

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова



На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ ВАДИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

1.3.7 – Акустика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, профессор
Шашурин Александр Евгеньевич

Санкт-Петербург
2023

Оглавление

Введение.....	6
Глава 1. Состояние проблемы и задачи исследования.	11
1.1 Актуальность проблемы повышенного шума.....	11
1.1.1 Оценка воздействия повышенного шума.....	11
1.1.2 Оценка проблемы акустического воздействия в России	16
1.1.3 Влияние шума на здоровье	17
1.1.4 Оценка воздействия на здоровье.....	18
1.2 Нормирование шума.....	20
1.2.1 Нормируемые параметры в Европе	20
1.2.2 Руководящие принципы ВОЗ по шуму для Европы.	22
1.2.3 Нормируемые параметры на территории Российской Федерации... ..	23
1.2.4 Сравнение нормируемых параметров на территории Российской Федерации и Европы	26
1.3 Проблема автотранспортного шума.....	27
1.4 Анализ существующих результатов измерений автомобильного шума	29
1.5 Вопрос определения шумовой характеристики автотранспортного потока	30
1.5.1 Расчёт по СП 276.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков».....	31
1.5.2 Расчёт по ОДМ 218.2.013-2011 «Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам»	35
1.5.3 Расчёт по методике Осипова Г.Л. «Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика»	37
1.5.4 Расчёт по методике Поспелова П.И. «Борьба с шумом на автомобильных дорогах»	40
1.5.5 Расчёт по методике Мининой Н.Н.	41
1.5.6 Сравнение результатов расчёта по различным методикам	42
1.5.7 Вопрос изменения шумности автотранспортного потока в зависимости от характеристики единичного транспортного средства	46

1.6 Проблема выбора акустического центра автотранспортного потока.....	48
1.7 Проблема оценки звукового поля образующегося от автотранспортного потока	50
1.8 Анализ действующей нормативной документации и литературы.....	51
1.8.1 Сравнение действующих расчётных методик	53
1.9 Распространение звука вблизи земли	55
1.9.1 Определение коэффициента отражения от поверхности	56
1.9.2 Оценка акустических свойств поглощающих материалов.....	58
1.9.3 Определение поглощения звука пористыми материалами	59
1.9.4 Оценка импеданса поверхности	60
1.10 Снижение звука за счет поглощения атмосферным воздухом.....	62
1.11 Постановка задач исследования	65
Глава 2. Теоретические основы методики расчета акустического центра автотранспортного потока.....	66
2.1 Методика определения акустического центра автотранспортного потока	66
2.2 Распределение автотранспортного потока по полосам движения.....	71
2.3 Распределение потока для дорог общего пользования федерального значения	71
2.4 Распределение потока для городских дорог	79
2.5 Распределение звуковой энергии потока для дорог общего пользования федерального значения.....	81
2.6 Распределение звуковой энергии потока для городских дорог	86
Выводы по главе.....	87
Глава 3. Теоретические основы разработки методики оценки акустического поля на примагистральной территории и территории прилегающей к фасадам	89
3.1 Общие положения	89
3.2 Принципы деления линейного источника шума на серию точечных и определение их шумовой характеристики	90
3.2.1 Описание методики разбиения линейного источника на серию точечных	90
3.2.2 Описание методики определения УЗМ	93

3.3 Расчет распространения звуковой волны в воздушной среде.....	94
3.3.1 Сферические волны, прямые и отраженные	95
3.3.2 Функция распространения сферической волны	95
3.3.3 Определение ожидаемых уровней звука на примагистральной территории	102
3.3.4 Определение ожидаемых уровней звука на территории прилегающей к фасаду	104
Выводы по главе.....	105
Глава 4. Методические основы проведения экспериментальных исследований	107
4.1 Измерения шумовых характеристик потоков автомобильного транспорта.....	107
4.2 Измерения шума на примагистральной территории и у территории прилегающей к фасаду	109
4.3 Измерения шума над проезжей частью	114
4.4 Измерительная аппаратура	119
4.5 Обработка результатов измерений.....	120
Выводы по главе.....	122
Глава 5. Апробация результатов расчетных методик и рекомендации для дополнения нормативно-технической документации.....	123
5.1 Апробация измерений и расчетной методики распределения звукового поля над проезжей частью	123
5.1.1 Результаты апробации результатов измерений и расчетной методики	124
5.2 Апробация результатов расчета методики расчета ожидаемых уровней шума на примагистральной территории и на территории прилегающей к фасаду	126
5.2.1 Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и методу конечных элементов	126
5.2.2 Сравнение результатов расчёта и измерений влияния подстилающей поверхности на ожидаемые уровни на примагистральной территории .	128
5.2.3 Сравнение результатов расчёта и измерений на территории прилегающей к фасаду	135

