались в эквивалентный уровень звука.

Для каждого проезда подвижного состава на испытательном участке рассчитывалась величина затухания звука на местности как разница между измеренными значениями в точках на расстоянии 25, 50, 100 и 200 м. Среднее значение затухания было рассчитано для каждого типа подвижного состава и далее для всего потока на каждом из рассматриваемых участков.

В третьей главе приводится исследование факторов, влияющих на снижение звука в застройке, общие положения и допущения теории, выделены типовые схемы расположения зданий, предложены формулы расчета снижения звука в застройке.

Среди участков, на которых проводились экспериментальные измерения, были выделены участки с четырьмя характерными типами городской застройки: строчная параллельная застройка, строчная перпендикулярная, периметральная, ленточная. На рисунке 3 показаны схемы расположения зданий в различных типах застройки.

В случае строчной параллельной застройки снижение шума происходит за счет экранирования первым эшелонem зданий. Наибольшее снижение будет достигнуто на территории ближе к центру зданий, по краям за счет боковой дифракции снижение шума будет ниже. В строчной перпендикулярной застройке эффект экранирования шума зданиями отсутствует, однако снижение все же будет наблюдаться за счет ограничения угла видимости источника шума, также будет иметь место эффект переотражения звука между двумя зданиями. В случае периметральной застройки снижение шума обусловлено экранированием зданиями с трех сторон, а на территорию внутреннего двора шум проникает через проемы между зданиями. В случае ленточной застройки здание первого эшелона является экранирующим сооружением для все последующей

застройки, боковая дифракция в данном случае не оказывает такого существенного влияния как в случае строчной параллельной застройки.

Было выдвинуто предположение, что на затухание звука в застройке влияют такие параметры как плотность застройки, отношение длин сторон зданий (a/b) и отношение длин просветов между зданиями к общей длине участка ($l_{\text{просв}}/l_{\text{общ}}$).

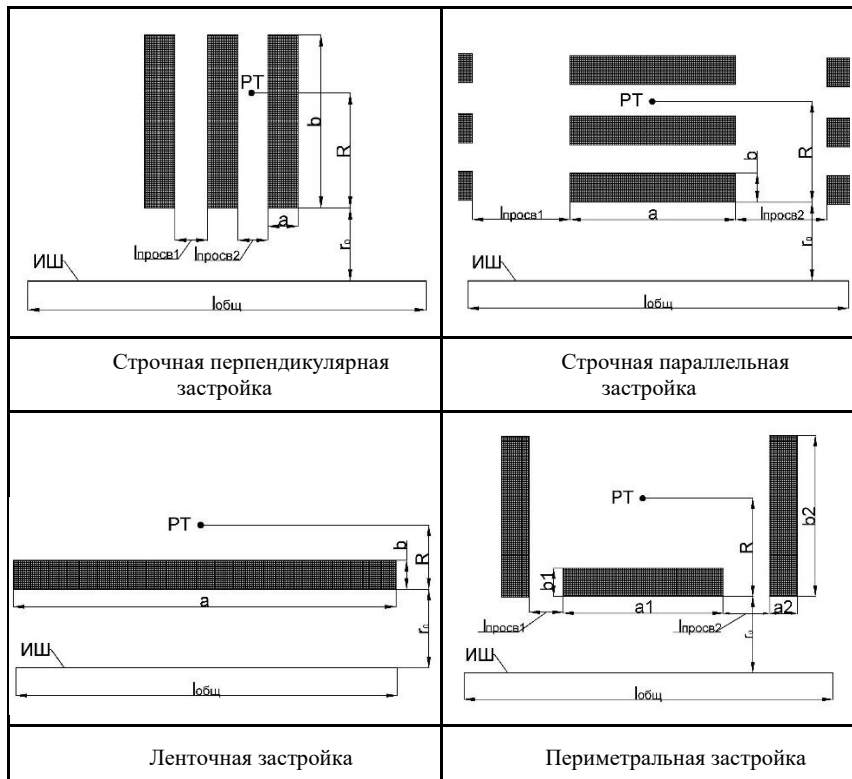


Рисунок 3 – Схемы расположения зданий в различных типах застройки

На рисунках 4 – 6 показаны графики зависимостей затуханий звука от параметров застройки.



