

На правах рукописи



ВАСИЛЬЕВ ВАДИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО
АКТУАЛИЗАЦИИ МЕТОДИК РАСЧЕТА ШУМА
АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ**

1.3.7 – Акустика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», на кафедре «Экология и производственная безопасность».

Научный руководитель:

Шашурин Александр Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология и производственная безопасность»

Официальные
оппоненты:

Элькин Юрий Иосифович

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
(МАДИ)», г. Москва

Иголкин Александр Алексеевич

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Автоматические системы
энергетических установок», ФГАОУ ВО
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П.Королева», г.
Самара

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Донской государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

Защита состоится 07.12.2023 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.2.272.01 (Д.212.010.01) в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

Автореферат разослан «_____» октября 2023 г.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул. д. 1, кафедра «Экология и производственная безопасность», e-mail: dissovetvoenmeh@yandex.ru

И.о. учёного секретаря
диссертационного совета
24.2.272.01



Патрушева Т.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Шум является широко распространенным фактором загрязнения окружающей среды, который отрицательно влияет на здоровье и благополучие населения. Хотя источниками акустического воздействия являются многие виды человеческой деятельности, наиболее распространенными источниками являются транспортные средства, включающие автомобильный, железнодорожный и авиационный.

В результате шум, создаваемый транспортом, считается второй по значимости экологической проблемой для здоровья населения в Европе и стоит после загрязнения воздуха мелкодисперсными твердыми частицами.

По данным Всемирной организации здравоохранения, длительное воздействие повышенных уровней шума повышает риск негативных физиологических и психологических последствий для здоровья человека. К ним относятся сердечно-сосудистые и метаболические эффекты, когнитивные нарушения у детей, а также повышенная раздражительность и нарушение сна. Учитывая долгосрочные прогнозы быстрого роста городов, в связи с продолжающейся миграцией населения из сельских поселений и малых городов в более крупные, и, соответственно, увеличение количества транспорта, числа жителей и плотности населения в населенных пунктах, можно ожидать ещё большего увеличения степени воздействия шума и связанных с ним неблагоприятных последствий.

По данным многочисленных исследований в городах от 60 до 70% населения подвергаются воздействию шума автотранспортного потока – основного источника акустического загрязнения.

Уровни звука от автомобильного потока у фасадов жилых зданий могут достигать значений более 60-70 дБА, что превышает установленные допустимые значения более чем на 20 дБА, для ночного времени суток.

Вопросам снижения шума автомобильного транспорта и оценки ожидаемых уровней от них занимались такие известные отечественные ученые: М.В. Буторина, А.В. Васильев, Н.И. Иванов, Г.Л. Осипов, П.И. Поспелов, Н.В. Тюрина, А.Е. Шашурин, И.Л. Шубин и др. За рубежом над данной проблемой работали: К. Аттенборо, У. Ингард, М. Дж. Крокер, З. Маекава, Т. Россинг, И. Рудник и др.

Практические решения по оценке ожидаемого акустического воздействия от автотранспортного потока широко представлены в литературе и действующей нормативно-технической документации, при этом в данных решениях нередко отсутствует обоснованный подход к определению акустического центра автотранспортного потока и не в полной мере учитывается влияние материала и угла падения для подстилающей поверхности и фасада.

Целью работы является разработка научно обоснованного подхода и рекомендаций по актуализации методик расчета шума автотранспортных потоков.

Объект исследования: звуковое поле от автотранспортного потока над проезжей частью, на примагистральной территории и на территории прилегающей к фасадам.

Предмет исследования: процесс физической картины распределения звукового поля над проезжей частью автомобильной дороги, на примагистральной территории и на территории прилегающей к фасадам.

Задачи исследования:

1. Создание научно обоснованного подхода к определению акустического центра автотранспортного потока, учитывающего распределение звукового поля над проезжей частью;

2. Разработка аналитической зависимости расположения акустического центра в зависимости от общей характеристики автотранспортного потока, что позволит при отсутствии сведений о распределении потока по полосам, конкретизировать выбор акустического центра;

3. Создание на основе развития теории волновой акустики научно обоснованной методологии расчета звукового поля от автотранспортного потока на примагистральной территории и на территории, прилегающей к фасадам;

4. Выполнение экспериментальных и теоретических исследований влияния подстилающей поверхности на ожидаемые уровни звука на примагистральной территории и территории, прилегающей к фасадам;

5. Выполнение апробации предложенных расчетных методик;

6. Разработка рекомендаций по дополнениям в нормативно-техническую документацию.

Научная новизна

В результате выполненных теоретических исследований предложены:

1. На основании сведений о неравномерном распределении автотранспортного потока по полосам движения, с использованием аксиом и теорем статики разработана, новая теоретическая модель определения акустического центра автотранспортного потока, учитывающая распределение звукового поля над проезжей частью, что позволяет уточнить шумовую характеристику автотранспортного потока и улучшить качество оценки его воздействия;

2. Получена аналитическая зависимость расположения акустического центра в зависимости от характеристики автотранспортного потока;

3. На основе развития теории волновой акустики предложена математическая модель формирования звукового поля от автотранспортного потока различной конфигурации на примагистральной территории и на территории, прилегающей к фасаду, что позволяет увеличить точность расчета ожидаемых уровней шума от автотранспортного потока.

Практическая значимость (полезность).

1. Разработан подход к определению акустического центра автотранспортного потока, с использованием аксиом и теорем статики;

2. Разработана методика экспериментальных исследований для оценки распределения звукового поля над проезжей частью автомобильной дороги;

3. Описан алгоритм аппроксимации линейного источника на серию эквивалентных точечных, и доказана возможность его применения;

4. Разработана научно обоснованная методология расчета звукового поля от автотранспортного потока, на основе развития теории волновой акустики:

– на примагистральной территории;

– на территории, прилегающей к фасадам.