5.3 Рекомендации для дополнения нормативно-технической документации	143
5.3.1 Дополнение нормативно-технической документации методикой определения акустического центра автотранспортного потока	143
5.3.2 Дополнение нормативно-технической документации методикой определения акустического поля на территории прилегающей к фасаду	145
Выводы по главе.....	147
Заключение	150
Список литературы	154
Приложение А. Сравнение шумовых характеристик автотранспортного потока	173
Приложение Б. Оценка расположения акустического центра в зависимости от общей характеристики автотранспортного потока.....	174
Приложение В Оценка расположения акустического центра по результатам натуральных измерений	179
Приложение Г. Оценка затухания звукового поля по результатам расчетов и натуральных измерений	183
Приложение Д. Акты внедрения	185

Введение

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 транспорт.

В результате, шум, создаваемый транспортом, считается второй по значимости экологической проблемой для здоровья населения в Европе и стоит после загрязнения воздуха мелкодисперсными твердыми частицами. [1]

По данным Всемирной организации здравоохранения (далее - ВОЗ), длительное воздействие повышенных уровней шума повышает риск негативных физиологических и психологических последствий для здоровья человека.[2] 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.[2]

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, как: 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.

Научная новизна

В результате выполненных теоретических исследований:

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 шум 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.

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 «Транэкопроект» 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.

На защиту выносятся:

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.

Структура и объем работы:

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

Автор приносит благодарность своим коллегам – сотрудникам кафедры «Экология и производственная безопасность» Балтийского государственного технического университета им. Д.Ф. Устинова, научному руководителю доктору технических наук Шашурину А.Е., научным консультантам Иванову Н.И. и Светлову В.В., за неоценимую помощь при подготовке в написании диссертации, а также начальникам испытательных лабораторий Фиеву К.П. (ООО «Авеста») и Васильеву А.П. (БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова), за предоставленное испытательное оборудование.

Глава 1. Состояние проблемы и задачи исследования

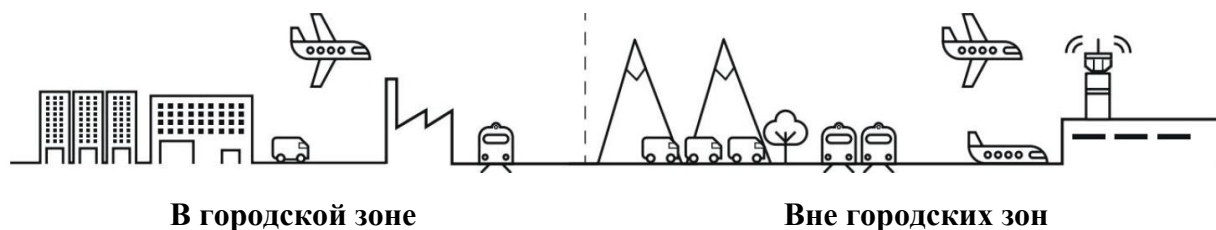
1.1 Актуальность проблемы повышенного шума

1.1.1 Оценка воздействия повышенного шума

На территории Российской Федерации не проводится в достаточной степени подробная оценка акустического воздействия повышенного шума от автотранспортного потока на изменение здоровья населения. Для понимания этих влияний в работе используются результаты глобального европейского исследования «Экологический шум в Европе» 2020 года [4] (далее – ЭШЕ), реализуемое в рамках исполнения директивы «Директива по шуму окружающей среды 2002/49 / ЕС» [5] (далее – ДШОС).