Рисунок 4 – График зависимости затухания звука в застройке (ΔL) от ее плотности

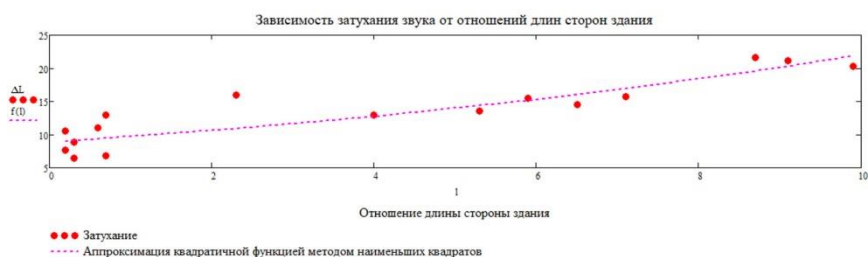


Рисунок 5 – График зависимости затухания звука в застройке (ΔL) от отношения длин сторон зданий



Рисунок 6 – График зависимости затухания звука в застройке (ΔL) от отношения длин проветров между домами к общей длине участка

По графику на рисунке 4 можно сделать вывод, что затухание звука не имеет ярко выраженной зависимости от плотности, и на него влияют другие параметры. Отношение длин сторон здания и отношение длины пролетов между домами к общей длине участка оказывают влияние на затухание звука, на что указывают зависимости на рисунках 5 и 6.

Аналогично были проанализированы результаты, полученные для сельской застройки. Среди параметров застройки были выделены: плотность застройки и отношение средней длины пролетов между домами к общей длине рассматриваемого участка.

На рисунках 7 – 8 показаны графики зависимостей затуханий звука от параметров застройки. Проанализировав графики можно прийти к выводу, что затухание звука в сельской застройке зависит от ее плотности и отношения средней длины пролетов между домами к общей длине рассматриваемого участка.

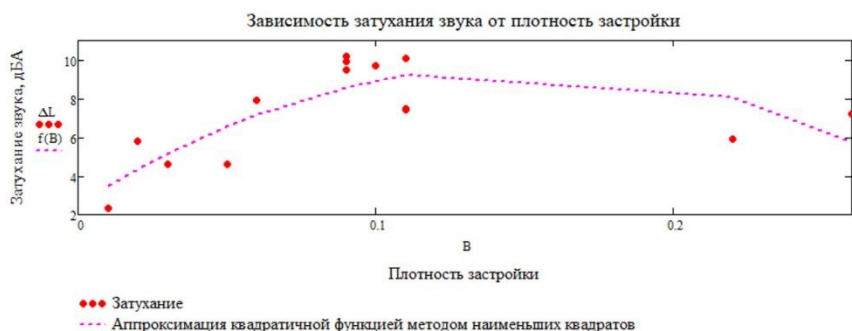


Рисунок 7 – График зависимости затухания звука в застройке (ΔL) от ее плотности



Рисунок 8 – График зависимости затухания звука в застройке (ΔL) от отношения средней длины пролетов между домами к общей длине участка

Среди всех рассмотренных выше параметров, влияющих на распространение звука в застройке, не рассматривался такой параметр как высота застройки. Различные типы

застройки многоэтажной, малоэтажно, сельской и т.д. можно представить, как ландшафты с различной шероховатостью. Параметр шероховатости (или уровень шероховатости) – z_0 – характеристика неровности подстилающей поверхности, которая влияет на движение воздуха в приземном слое. Кроме того, данный параметр может быть использован для оценки затухания звука. Выделяют три типа шероховатости для городской застройки – застройка высотой 3 – 5 этажей ($z_0=1-2$ м), 5 – 9 этажей ($z_0=2-4$ м), и свыше 9 этажей ($z_0=4$ м), сельская застройка – 1 – 2 этажа ($z_0=0,5-1$ м), также с точки зрения распространения звука можно выделить твердую поверхность и пористую поверхность (трава) ($z_0<0,02$ м).