5. Исследованы закономерности снижения шума над подстилающей поверхностью по высоте, на различных расстояниях, согласно предложенным методикам;

6. Определено влияние отраженного от фасада звука на акустическое поле прилегающей территории.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика определения акустического центра автотранспортного потока;

2. Классификация расположения акустического центра в зависимости от характеристики автотранспортного потока:

3. Расчетная и математическая модель распространения акустического поля, основанная на представлении о теории волновой акустики, излучаемого автотранспортным потоком;

4. Разработанные на основе этой модели:

– методика расчета шума от автотранспортного потока на примагистральной территории;

– методика расчета шума на территории от автотранспортного потока, прилегающей к фасаду зданий.

5. Результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния подстилающей поверхности и фасада на ожидаемые уровни звука;

6. Рекомендации по дополнению нормативно-технической документации.

Достоверность разработанных решений подтверждена в ходе натурных исследований, выполненных при использовании высокоточной измерительной акустической аппаратуры по действующим методикам акустических исследований, включающих методы оценки результатов и погрешности измерений.

Внедрение результатов работы:

Основные результаты исследований, приведённые в работе, нашли свое применение:

– при разработке ООО «ТЕХНОПРОЕКТ» перспективного модуля для программного комплекса АРМ Акустика 3;

– в работе АО «Институт «Гранэкопроект» при разработке проектной документации в части оценки акустического воздействия;

– в работе ООО «Институт «Гипроникель» при оценке акустического воздействия от автотранспортных потоков в рамках разработки документации.

Апробация работы:

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: X Общероссийская научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос», 18–20 апреля 2018 г. Санкт-Петербург; Третья Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания», 18 мая 2018 г. Москва; VII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», 21–23 марта 2019 г. Санкт-Петербург; VIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», 23–25 марта 2021 г. Санкт-Петербург; IX Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», 26–28 апреля 2023 г. Санкт-Петербург.

Публикации:

По материалам диссертации опубликовано 10 работ; в том числе 5 в перечне журналов ВАК.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 163 наименований; пяти приложений; изложена на 187 страницах; содержит 25 таблиц и 54 рисунков.

Содержание работы:

Во введении показана актуальность работы, указаны цель и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан анализ состояния проблемы шума автотранспортного потока, обоснованы основные направления и задачи исследования.

Проведено сравнение измеренных и расчётных значений для шумовой характеристики автотранспортного потока, выявлено значительное расхождение расчётных значений с измеренными. Наибольшую сходимость с экспериментальными исследованиями показали две методики, но даже они дают завышенные уровни и расхождение с натурными измерениями до 8-10 дБА.

В работе указано, что действующие методики базируются на статистической модели, разработанной в середине 80-х годов, последняя актуализация которой была

проведена в середине 90-х годов, соответственно существующие расчетные формулы требуют актуализации последние 20 лет.

Проведена оценка изменения шумности согласно требованиям к базовым моделям автотранспорта. Так как средний возраст автомобилей в России по данным АВТОСТАТА составляет 13,1 год. В среднем отличие шумности базовых моделей за 20 лет изменилось до 5-6 дБА, что не в полной мере отражает расхождение в расчетных и измеренных уровнях.

Обосновано предположение, что на шумовую характеристику, в немалой степени, оказывает влияние положение акустического центра автотранспортного потока и отсутствие учёта распределения транспорта по полосам движения на многополосных магистралях.

Проведен анализ действующих методик оценки звукового поля, образуемого от автотранспортного потока на примагистральной территории и территории, прилегающей к фасаду, на основе действующей НТД, расхождение составило 4-6 дБА, это объясняется тем, что оценка влияния подстилающей поверхности реализована только в зоне приёмника и источника, что не позволяет в полной мере учесть влияние поверхностей на всей траектории распространения шума; оценка отражения от поверхности не учитывает угол падения волны, что не позволяет в полной мере учесть изменение коэффициента звукоотражения и не в полной мере учитывает особенности отражения звука на различных частотах для различных поверхностей, что вносит значительные погрешности в результаты расчета.

Для решения проблемы оценки распространения акустической волны с учётом подстилающей поверхности выбран подход к определению коэффициента отражения от «локально реагирующей» подстилающей поверхности в зависимости от угла падения. Данный параметр позволил учитывать изменение фазы, а также амплитуды при отражении звуковой волны падающей под углом в зависимости от характеристики подстилающей поверхности.

В работе обосновано использование методики расчета отражения звука от границы с нормальным сопротивлением, в которой пренебрегается распространением во второй среде (случай локальной реакции).

В различных литературных источниках представлены результаты сравнения подходов к прогнозированию избыточного затухания из-за учёта импеданса воздушной среды и без него. Было обнаружено, что во всех случаях результаты находятся в близком согласии, максимальная найденная разница составляет примерно 0,3 дБ.

Показано, что для оценки коэффициента отражения необходимо учитывать акустическую характеристику подстилающей поверхности. Достаточным акустическим показателем является комплексное поверхностное нормальное сопротивление, которое зависит от частоты. Существует множество методов измерения поверхностного нормального импеданса для различных типов покрытий. В простейшей из этих моделей, называемой моделью Делани-Базли-Микки, используется один параметр, названный эффективным сопротивлением потока (σ_e).

Учёт звукопоглощения атмосферой в работе производится согласно подходу, разработанному коллективом ученых Басс, Сандерленд и Зукервар, аналогичный подходу из ГОСТ 31295.1.

Проведя анализ действующих подходов к оценке ожидаемых уровней от автотранспортного потока, было выделено две основные проблемы: оценка непосредственно шумовой характеристики автотранспортного потока и оценка ожидаемых уровней на примагистральной территории и территории, прилегающей к фасаду.

Во второй главе представлены теоретические основы решения задачи определения акустического центра автотранспортного потока, учитывающие распределение звукового поля над проезжей частью, что позволяет уточнить шумовую характеристику автотранспортного потока и увеличить точность оценки его воздействия. Решение разработано на основании методики по определению точки сосредоточения силы, используемой в аксиомах и теоремах статики. Для этого рассмотрен переход от распределённой нагрузки, в нашем случае звукового поля к сосредоточенной силе, в нашем случае акустическому центру.