Этот отчет представляет собой всесторонний обзор и анализ шума окружающей среды в Европе и сосредоточен на данных, официально представленных 33 странами-членами Европейского агентства по окружающей среде (далее - ЕАОС), за исключением Турции. Данные, представленные в первую очередь в виде карт-шума.

Данные отчета ЭШЕ охватывают следующие источники шума: дороги с интенсивностью движения более 3 000 000 автомобилей в год, железные дороги с движением более 30 000 подвижных составов в год и аэропорты с более 50 000 взлетами/посадками в год, а также все дороги, железные дороги, аэропорты и предприятия в городских районах с населением более 100 000 человек. В целом, ДШОС от 2017 охватывает все источники дорожного, железнодорожного, авиационного и промышленного шума для 511 городских районов на территории Европы, 420 791 км основных дорог, 49 729 км основных железных дорог и 89 крупных аэропортов (Рисунок 1.1).



В городской зоне
 Авто- и железные дороги, аэропорты и промышленные предприятия в границах урбанизированных территорий, с населением более 100 000 человек или иной плотности, если при данном населении государство принимает их урбанизированными

Вне городских зон
 Автодороги (более 3 000 000 проездов/год)
 Железные дороги (более 30 000 проездов/год)
 Аэропорты (более 50 000 рейсов/год)

Рисунок 1.1– Зона действия ДШОС

Результаты, представленные в отчете ЭШЕ, в основном сосредоточены на количестве людей, подвергающихся воздействию уровней шума выше 55 дБА, в течение периода день-вечер-ночь, а также уровня шума в ночное время выше 50 дБА, далее по тексту эти уровни также упоминаются как «высокие уровни шума».

Следует отметить, что для получения данных, представленных в отчете ЭШЕ, страны использовали широкий спектр методов расчета и подходов при разработке карты шума. К примеру, в отношении автотранспорта используются следующие методики: RVS 4.02.11 [7]; NMPB-Routes-96: NMPB-Routes-2008 [8]; RMW 2002 (SRM II) [9]; CNOSSOS-EU 2015 [10]; sonROAD18 [11]; Nord2000 [12]; CRTN [16]; ASJ RTN-Model 2008[4]; SKM2[4], данные нормативные документы и руководства включают в себя методики определения шумовой характеристики автотранспортного потока, некоторые из них представляют более широкий спектр информации, о шуме автотранспорта, также часть методик включает в себя методики оценки затухания звука. Таким образом, результаты по разным странам или годам, полученные с помощью разных методов прогнозирования, могут быть не полностью сопоставимы и в отчете ЭШЕ были интерпретированы с осторожностью.

В рассматриваемом отчете ЭШЕ есть диаграммы с информацией по отдельным странам и городам. Однако вместо того, чтобы сравнивать данные о воздействии на население в разных странах и городах, в работе данная информация интерпретировалась с целью иллюстрации возможных причин наблюдаемой изменчивости в состоянии здоровья и оценки глобальности проблемы повышенного шума от транспорта.

Согласно результатам отчета ЭШЕ, общее число людей, подвергающихся воздействию шума выше 55 дБА, от шума автотранспортного потока оценивается в 113 миллионов человек, от шума железнодорожного транспорта 22 миллиона, от шума авиации 4 миллиона и менее 1 миллиона из-за шума, вызванного деятельностью промышленных предприятий.

По результатам рассмотрения отчета ЭШЕ, можно сделать вывод, что не менее 15-20% от общего числа населения подвергаются воздействию повышенных уровней шума непосредственно от автотранспортных потоков. И эти значения, вероятно, занижены, учитывая, что ДШОС не охватывает полностью все городские районы и все дороги в Европе. Однако трудно оценить общее число граждан, подвергающихся воздействию высоких уровней шума от всех источников, поскольку некоторые лица могут подвергаться воздействию комбинации источников, и, таким образом, простое суммирование приведет к двойному учету.

В таблице 1.1 представлена количественная оценка населения, подвергающегося воздействию повышенных уровней шума, охваченных отчетом ЭШЕ.