Был проведен анализ зависимости затухания шума от шероховатости застройки, который показал наличие данной зависимости. Для застройки с шероховатостью 0,5 – 1 среднее значение затухания составляет 7 дБА, для 3 – 5 этажей ($z_0=1-2$ м) – 8 дБА, наибольшие значения затуханий были получены для шероховатости застройки 2 – 4 и составили 14,5 дБА. Дальнейшее увеличение этажности застройки не привело к большему снижению шума. Для учета шероховатости застройки при расчетах распространения шума была определена коррекция $K_{\text{выс}}$.

Предложенная формула для расчета снижения звука в застройке будет иметь вид:

$$\Delta L = C \lg \frac{R}{r_0} + K_{\text{выс}}, \quad (1)$$

где ΔL – снижение уровня звука в расчетной точке, дБА;

C – коэффициент, зависящий от параметров застройки;

R – ширина участка застройки, м;

r_0 – опорное расстояние, равное расстоянию от оси ближайшего пути до начала участка застройки, м;

$K_{\text{выс}}$ – коррекция на среднюю высоту застройки, дБА.

Поскольку данная формула применима только к застроенным участкам, то R здесь – это ширина участка, м, определяемая как расстояние от границы застройки до расчетной точки.

Для условий городской застройки:

Если $l \leq 2$ (периметральная и строчная перпендикулярная застройка):

$$C = 39,4 + 6,6l - 109,8p + 9,4lp - 0,0057l^2 + 113,2p^2, \quad (2)$$

Если $l > 2$ (строчная параллельная и линейная застройка):

$$C = 4,7 + 6,0l + 1262p - 6,0lp - 0,00019l^2 - 260,9p^2, \quad (3)$$

где l – соотношение длины и ширины зданий, определяемое по формуле:

$$l = a/b, \quad (4)$$

где a – средняя длина фасадов здания, обращенных к источнику шума (параллельных источнику шума), м;

b – средняя длина фасадов здания перпендикулярных источнику шума, м.

p – отношение длины просветов между зданиями к общей длине участка, определяемое по формуле:

$$p = l_{\text{просв}} / l_{\text{общ}}, \quad (5)$$

где $l_{\text{просв}}$ – длина просветов между зданиями, м;

$l_{\text{общ}}$ – длина рассматриваемого участка, м.

Для условий сельской застройки:

$$C = 29,9 - 99,5B - 60,7p + 829,9Bp - 28,2B^2 - 0,5p^2, \quad (6)$$

где B – плотность застройки;

p – отношение средней длины просветов между зданиями к общей длине участка.

$$B = S_{\text{застр}} / S_{\text{общ}}, \quad (7)$$

где $S_{\text{застр}}$ – площадь участков под домами, м²;

$S_{\text{общ}}$ – площадь рассматриваемого участка, м².

$$p = \bar{l}_{\text{просв}} / l_{\text{общ}}, \quad (8)$$

где $\bar{l}_{\text{просв}}$ – средняя длина просветов между зданиями, м;

$l_{\text{общ}}$ – длина рассматриваемого участка, м.

Коэффициенты в формулах для определения C (формулы 2, 3, 6) определялись методом наименьших квадратов.

Коррекция $K_{\text{выс}}$ определяется по формуле:

$$K_{\text{выс}} = 10^{(0,1 * z_0)}, \quad (9)$$

где z_0 – уровень шероховатости застройки, м.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований распространения шума железнодорожного транспорта в застройке.

В ходе исследования были проведены измерения шумовых характеристик железных дорог различных категорий. По результатам измерений была составлена классификация железных дорог по шумовым характеристикам, основанная на классификации ОАО «РЖД» в соответствии с «Методикой классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД» от 13.01.2020.