При этом приняты следующие допущения:

– шум от каждой из полос движения возможно оценить независимо друг от друга;

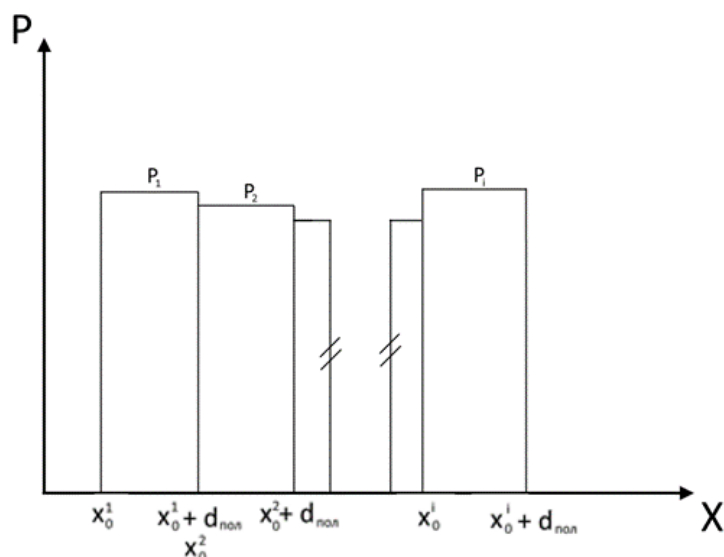
– распределение шума над дорожным полотном принимается для каждой из полос, в виде условной прямоугольной фигуры с высотой равной уровню звука (или звукового давления) и шириной равной полосе движения;

– шум распределен вдоль каждой полосы движения равномерно для всего участка движения автотранспорта;

– высота источника шума автотранспортного потока неизменна;

– влияние различных изменяющихся параметров автотранспортного потока на суммарную характеристику пропорционально сохраняется несмотря на изменение шумности отдельных автотранспортных средств в потоке.

Для решения поставленной задачи была разработана следующая расчетная схема (Рисунок 1).



где, X_0^i - расстояние от края дороги до начала полосы движения; $d_{пол}$ - ширина полосы движения; P_i – среднеквадратичное значение звукового давления от полосы движения, $P_{\text{а}}$

Рисунок 1 – Расчетная схема центра тяжести (акустического центра) над проезжей частью

В результате ряда преобразований была получена формула для определения акустического центра автотранспортного потока, учитывающая распределение акустического поля по каждой из полос движения, а также их ширину:

$$X_{\text{АЦ}} = \frac{\sum_{i=1}^n ((P_i(x_0^i + d_{\text{пол}})^2 - x_0^{i2})/2)}{d_{\text{пол}} \sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

где n – число полос движения

P_i – среднеквадратичное значение звукового давления от полосы движения, Па

$$(P_i = P_0 10^{\frac{L_i}{20}});$$

L_i - уровень звука (уровень звукового давления) для i -ой полосы движения, дБ (дБА);

$P_0 = 2 * 10^{-5}$, Па – нулевой порог слышимости.

x_0^i - расстояние от края дороги до начала полосы движения, м;

$d_{пол}$ - ширина полосы движения, м.

Сделан вывод, что полученная расчетная методика может быть использована в нормативно-технической документации по оценке воздействия автотранспортного шума, с целью конкретизации условий выбора акустического центра автотранспортного потока и увеличения точности расчетов, с учётом влияния распределения и характеристик движения автотранспортного потока по полосам движения. Методика применима, как к результатам натуральных измерений, так и в комбинации с существующими расчетными методиками.

Для определения аналитической зависимости расположения акустического центра, был проведен анализ результатов мониторинга характеристик автотранспортного потока предоставленных ФКУ УПРДОР «Северо-Запад» (федеральное дорожное агентство) для дорог общего пользования федерального значения и С-Пб ГБУ «Центр транспортного планирования» (правительство Санкт-Петербурга) для городских дорог.

Учёт реального распределения потока по полосам и использование предложенной формулы позволило определить осредненный акустический центр для автодорог с учётом их характеристик и характеристик автотранспортного потока. При отсутствии полного перечня данных, позволяющего проводить расчет по предложенной методике, допустимо использование осредненных показателей.

Результаты расчета смещения акустического центра для дорог общего пользования федерального значения с шириной полосы 3,75м, были сведены в единую таблицу с целью дальнейшей классификации и использования в инженерных расчетах.

Таблица 1 – Пример сводной таблицы смещения акустического центра для дорог общего пользования федерального значения для трех полос движения на проезжую часть

Кол-во полос на проезжую часть	Интенсивность, авт./ч.	Доля грузовых автомобилей в составе потока	Смещение акустического центра
3	до 100	более 20 %	4,7
		до 19 %	4,8
	101-200	более 20 %	4,6
		до 19 %	4,8
	201-300	более 20 %	4,8
		5-19 %	4,7
		20-34 %	5
		До 19 %	5
	401-500	более 20 %	5,3
		до 19 %	5,1
	501-750	более 20 %	5,5
		до 19 %	5,2
	751-1000	более 20 %	4,8
		до 19 %	5,3
	1001-1500	более 20 %	4,6
		до 19 %	5,3
	1501-2000	более 20 %	7,4
		до 19 %	5,3
	2001-2500	-	5,5
	более 2501	-	5,7

По результатам расчетов был сформулирован следующий вывод: с увеличением количества грузового автотранспорта в потоке акустический центр смещается ближе к крайней полосе движения, при этом смещение акустического центра относительно оси крайней полосы движения составляет: для двух полос на проезжую часть от 0,2 до 2,0 м; для трех полос на проезжую часть от 2,7 до 5,5 м; для четырех полос на проезжую часть от 4,9 до 6,4 м.

Проведена оценка влияния смещения акустического центра для федеральных дорог на характеристику, определяемую в точке, расположенной на расстоянии 7,5 м от ближайшей оси движения: для двух полос на проезжую часть до 2 дБА; для трех полос на проезжую часть до 3 дБА; для четырех полос на проезжую часть до 4 дБА.

С учётом влияния снижения шумности транспортных средств, подтверждённой согласно отличиям к требованиям допустимых уровней шумности базовых моделей автотранспорта, приведенных в ГОСТ 27436-87 и ГОСТ Р 41.51-04, и влияния

положения акустического центра автотранспортного потока, учитывающего распределение транспорта по полосам на многополосных магистралях, сделан вывод, что совокупное влияние составит в среднем до 10 дБА, что соответствует расхождениям результатов расчетов и натурных измерений.