Таблица 1.1 – Количественная оценка населения, подвергающегося воздействию повышенных уровней шума

Район оценки	Тип транспортных средств	Количество людей, подвергающихся воздействию $L_{den} \geq 55$ дБА, млн. чл.		Количество людей, подвергающихся воздействию $L_{night} \geq 50$ дБА, млн. чл.	
		отчетные	оценочный	отчетные	оценочный
В городских районах	Автотранспорт	50,6	81,7	33,8	57,5
	Железнодорожное	7,9	10,7	6,0	8,1
	Авиационное	2,2	3,1	0,6	0,9
	Промышленность	0,3	0,8	0,2	0,4
Вне городских районов	Автотранспорт	21,8	31,1	14,2	21,1
	Железнодорожное	10,4	10,9	8,7	9,0
	Авиационное	0,8	1,1	0,4	0,4
Примечание: Отчетные данные относятся к данным предоставленным, а оценочные к данным, с заполненными пробелами из-за неполноты части отчетов					

Риски для здоровья могут увеличиваться при более высоких уровнях воздействия, и меры по снижению шума, которые должны быть реализованы, также могут различаться в зависимости от источника и конкретного рассматриваемого диапазона уровней шума. Большинство людей подвержены воздействию самого низкого предельного диапазона от 55 до 60 дБА.

Тем не менее, значительное число людей, подвергается воздействию повышенных уровней шума, в первую очередь, это шум автотранспортных потоков, как в городских районах, так и за их границами. В частности, около 12 миллионов человек подвергаются воздействию очень высокого уровня шума, равного или превышающего 70 дБА (L_{den}). Рисунок 1.2 показывает, что шум от автотранспортных потоков является источником шума с самым высоким процентом людей, подвергающихся воздействию верхних диапазонов, начиная с 70 дБА (L_{den}).

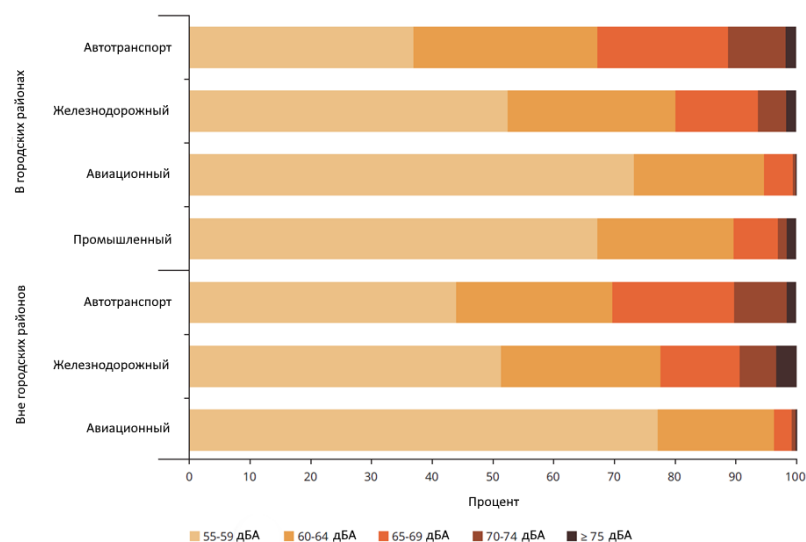


Рисунок 1.2 – Процент населения подвергающийся воздействию повышенных уровней шума в период день-вечер-ночь

Шум с высоким уровнем шума в ночное время влияет на меньшее количество людей. В этом случае шум от автотранспортного потока, также является источником, при котором наибольшее количество людей подвергается воздействию очень высокого уровня (≥ 65 дБ) (Рисунок 1.3).