В таблице 1 представлена классификация железнодорожных линий с указанием эквивалентных уровней звука на расстоянии 25 м для каждого класса, разработанная по данным, полученным в ходе выполнения измерений.

Таблица 1 – Классификация железных дорог в соответствии с методикой ОАО «РЖД»

Годовая грузонапряже- нность (млн т- км брутто/км)	Класс железнодорожной линии при средней технической скорости движения поездов, км/ч, в числителе – пассажирские, в знаменателе – грузовые ($L_{\text{Аэкв25}}$, дБА)							
	>110	>77 и <110	>66 и <76	>55 и <65	>44 и <54	>33 и <43	>23 и <32	22 и менее
	>90	>77 и <90	>54 и <76	>49 и <53	>43 и <48	>33 и <42	>23 и <32	
Более 150	-	1 (>70 дБА)	1 (>70 дБА)	1 (>70 дБА)	1 (>70 дБА)	1 (>70 дБА)	1 (>70 дБА)	2 (>65 и <70 дБА)
81–150	-	1 (>70 дБА)	1 (>70 дБА)	1 (>65 и <70 дБА)	1 (>70 дБА)	2 (>70 дБА)	2 (>65 и <70 дБА)	3 (<65 дБА)
51–80	1 (>70 дБА)	1 (>70 дБА)	1 (>70 дБА)	1 (>65 и <70 дБА)	2 (>70 дБА)	2 (>70 дБА)	3 (>65 и <70 дБА)	4 (<65 дБА)
26–50	1 (>70 дБА)	1 (>65 и <70 дБА)	2 (>65 и <70 дБА)	2 (>65 и <70 дБА)	3 (>65 и <70 дБА)	3 (<65 дБА)	4 (>65 и <70 дБА)	4 (<65 дБА)
11–25	1 (>70 дБА)	1 (>65 и <70 дБА)	2 (>65 и <70 дБА)	3 (>65 и <70 дБА)	3 (>65 и <70 дБА)	4 (>65 и <70 дБА)	4 (>65 и <70 дБА)	5 (-)
6–10	1 (>70 дБА)	2 (>65 и <70 дБА)	3 (>65 и <70 дБА)	3 (>65 и <70 дБА)	4 (>65 и <70 дБА)	4 (>65 и <70 дБА)	5 (-*)	5 (-)
5 и менее	2 (>70 дБА)	2 (>65 и <70 дБА)	3 (>65 и <70 дБА)	4 (>65 и <70 дБА)	4 (>65 и <70 дБА)	5 (-)	5 (-)	5 (-)
Примечание: * - измерения уровней шума для железнодорожных линий 5-го класса не проводились.								

Величины затуханий звука, полученные экспериментальным путем, были использованы для проверки достоверности полученных в главе 3 формул. Также были проведены расчеты распространения шума по ГОСТ 33325-2015 – для участков городской и сельской застройки. На рисунке 9 представлен график затуханий звука полученных различными способами для городской застройки. На рисунке 10 представлен график затуханий звука полученных различными способами для сельской застройки.

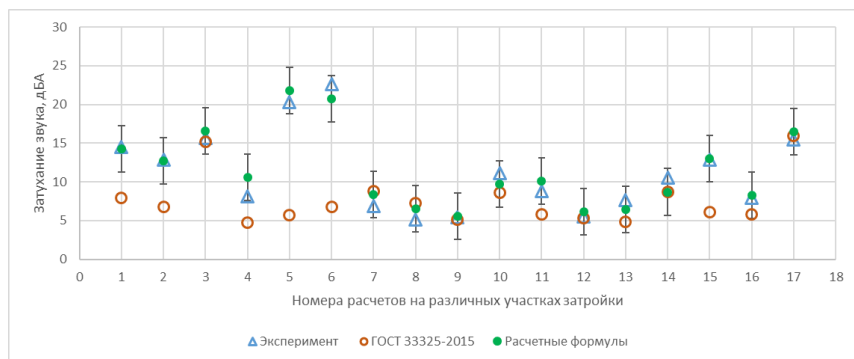


Рисунок 9 – График затуханий звука, полученных различными способами для городской застройки