Сделан вывод, о равномерном распределении потока и доли грузового автотранспорта по полосам движения городских дорог. Соответственно, акустический центр для участка автодороги, на который не оказывают влияние пересечения автодорог, расположен на середине проезжей части.

Проведена оценка влияния смещения акустического центра для городских дорог на характеристику, определяемую в точке, расположенной на расстоянии 7,5 м от ближайшей оси движения: для двух полос на проезжую часть до 5 дБА; для трех полос на проезжую часть до 7 дБА; для четырех полос на проезжую часть до 8 дБА.

В третьей главе приведены теоретические основы решения задачи оценки акустического поля на примагистральной территории и территории, прилегающей к фасадам.

При этом приняты следующие допущения:

- линейный источник шума аппроксимируется как серия эквивалентных точечных источников;
- расчет снижения звукового поля оценивается от точечного источника шума;
- расхождения звуковой волны от источника, расположенного над импедансной поверхностью, происходит в бесконечность, согласно условию излучения Зоммерфельда;
- для ограниченной среды применяется метод мнимых источников.

Дано обоснование необходимости разбиения линейного источника шума на серию эквивалентных точечных, что позволит учитывать криволинейность и ограниченность протяженности дорог в городских условиях.

В работе рассмотрена методика деления линейного источника шума на сегменты, определение конфигурации сегментов и распределение звуковой мощности сегментов для задания точечных источников шума.

Для решения задачи разбиения линейного источника, на серию эквивалентных точечных, принят критерий перехода сферической волны в цилиндрическую, согласно которому сегменты разбиения определяются согласно формуле:

$$\Delta L_i = \frac{H_i}{\pi} \quad (2)$$

где ΔL – размер сегмента, м;

H_i – расстояние от ближайшего i -ого источника шума до расчетной точки, м;

i – номер сегмента деления.

С учётом критерия разбиения линейного источника шума методика сегментации, используемая в модели, имеет следующий вид:

- строится перпендикуляр от расчетной точки к линейному источнику шума;
- определяется длина данного перпендикуляра;
- используя полученную длину, определяется протяженность центрального сегмента;
- последующая протяженность сегментов определяется, как отношение к длине прямой к крайней точке соседнего сегмента;
- для линейных источников конечной протяженности крайние сегменты определяются согласно следующему критерию:
 - если несегментированная часть имеет размер менее $2 \cdot \Delta L$, то данный несегментированный участок делится на две равноценные части;
 - для случая, если общая протяженность линейного источника менее получаемой ΔL , данный источник задается, как единый сегмент.

На рисунке 3 приведен пример разделения линейного источника на серию эквивалентных точечных. Как видно из рисунка, разделение линейного источника на серию эквивалентных точечных позволяет учитывать сложную геометрию автодороги и выбирать любое расположение расчетных точек.

Описана методика определения акустической характеристики точечного источника при переходе от линейного.

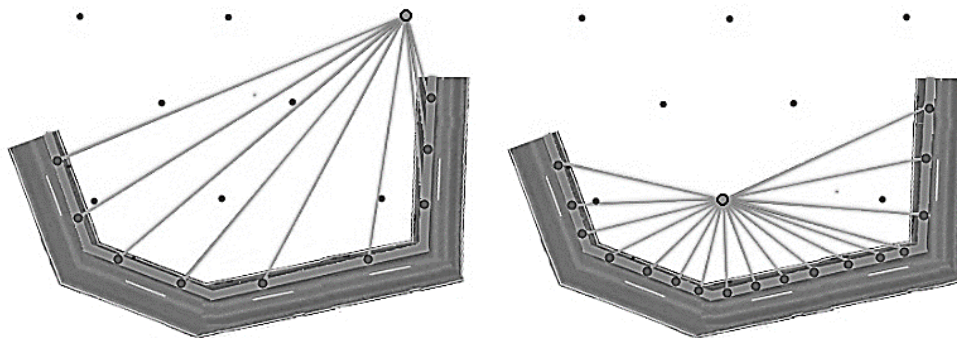
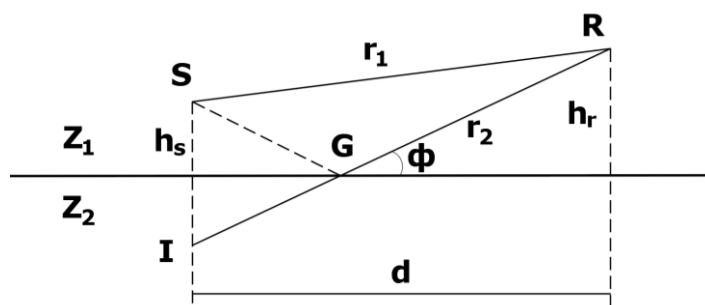


Рисунок 2 – Пример разделения линейного источника на серию эквивалентных точечных

Для оценки ожидаемых уровней звука на примагистральной территории и на территории, прилегающей к фасадам, предложена математическая модель формирования звукового поля от автотранспортного потока различной конфигурации на основе развития теории волновой акустики.

Для расчета ожидаемых уровней звука на примагистральной территории использовалась расчетная схема, представленная на рисунке 4. Имеются точечный источник S , приемник R и мнимый источник I . В расчете в верхней части учитывается воздушная среда с акустическим импедансом Z_1 , в нижней части подстилающая поверхность с акустическим импедансом Z_2 .



ϕ – угол падения волны к поверхности

Z_1 – акустический импеданс воздушной среды

Z_2 – акустический импеданс поверхности.

Рисунок 3 - Схема отражения звука от плоской поверхности с импедансом Z_2

В работе приведен вывод формул, где в результате получены значения для амплитуды давления p в точке R выраженной в следующей виде:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{e^{ik_1r_1}}{r_1} + R_p \frac{e^{ik_1r_2}}{r_2} \quad (3)$$

где p_0 – амплитуда давления на единице расстояния от точечного источника S при отсутствии поверхности земли

k_1 – волновое число воздушной среды;

r_1 – расстояние от источника шума до приемника;

r_2 – расстояние от мнимого источника до приемника;

R_p – коэффициент отражения от подстилающей поверхности, зависящий от угла падения.