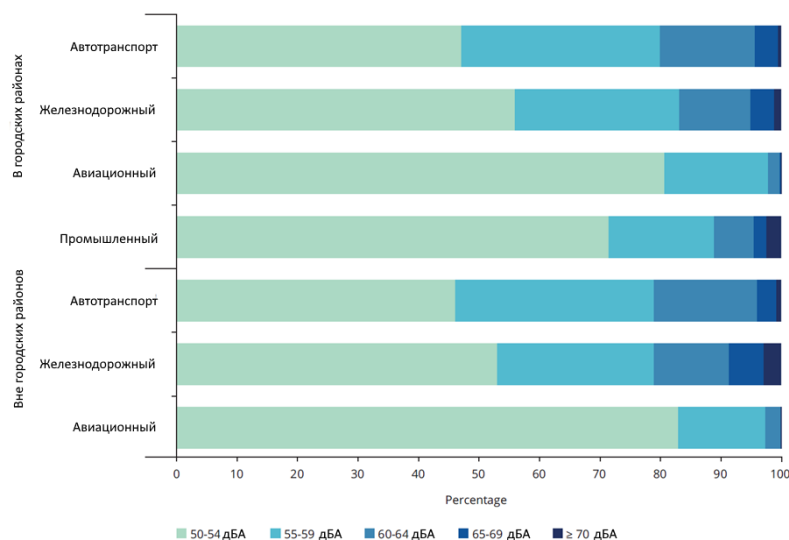


Рисунок 1.3 – Процент населения подвергающийся воздействию повышенных уровней шума в ночной период

На рисунке 1.4 представлена, доля населения, подвергающегося воздействию дорожного шума выше 55 дБА в границах и за пределами городских районов в период день-вечер-ночь.

Количество людей подвергающихся воздействию шума L_{night} в диапазоне дБА, млн.

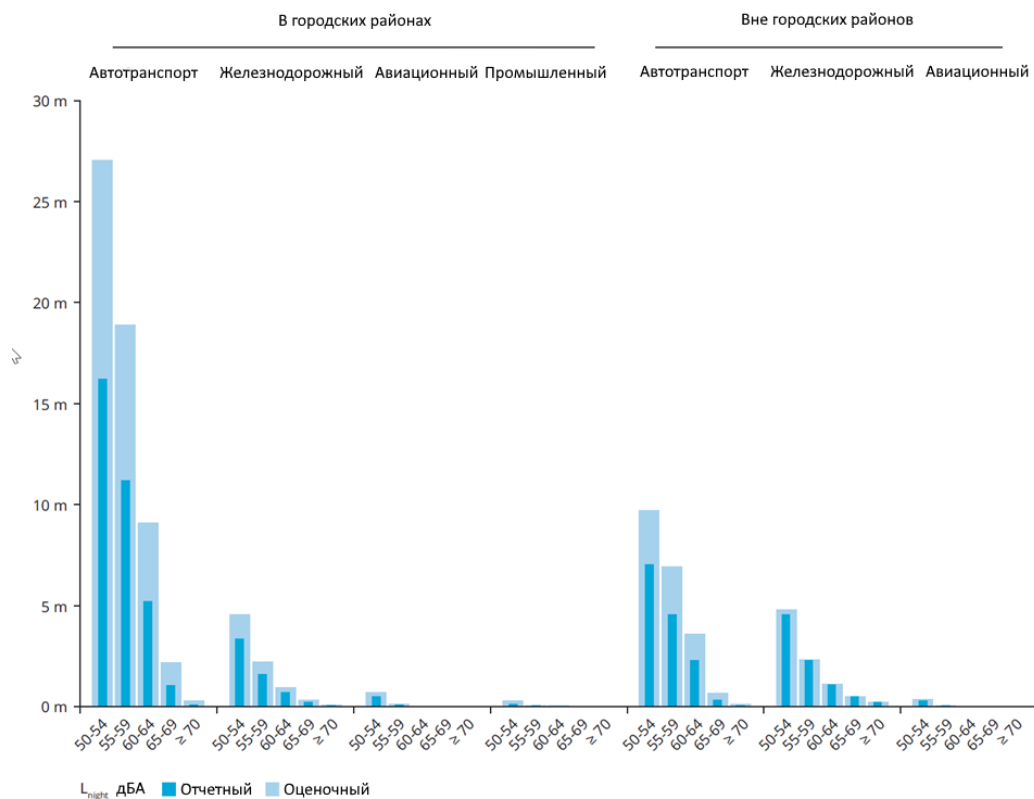


Рисунок 1.4 - Количество людей, подверженных воздействию различных диапазонов шума в различных районах

1.1.2 Оценка проблемы акустического воздействия в России

Согласно Государственному докладу «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 г» [104] наиболее значимым фактором физического воздействия, оказывающих влияние на население, является шум, воздействие которого на людей в условиях плотной городской застройки населенных пунктов продолжает возрастать. Согласно докладу, в 2021 г. 17,0 % измерений шума на территории жилой застройки, не соответствует гигиеническим нормативам.