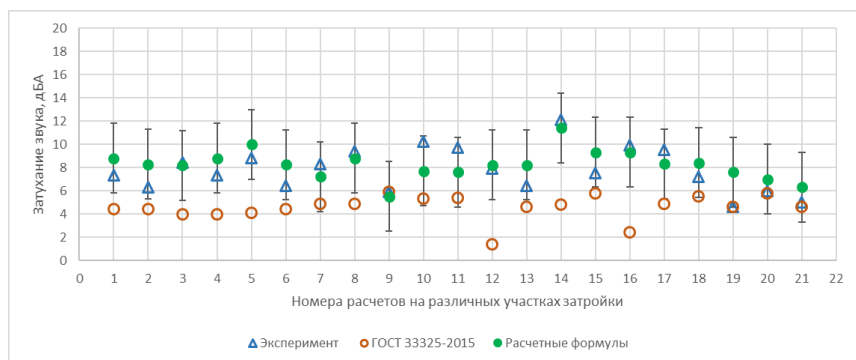


Рисунок 10 – График затуханий звука, полученных различными способами для сельской застройки

Проанализировав результаты расчетов и график на рисунках 9 и 10, можно сделать вывод, что разница результатов, полученных по расчетным формулам главы 3 с результатами эксперимента не превышает 3 дБА, что можно считать хорошей сходимостью. При этом разница значений, полученных по ГОСТ 33325-2015 и

экспериментально во многих случаях превышает 3 дБА, что говорит о том, что точность предложенных формул выше чем точность существующих расчетных методик.

В главе 5 представлены разработанные методические указания по выбору шумозащитных мероприятий, методические указания по размещению нормируемых объектов вблизи железных дорог и также апробация результатов исследования.

В основе методических указаний по выбору шумозащитных мероприятий лежит разделение различных видов застройки на четыре типа: сельская застройка, городская многоэтажная застройка, городская среднеэтажная застройка, застройка расположенная ближе 50 м к железной дороге. В таблице 2 представлен перечень мероприятий, рекомендуемых для каждого типа застройки.

Таблица 2 – Мероприятия, обеспечивающие требуемое снижение шума

Таблица 2 – Мероприятия, обеспечивающие требуемое снижение шума												
№ п/п	Область принятия решения	Рекомендуемые мероприятия										
		шумозащитные зеленые насаждения	земляные грунтовые валы	шумозащитные экраны	шумозащитные галереи	шумозащитное остекление	накладки на шейку рельса	малые шумозащитные экраны	ограничение скорости движения	шумозащитные выемки *	подбалластные маты *	бесстыковой путь *
1	Среднеэтажная городская застройка	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
2	Садоводческие товарищества, малые жилые массивы	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+
3	Многоэтажная застройка	+	+	+	+	+	+	±	+	-	+	+
4	Близко расположенная застройка (до 50 м)	-	+	+	+	+	+	±	+	+	+	+
Примечание: * – данные мероприятия требуют капитального ремонта пути.												

При расширении территории для нового строительства вблизи железных дорог целесообразно подбирать типовые шумозащитные мероприятия в зависимости от типа застройки, ее удаленности от путей и категории путей, также следует размещать объекты строительства таким образом, чтобы в первом эшелоне застройки не располагались здания, к которым применяются наиболее жесткие нормы по шуму. Территория застройки вблизи железной дороги была разделена на 6 зон по степени удаленности от путей. Категории объектов застройки выбирались в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21. Необходимый перечень шумозащитных мероприятий для тех или иных объектов

определялся исходя из прогнозируемых превышений предельно допустимых уровней шума в данной зоне. В таблице 3 представлен фрагмент таблицы с вариантами расположения застройки на территории, прилегающей к железной дороге и типовые шумозащитные мероприятия.