Из выражения (3) сформирована формула, рекомендуемая для инженерных расчетов при оценке распространения звука от автотранспортных потоков на примагистральной территории:

$$L_{dec} = 20 \log(A_{div} + A_{grad}) \quad (4)$$

где $A_{div} = \frac{e^{ik_1r_1}}{r_1}$

$$A_{grad} = R_p \frac{e^{ik_1r_2}}{r_2}$$

Для оценки ожидаемых уровней звука у фасада, необходимо учитывать звуковую энергию, отражённую от самого здания. Для этого предлагаемая выше методика была дополнена показателями, оценивающими отражение звука от поверхности фасада.

В этом случае рассматривалось два мнимых источника, зеркально отраженных относительно фасада здания, первый источник будет отражением непосредственно источника шума (S'), второй отражением источника отражения от земли (I').

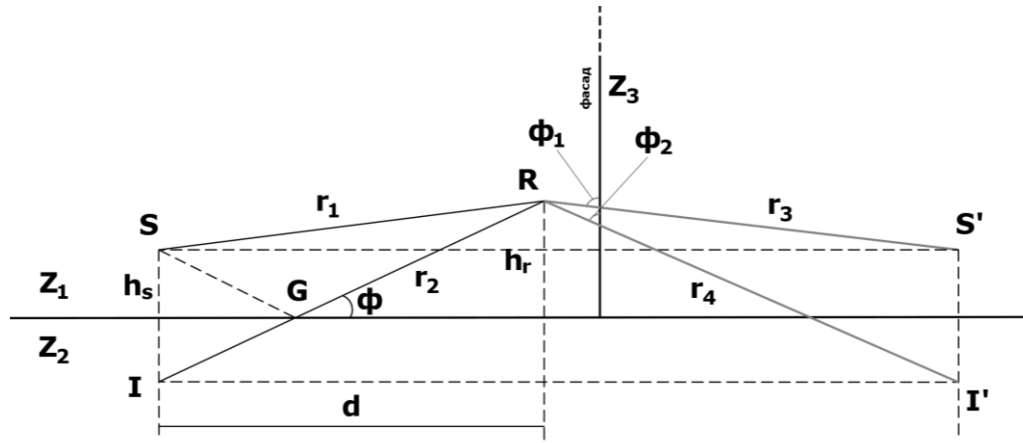


Рисунок 4 - Схема отражения звука от фасада здания

Для учёта отражения от фасада были введены дополнительные показатели, учитывающие характеристику отражения от фасада R_{pbld_S} и R_{pbld_I} , в этом случае формула (3) примет следующий вид:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{e^{ik_1 r_1}}{r_1} + R_p \frac{e^{ik_1 r_2}}{r_2} + R_{pbld_S} \frac{e^{ik_1 r_3}}{r_3} + R_p R_{pbld_I} \frac{e^{ik_1 r_4}}{r_4} \quad (5)$$

где $R_{pbld_S} = \frac{\sin \phi_1 - \frac{Z_1}{Z_3}}{\sin \phi_1 + \frac{Z_1}{Z_3}}$ – коэффициент отражения от фасада здания мнимого источника шума S’;

$R_{pbld_I} = \frac{\sin \phi_2 - \frac{Z_1}{Z_3}}{\sin \phi_2 + \frac{Z_1}{Z_3}}$ – коэффициент отражения от фасада здания мнимого источника шума I’;

r_3 – расстояние от мнимого источника шума S’ до приемника;

r_4 – расстояние от мнимого источника I’ до приемника;

Z_3 – акустический импеданс поверхности фасада.

В итоге получена следующая формула в логарифмическом виде для оценки акустического поля у фасада многоэтажного здания:

$$L_{dec} = 20 \log(A_{div} + A_{grd} + A_{div_{bld}} + A_{grd_{bld}}) \quad (6)$$

где

$$A_{div_{bld}} = R_{pbld_S} \frac{e^{ik_1 r_3}}{r_3}$$

$$A_{grd_{bld}} = R_p R_{pbld_I} \frac{e^{ik_1 r_4}}{r_4}$$

В четвертой главе изложена методика экспериментальных исследований определения шумовой характеристики автомобильных дорог различных категорий.

Была разработана методика экспериментальных исследований для оценки распределения звукового поля над проезжей частью и оценки ожидаемых уровней на примагистральной территории и территории, прилегающей к фасаду. Для оценки распределения акустического поля над дорожным полотном были произведены измерения непосредственно над каждой из полос движения.

Измерения проводились на прямых участках движения автотранспорта со стабилизировавшейся скоростью движения потока, по каждой из полос движения, на удалении более 300 м от пересечений автодорог, развязок, съездов и остановочных пунктов. Участки поверхности дорожного полотна были чистыми и сухими.

Оценивался характерный для автотранспортного потока, как непостоянного источника шума, эквивалентный уровень звука, дБА. Измерения проводились в период отсутствия атмосферных осадков, тумана и скорости ветра менее 5 м/с. Во время проведения натурных измерений ось микрофона была сориентирована в сторону потока транспорта и расположена перпендикулярно полотну дороги.

В целях предотвращения отражения и экранирования звука оператором расстояние от микрофона до оператора составляло не менее 0,5 м, при этом также предотвращалось нахождение любых объектов между источником шума и микрофоном.

При проведении измерений оценивалось фоновое влияние на шумовую характеристику соседних полос движения. При последующей обработке фоновые уровни исключались, для получения шумовой характеристики непосредственно измеряемой полосы.

Измерения проводились шумомерами 1-го класса точности, имеющими свидетельства о поверке, калибровка средств измерения проводилась до и после каждой серии измерений.

В период измерений параллельно с акустической характеристикой фиксировались показатели, характеризующие автотранспортный поток, включающие: интенсивность движения, состав потока, скоростной режим.

Для экспериментальных исследований были выбраны несколько участков городских дорог и федеральных дорог общего пользования.

Приведена стандартная методика обработки результатов измерений. Обработка результатов измерений производилась по стандартной методике, точность составила $\pm 1,5$ дБА.