В 2021 году наибольший удельный вес измерений шума на территории жилой застройки, не отвечающих гигиеническим нормативам, отмечен в Санкт-Петербурге (74,5 %), Республике Коми (74,2 %), Ульяновской области (64,7 %), Алтайском крае (58,6 %), Республике Тыве (45,0 %), Липецкой

области (41,1 %), Тюменской области (39,6 %), Республике Татарстан (37,7 %), Свердловской области (36,1 %). [104]

1.1.3 Влияние шума на здоровье

Продолжительное воздействие шума является одной из основных причин ухудшения здоровья, связанных с факторами воздействия окружающей среды. Хотя уровни шума, создаваемые автотранспортом, как правило, слишком низки, чтобы вызвать биологическое повреждение уха, хорошо известно, что при длительном воздействии и превышении определенных уровней, шум может привести к неслуховым нарушениям здоровья, таким как стресс, нарушение сна, воздействие на сердечно-сосудистую и метаболическую системы, а также когнитивные нарушения у детей [2]. Субъективные реакции на шум, такие как раздражение или нарушение сна, не зависят только от уровней воздействия, они также зависят и от контекстуальных, ситуационных и личностных особенностей. Например, воздействие может зависеть от степени, в которой шум мешает тому, что человек пытается делать (например, спать, концентрироваться или общаться).[20]

Восприятие также может зависеть от личных особенностей, такие как индивидуальная чувствительность к шуму и субъективное отношение к источнику излучения.[21,22] Предполагается, что наиболее серьезным последствием от воздействия повышенных уровней шума для здоровья, является воздействие на сердечно-сосудистую систему, которое в свою очередь, может привести к преждевременной смерти, вызванной длительными физиологическими и эмоциональными стрессовыми реакциями, а также снижением качества сна.[23,24] Эти реакции могут также влиять на метаболическую систему. Однако, помимо основного воздействия на

здоровье, описанного выше, шум может оказывать более широкий спектр воздействий.

1.1.4 Оценка воздействия на здоровье

Воздействие шумового загрязнения является значительным, подсчитано, что около 22 миллионов человек в Европе, проживают в агломерациях, расположенных рядом с крупными источниками шума воздействие, от которых превышает уровни $L_{den} > 55$ дБА. Воздействие шума транспортных средств и промышленности, по оценкам, ежегодно способствует появлению примерно 48 000 новых случаев ишемической болезни сердца и 12 000 случаев преждевременной смерти. По оценкам, около 12 500 детей в Европе в возрасте от 7 до 17 лет имеют проблемы с чтением и обучением из-за воздействия повышенных уровней шума. [2]

Вместо простой оценки числа преждевременных смертей ВОЗ разработала методы количественной оценки бремени болезней, вызванных шумом, с использованием показателей «DALY», которые суммируют годы жизни, потерянные из-за преждевременной смертности, и годы жизни, потерянные из-за жизни в состояниях, далеких от полного здоровья.[2] Эта методология была использована для расчета бремени болезней в результате раздражительности, нарушений сна и нарушений чтения с использованием взаимосвязей экспозиция-реакция, а также популяционно-атрибутивной доли ишемической болезни сердца (далее – ИБС). В расчетах использовались весовые коэффициенты инвалидности (DW), указанные ВОЗ [2]. «DALY» потерянные из-за вызванных шумом последствий для здоровья, были оценены как эквивалентные 437 000 лет на нарушение сна, 453 000 лет на стресс, 156 000 лет на болезни сердца и 75 лет на когнитивные нарушения у детей. Хотя простое суммирование «DALY» для каждого воздействия на здоровье может привести к некоторому двойному учету, результаты предварительно

показывают, что около 1 миллиона лет здоровой жизни теряется каждый год, в результате воздействия повышенных уровней, только в странах членах ЕАОС.[4]