Таблица 3 – Варианты расположения застройки на территории, прилегающей к железной дороге и типовые шумозащитные мероприятия (фрагмент)

Категория путей	Расстояние до объекта	Технические постройки, паркинги, складские помещения	Бизнес-центры	Магазины	Кафе, рестораны	Гостиницы	Жилые дома	Образовательные объекты
Скоростная (80 дБА)	0 – 25	+	1 (не ниже В)	3	1	-	-	-
	25 – 50	+	1	+	1	1 + 2	1 + 2 + 3	1 + 2 + 3
	50 – 100	+	1	+	+	1 + 2	1 + 2	1 / 2
	100 – 200	+	+	+	+	1 / 2	1 + 2	2 / 4
	200 – 400	+	+	+	+	1 / 2	1 + 2	3
	>400	+	+	+	+	+	+	+
Примечание: – Размещение объекта не допускается 1. Шумозащитное остекление (класс звукоизоляции не ниже В) 2. Шумозащитные экраны 3. Шлифование рельсов 4. Шумозащитные зеленые насаждения								

Основные выводы и результаты

В результате теоретических и экспериментальных исследований решена задача акустики, в частности разработана методика расчета затухания звука в типовых массивах городской и сельской застройки, что позволило достичь цели исследования и повысить точность расчетов затухания звука при распространении в условиях жилой застройки. В рамках решения научной проблемы получены следующие результаты:

1. Выделены четыре типовых массива жилых зданий для городской застройки: строчная параллельная, строчная перпендикулярная, периметральная и ленточная. К отдельной группе отнесена сельская застройка.
2. Определены параметры, от которых зависит затухание звука в застройке. Для городской застройки такими параметрами являются: отношение длин сторон зданий и отношение длины пролетов между домами к общей длине рассматриваемого участка, для сельской застройки такими параметрами являются: плотность застройки и отношение

средней длины просветов между домами к общей длине рассматриваемого участка. Найдена зависимость затухания звука от параметра шероховатости застройки.

3. Разработана методика экспериментальной оценки затухания звука в условиях застройки. Измерения шума на территории жилой застройки проводилось по методике измерений ГОСТ 23337-2014, синхронно в четырех точках. Точки измерений располагались на расстоянии 25, 50, 100 и 200 м от оси ближайшего железнодорожного пути. По возможности, все четыре измерительных микрофона располагались на одной линии, перпендикулярной железнодорожным путям. Затухание звука определялось как разность между значениями, полученными в точках измерения, расположенных на разных расстояниях.

4. Выполнены экспериментальные исследования затухания звука в условиях застройки. Эксперименты проводились на участках с различными типами городской и сельской застройки, прилегающих к железной дороге. Выполнены измерения шумовой характеристики потоков поездов на железнодорожных линиях различных категорий.

5. Разработаны расчетные схемы для определения затухания звука в условиях застройки. Выделено пять вариантов застройки в зависимости от расположения зданий по отношению к источнику шума: 1) периметральная; 2) строчная перпендикулярная застройка; 3) строчная параллельная; 4) линейная застройка; 5) сельская застройка.

6. Получены формулы для расчета затухания шума железнодорожного транспорта в условиях застройки для различных ее типов. Определены эмпирические коэффициенты связывающие параметры застройки: отношение длин сторон зданий и отношение длины просветов между домами к общей длине рассматриваемого участка для городской застройки; и плотность застройки и отношение средней длины просветов между домами к общей длине рассматриваемого участка для сельской застройки. Введена коррекция $K_{\text{выс}}$ на высоту застройки, зависящая от шероховатости застройки z_0 , для определения затухания звука в застройке (высота застройки 1 – 2 этажа ($z_0 = 1$) $K_{\text{выс}} = 1,3$; 3 – 5 этажей ($z_0 = 1,5$) $K_{\text{выс}} = 1,5$; более 5 этажей ($z_0 = 3$) $K_{\text{выс}} = 2$). Выполнены сравнительные расчеты затуханий звука в застройке, рассчитанных по формулам, полученным автором, рассчитанным по ГОСТ 33325-2015 и полученным экспериментальным путем. Сходимость результатов расчета по формулам автора с результатами эксперимента составила ± 3 дБА, что является хорошей сходимостью. Разница результатов расчета по ГОСТ 33325-2015 с результатами эксперимента превышает 3 дБА для большинства расчетов, что говорит о том, что формулы, предложенные автором, являются более точными.