В пятой главе приведена апробация результатов расчета по методике определения ожидаемых уровней шума на примагистральной территории и на территории, прилегающей к фасаду, а также методики расчета распределения звукового поля над проезжей частью.

Для проверки точности предложенной методики расчета звукового поля над проезжей частью, были проведены натурные измерения: на 4 городских и 5 федеральных дорогах, числом полос от 2 до 4 на проезжую часть

Данные, полученные по результатам натурных измерений, подтвердили равномерность распределения потока и доли грузового автотранспорта по полосам движения городских дорог и неравномерность для дорог федерального уровня, с отклонением от методики определения акустического центра автотранспортного потока не более чем на 0,2 м.

Учёт реального распределения потока по полосам и использование предложенной формулы позволило определить осредненный акустический центр для автодорог с учётом её характеристики и характеристик автотранспортного потока. При отсутствии полного перечня данных, позволяющего проводить расчет по предложенной методике, допустимо использование осредненных показателей.

В главе также представлены рекомендации по дополнению следующей нормативно-технической документации, методикой, представленной в третьей главе, описывающей подход к определению акустического центра автотранспортного потока:

– СП 276.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков

– ОДМ 218.2.013-2011 Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам

Также нормативно-техническая документация, для случая отсутствия полного перечня данных, может быть дополнена аналитической зависимостью расположения

акустического центра на основании осредненных показателей, полученных по результатам анализа результатов мониторинга характеристик автотранспортного потока предоставленных ФКУ УПРДОР «Северо-Запад» (федеральное дорожное агентство) для дорог общего пользования федерального значения и С-Пб ГБУ «Центр транспортного планирования» (правительство Санкт-Петербурга) для городских дорог.

Для проверки сходимости предложенной методики расчета ожидаемых уровней шума на примагистральной территории, с методом конечных элементов, был произведен расчет для точечного источника с учётом подстилающей поверхности для примагистральной территории. Расчет производился в треть октавных полосах частот, для трех типов покрытия трава, снег и бетон, на расстоянии 15 м от источника шума.

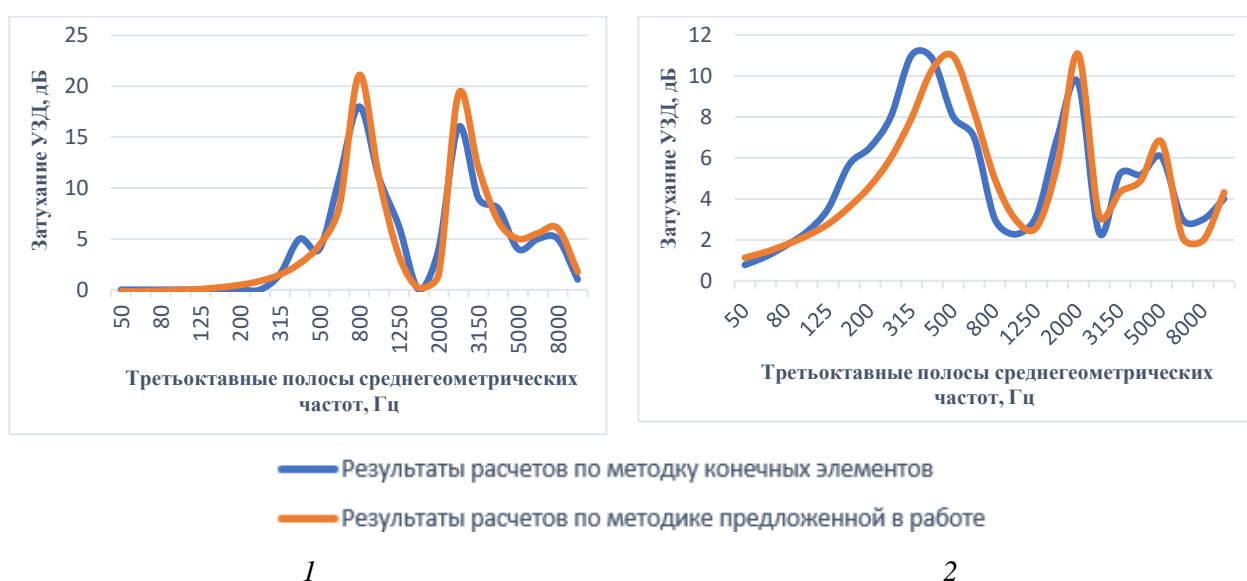


Рисунок 5— Пример сравнения результатов расчетов по предложенной методике и методике конечных элементов для примагистральной территории (15 метров, 1 - бетонное покрытие, 2 -травяное покрытие)

По результатам расчетов сделан вывод, что значения, получаемые по предложенной методике и методу конечных элементов показали хорошую сходимость для травяного, снежного и бетонного покрытия, с максимальным расхождением ± 3 дБ на треть октавную полосу частот, а в среднем расхождение составило ± 1 дБ.

Полученные результаты подтвердили хорошую сходимость предложенной методики с результатами расчетов по методу конечных элементов, при этом предложенная методика менее трудоёмкая и ресурсозатратная.

Был проведен анализ осредненных результатов серии измерений, подводимых на территории, прилегающей к фасаду многоэтажного здания высотой 50 метров

(16 этаже), расположенном на расстоянии 40 м, с травяным подстилающим покрытием, и сравнение их с результатами полученным по расчетной методике, предложенной в третьей главе. Результаты представлены на рисунке 6.

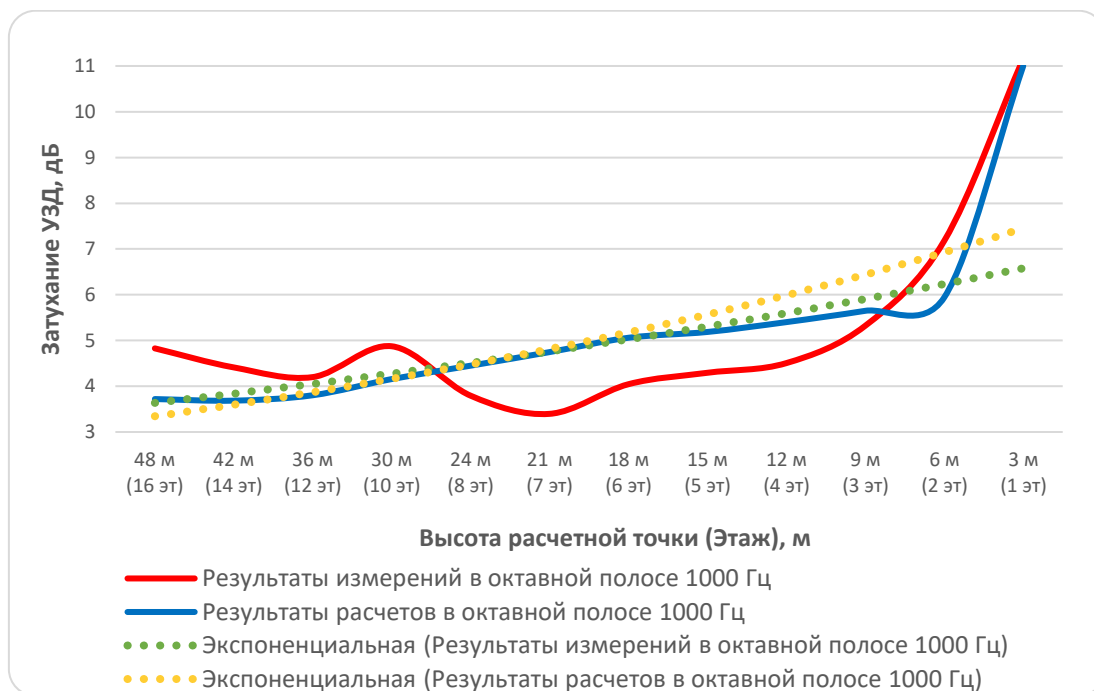


Рисунок 6 – Пример сравнения результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 1000 Гц

По результатам анализа, сделан вывод, о сходимости результатов, как в отношении экспоненциального тренда, так и в отношении сходимости пиков интерференции, как в октавной полосе 1000 Гц, так и в остальном частотном диапазоне от 31,5 до 8000 Гц. При этом результаты расчетов по всем октавным полосам частот показали сходимость с результатами измерений $\pm 2-3$ дБ, по уровням звука сходимость составила до ± 2 дБА.

При этом по результатам расчетов по ГОСТ 31295.05 с учётом влияния фасада, с коэффициентом звукопоглощения 0, и подстилающей поверхности, с коэффициентом звукопоглощения равном 1, при остальных аналогичных условиях, показывает расхождение с результатами измерений на низких частотах ± 7 дБ, на частотах выше 2000 Гц расхождение с результатами измерений уменьшается $\pm 3-5$ дБ, при этом сохраняется серьезное расхождение на нижних этажах.

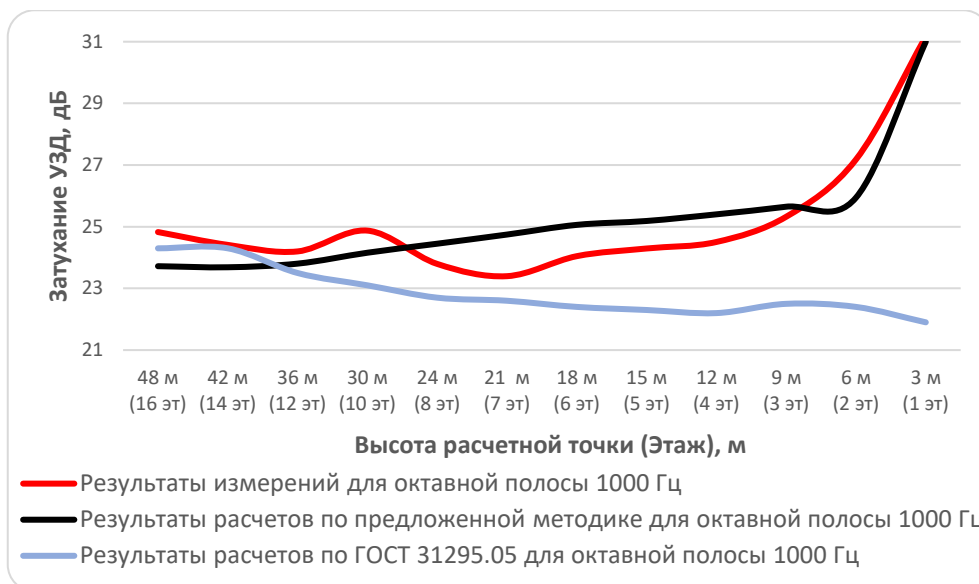


Рисунок 7 – Сравнение результатов расчетов по предложенной методике, результатов измерений и результатов расчета по ГОСТ 31295.05 для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 1000 Гц

Сделан вывод, что предложенная в работе методика позволяет с большей точностью учесть влияние подстилающей поверхности и отраженного звукового поля от фасада на ожидаемые уровни звука на территории, прилегающей к фасаду, во всех октавных полосах частот от 31,5 до 8000 Гц, с увеличением точности на верхних этажах ± 2 дБА, на нижних ± 8 дБА.

В работе представлены рекомендации по дополнению действующей нормативно-технической документации. Рекомендовано применение формулы для расчета акустического центра и (или) предложенной классификации расположения акустического центра в зависимости от характеристики автотранспортного потока.

Внедрение предложенной методики позволит приблизить расчетные модели шума автотранспортного потока к зафиксированным значениям натуральных измерений и дать более точную оценку воздействия автотранспортного потока и эффективности проектируемых шумозащитных конструкций, располагаемых на примагистральной территории.

Данная методика может быть дополнением следующей нормативно-технической документации:

– СП 276.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков

– ОДМ 218.2.013-2011 Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам

Также нормативно-техническая документация, для случая отсутствия полного перечня данных, может быть дополнена аналитической зависимостью расположения акустического центра на основании осредненных показателей, полученных по результатам анализа данных мониторинга характеристик автотранспортного потока.

Рекомендуется при корректировке и разработке нормативно-технической документации учитывать показатели, учитываемые в формулах, приведённых в третьей главе.

Основные вывод и результаты:

1. Основным источником повышенного воздействия на нормируемых территориях является шум транспортного потока, из которого особенно выделяется автомобильный транспорт, воздействие от которого особенно явно для территории городской застройки.