7. На основании экспериментальных данных по измерениям шумовых характеристик потоков поездов составлена классификация железных дорог по их шумовым характеристикам основанная на «Методике классификации и специализации

железнодорожных линий ОАО «РЖД» от 13.01.2020. Каждый класс железной дороги в зависимости от грузонапряженности и средней технической скорости движения поездов был отнесен к одной из 3 групп шумовых характеристик (более 70 дБА, от 70 до 65 дБА, и менее 65 дБА). Данная классификация позволяет узнавать приблизительное значение шумовой характеристики (эквивалентного уровня звука) железнодорожной линии определенной категории, что может помочь при принятии решения о размещении новых объектов вблизи железной дороги и необходимости применения шумозащитных мероприятий.

8. Разработаны рекомендации по выбору шумозащитных мероприятий для конкретного типа застройки. Данная методика позволяет выбрать необходимые и достаточные шумозащитные мероприятия исходя из высоты, плотности и близости к железной дороге защищаемых объектов.

9. Разработаны рекомендации по размещению нормируемых объектов вблизи железных дорог. Данные методические указания позволят подбирать типовые шумозащитные мероприятия в зависимости от типа застройки, ее удаленности от путей и категории путей, а также размещать объекты строительства таким образом, чтобы в первом эшелоне застройки не располагались здания, к которым применяются наиболее жесткие нормы по шуму. Территория застройки вблизи железной дороги была разделена на 6 зон, категории объектов застройки выбирались в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21. Необходимый перечень шумозащитных мероприятий определялся исходя из прогнозируемых превышений предельно допустимых уровней шума в данной зоне.

10. По результатам выполненных исследований разработаны «Методические указания по выбору шумозащитных мероприятий при выявлении сверхнормативного акустического воздействия от объектов железнодорожного транспорта» (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.10.2022 № 2638/р). Предлагаемые в работе подходы к разработке шумозащитных мероприятий были использованы АО «Дальгипротранс» при разработке раздела «Мероприятия по охране окружающей среды» проектной документации по объекту «Третий путь на перегоне Хабаровск I – Хабаровск II Дальневосточной железной дороги». Результаты исследования также используются ООО «Институт Виброакустических Систем» при разработке проектов по оценке шума железнодорожного транспорта и разработке шумозащитных мероприятий.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования:

Расширить область внедрения результатов диссертационного исследования на защиту от шума автотранспорта, авиационного транспорта, объектов промышленности и т.д. Разработать формулы для расчета затухания шума автомобильного транспорта в жилой застройке.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Васильева А.В. Расчет затухания шума железнодорожного транспорта в условиях жилой городской застройки / А.В. Васильева, Л.Э. Забалканская, М.В. Буторина, А.П. Васильев // *Noise Theory and Practice*. – 2024. – Т. 10, № 4 – С. 49-58.
2. Васильева А.В. Расчет затухания шума железнодорожного транспорта в условиях сельской застройки / А.В. Васильева, Л.Э. Забалканская, М.В. Буторина, А.П. Васильев // *Noise Theory and Practice*. – 2024. – Т. 10, № 4 – С. 59-68.
3. Васильева А.В. Зависимость снижения шума железнодорожного транспорта в городской застройке от ее параметров / А.В. Васильева // *Noise Theory and Practice*. – 2024. – Т. 10, № 3(10). – С. 60-68.
4. Шабарова А.В. Рекомендации по выбору шумозащитных мероприятий для защиты от шума железной дороги / А.В. Шабарова, С.С. Борцова, М.В. Буторина, С.А. Кондратьев // *Noise Theory and Practice*. – 2023. – Т. 9, № 4(35). – С. 39-50.
5. Шабарова А.В. Сравнение методов расчета распространения шума железнодорожного транспорта в различных типах застройки / А.В. Шабарова, М.В. Буторина, Д.А. Куклин // *Noise Theory and Practice*. – 2022. – Т. 8, № 3(30). – С. 16-33.
6. Шабарова А.В. Риск-ориентированный подход к оценке шума железнодорожного транспорта / М.В. Буторина, Д.А. Куклин, А.П. Васильев, А.В. Шабарова // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2019. – № 1(73). – С. 28-33.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.:

7. Shabarova A. Noise Zoning of the City Using Noise Mapping / M. Butorina, A. Shabarova, D. Kuklin // *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2020, St. Petersburg and Moscow, 27–30 января 2020 года*. – St. Petersburg and Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 1495-1497.
8. Shabarova A. Engineering geometrical acoustic method for higher-order diffraction of sound in building / M. Butorina, A. Shabarova, V. Sannikov, A. V. Osetrov // *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, Saint Petersburg - Moscow, 28–30 января 2019 года*. – Saint

Petersburg - Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 1266-1270.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

9. Шабарова А.В. Снижение шума железнодорожного транспорта в различных типах жилой застройки / А.В. Шабарова, М.В. Буторина // Акустика среды обитания: IX всероссийская конференция молодых ученых и специалистов, Москва, 23-24 мая 2024 года. – Москва: МГТУ им. Баумана, 2024. – С. 408-414.

10. Шабарова А.В. Формирование акустического комфорта в различных типах городской застройки / А.В. Шабарова, М.В. Буторина // Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: Материалы XIV Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Томск, 12–14 марта 2024 года. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – С. 465-472.

11. Шабарова А.В. Выбор мероприятий для защиты от железнодорожного шума в городской и сельской застройке / А.А. Воронова, А.В. Шабарова, М.В. Буторина // Защита от повышенного шума и вибрации: сборник трудов конференции IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 26–28 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Институт акустических конструкций, 2023. – С. 272-279.

12. Шабарова А.В. Проблема разделения вкладов источников транспортного шума в условиях городской застройки для разработки шумозащитных мероприятий / В.В. Черняк, А.В. Шабарова, А.П. Васильев // Молодежь. Техника. Космос: Труды четырнадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 23–27 мая 2022 года. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2022. – С. 44-49.

13. Шабарова А.В. Особенности нормирования шума транспорта в Российской Федерации / М.В. Буторина, Д.А. Куклин, А.В. Шабарова, А.П. Васильев // Защита от повышенного шума и вибрации: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 23–25 марта 2021 года / Под редакцией Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: Институт акустических конструкций, 2021. – С. 60-67.

14. Шабарова А.В. Инженерный метод геометрической акустики для оценки дифракций высокого порядка в застройке / М.В. Буторина, Д.А. Куклин, А.В. Шабарова // Защита от повышенного шума и вибрации: Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19–21 марта 2019 года / Под ред. Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью "Институт акустических конструкций", 2019. – С. 465-475.

15. Шабарова А.В. Оценка общего эффекта дорожного и железнодорожного шума и разработка мероприятий по его снижению / Д.А. Куклин, Л.Ф. Дроздова, А.В. Шабарова // Защита от повышенного шума и вибрации: Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19–21 марта 2019 года / Под ред. Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью "Институт акустических конструкций", 2019. – С. 517-524.

16. Шабарова А.В. Оценка шума железнодорожного транспорта как фактора риска здоровью населения / А.П. Васильев, А.В. Шабарова, М.В. Буторина, Д. А. Куклин // Молодежь. Техника. Космос: труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 18–20 апреля 2018 года. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2018. – С. 319-324.

Издательство Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ»

им. Д. Ф. Устинова. 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1.

Подписано в печать 14.01.2025. Формат 60х90/16. Бумага документная.

Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 8.

Отпечатано в типографии БГТУ.

190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1