2. Разработана методика определения акустического центра автотранспортного потока, учитывающая распределение звукового поля по каждой из полос движения, а также их ширину.

Предложенный подход, может быть использован в нормативно-технической документации по оценке воздействия автотранспортного шума, с целью конкретизации условий выбора акустического центра автотранспортного потока и увеличения точности расчетов.

Методика применима, как к результатам натурных измерений, так и в комбинации с существующими расчетными методиками.

3. Сформирована классификация расположения акустического центра в зависимости от характеристики автотранспортного потока, на основании результатов мониторинга характеристик автотранспортного потока предоставленных ФКУ УПРДОР «Северо-Запад» (федеральное дорожное агентство) для дорог общего пользования федерального значения и С-Пб ГБУ «Центр транспортного планирования» (правительство Санкт-Петербурга) для городских дорог.

При отсутствии полного перечня данных, позволяющего проводить расчет по предложенной методике, допустимо использование осредненных показателей из классификатора.

4. Предложенная методика позволит приблизить расчетные модели шума автотранспортного потока к зафиксированным значениям и дать более точную оценку воздействия автотранспортного потока и эффективности проектируемых шумозащитных конструкций, располагаемых у автодорог. Это свидетельствует о том что с учётом снижения влияния шумности транспортных средств, подтверждённых согласно отличиям к требованиям допустимых уровней шумности базовых моделей автотранспорта, приведенных в ГОСТ 27436-87 и ГОСТ Р 41.51-04, и влияния положения акустического центра автотранспортного потока, учитывающего распределение транспорта по полосам на многополосных магистралях, совокупное влияние составит в среднем до 10 дБА, что соответствует расхождениям результатов расчетов и натурных измерений.

5. Описана методика разбиения линейного источника шума на серию эквивалентных точечных источников, что позволяет учитывать криволинейность и ограниченность протяженности дорог в городских условиях.

6. Разработана и апробирована математическая модель формирования звукового поля от автотранспортного потока различной конфигурации, на основе развития теории волновой акустики, для оценки ожидаемых уровней звука на примамгистральной территории и на территории, прилегающей к фасадам.

7. Разработана методика экспериментальных исследований для оценки распределения звуковой энергии над проезжей частью и на территории, прилегающей к фасаду.

8. Выполнена апробация результатов натурных измерений, с результатами теоретических исследований:

- для определения акустического центра автотранспортного потока;
- для ожидаемых уровней звука от автотранспортного потока на примамгистральной территории и территории, прилегающей к фасаду;

9. Разработаны рекомендации по актуализации нормативно-технической документации по расчету шума автотранспортных потоков.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Содержание диссертации соответствует направлению специальности п.3: Физическая акустика. Физические процессы, характеризующие распространение акустических волн. Скорость распространения, дисперсия и затухание упругих волн, их связь с параметрами различных типов сред и п.10: Акустические шумы и вибрации, паспорта научной специальности 1.3.7 Акустика. Проведенные исследования соответствуют формуле специальности.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Васильев В.А. Выбор шумозащитного остекления при проектировании линейных объектов в условиях многоэтажной жилой застройки / В.В. Светлов, В.А. Васильев // NOISE Theory and Practice. Scientific Journal. – Vol.2 No.4 ISSN 2412-8627 - IV 2016 – с. 29-34
2. Васильев В.А. Сравнение уровней шума, полученных расчётным путем и в результате натурных измерений на примере автомобильных дорог / В.А. Васильев // МОЛОДЕЖЬ. ТЕХНИКА. КОСМОС Труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции. Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ» №50» 2018 – с. 325-328
3. Васильев В.А. Сравнение шумовых характеристик автотранспортных потоков, полученных расчётным путем и в результате натурных измерений / В.А. Васильев // АКУСТИКА СРЕДЫ ОБИТАНИЯ, Сборник трудов Третьей Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. Под редакцией А.И. Комкина. 2018 – с. 54-59
4. Васильев В.А. Улучшенный способ акустического проектирования шумозащитных экранов для линейных объектов / В.В. Светлов, В.А. Васильев // ЗАЩИТА ОТ ПОВЫШЕННОГО ШУМА И ВИБРАЦИИ Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под ред. Н.И. Иванова. Санкт-Петербург, 2019 – с. 625-629
5. *Васильев В.А. / Шум автомобильного транспорта / В.А. Васильев, В.К. Ксенофонтова // NOISE Theory and Practice. Scientific Journal. – Vol.6 No.1 ISSN 2412-8627 - I 2020 – с. 66-76
6. *Храпко Н.Н. / Улучшения в нормативно-правовой базе, как способ повышения эффективности защиты от шума/ Н.Н. Храпко, С.Д. Ломовцева, В.А. Васильев, Ж.П. Разаков // NOISE Theory and Practice. Scientific Journal. – Vol.7 No.2 ISSN 2412-8627 - I 2021 – с. 111-122

7. *Васильев В.А. / Звуковое поле над проезжей частью, формируемое движением автотранспорта/ В.А. Васильев // NOISE Theory and Practice. Scientific Journal. – Vol.7 No.5 ISSN 2412-8627 - I 2021 – с. 25-32
8. *Васильев В.А. / Проблема выбора акустического центра автотранспортного потока/ В.А. Васильев // NOISE Theory and Practice. Scientific Journal. – Vol.8 No.3 ISSN 2412-8627 - I 2022 – с. 34-42
9. Шашурин А.Е. / Подходы к нормированию шума в Европе и России / А.Е. Шашурин, В.А. Васильев, В.К. Васильева // ЗАЩИТА ОТ ПОВЫШЕННОГО ШУМА И ВИБРАЦИИ Сборник докладов IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под ред. Н.И. Иванова. Санкт-Петербург, 2023 – с. 47-52
10. *Шашурин А.Е. / Методика оценки акустического поля от автотранспортного потока / А.Е. Шашурин, В.А. Васильев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки – Выпуск 8, ISSN 2071-6168 – 2023 – с. 601-611.

*По списку ВАК

Издательство Балтийского государственного технического университета
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1.
Формат 60x90/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии БГТУ.
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1.