Что касается отдельных источников шума, то неудивительно, что наибольший вклад в бремя болезней, вызванных шумом, вносит воздействие от автотранспортного потока — как наиболее распространенный источник шума в окружающей среде (75 %), за ним следуют железная дорога (20 %), авиация (4 %) и промышленный шум (0,5 %).[4]

Основная часть бремени болезней, включая раздражительность, нарушения сна, болезни сердца и когнитивные нарушения из-за шума, возникает в городских районах с населением более 100 000 человек. Следует отметить, что существуют различные подходы к оценке бремени заболеваний, вызванных воздействием повышенных уровней шума, с точки зрения последствий для здоровья, представленные эффекты могут быть недооценены, поскольку новые научные данные показывают, что на здоровье и благополучие могут влиять уровни шума ниже тех, которые указаны для учета ДШОС.

Связанное с этим ухудшение здоровья населения из-за шума имеет экономические последствия. Существуют разные подходы к количественной оценке экономических издержек от воздействия шума для здоровья, один из которых основан на определении денежной стоимости в расчете на «DALY» [32], результирующее экономическое воздействие шума на территории ЕАОС оценивается в 35 миллиардов евро на раздражающие факторы, 34 миллиарда евро на нарушение сна, 12 миллиардов евро на ИБС и 5 миллионов евро на когнитивные нарушения у детей.

1.2 Нормирование шума

1.2.1 Нормируемые параметры в Европе

Начнем рассмотрение с Европейского подхода к нормированию. Основной анализ будем проводить в части нормирования для стран членов Европейского агентства по окружающей среде (далее – ЕАОС).

Согласно рекомендациям ВОЗ, в странах ЕАОС рекомендуется нормировать следующие показатели: L_{den} (уровень шума день-вечер-ночь): долгосрочный средний показатель, предназначенный для оценки раздражающего фактора. Он относится к взвешенному по шкале А среднему уровню звукового давления за все дни, вечера и ночи в году, с вечерней 5 дБА и ночным поправкой 10 дБА. L_{night} (уровень ночного шума) средний многолетний показатель, предназначенный для оценки нарушения сна. Он относится к среднегодовому ночному периоду воздействия, взвешенному по шкале А.

Многие страны Европы установили национальные предельные значения акустического воздействия, полученных в результате исследований взаимосвязей между шумом и здоровьем представляемых ВОЗ и ЕАОС.

При определении этих национальных предельных значений страны принимают во внимание различные аспекты, включая тип источника шума, время суток, в течение которого возникает шум, вызван ли шум существующей или вновь возводимым объектом, типом земельного участка и чувствительностью приемников.

Текущие национальные ограничения в основном касаются воздействия от транспортных источников, таких как автомобильный, железнодорожный и авиационный транспорт. И наоборот, небольшое число стран вместо этого сосредотачивается на ограничениях, не связанных с конкретными источниками. Национальное законодательство по шуму часто основано на

дневных (Lday) и ночных (Lnight) предельных значениях, в то время как ВОЗ устанавливает пороговые значения с использованием показателей день-вечер-ночь (Lden) и ночное время (Lnight).

В дополнение к этому значения предельно допустимых уровней по-прежнему сильно различаются от страны к стране, и во многих случаях национальные предельные значения не соответствуют недавно опубликованным рекомендациям ВОЗ. [2]

С одной стороны, в большинстве стран членов ЕАОС установлены предельные значения, значительно превышающие уровни, рекомендованные ВОЗ. С другой стороны, предельные значения не отражают того факта, что людей, как правило, больше раздражает и приводит к нарушению сна воздействие авиационного шума, чем автомобильного или железнодорожного транспорта при равных уровнях воздействия. Например, во многих странах допустимы более высокие уровни авиационного шума, по сравнению шумом автотранспорта, а в меньшем проценте стран применяются более высокие пределы шума для железнодорожного транспорта, чем для шума автотранспорта.

В отчете «Обзор критических значений шума в Европейском регионе» 2019 [35] представлен график с процентом стран с различными предельными уровнями, где по оси X показан процент стран с меньшим пороговым уровне, а по оси Y предельные уровни (Рисунок 1.5), т.к. Lden в России не нормируется, указывается только показатель рекомендованный ВОЗ.

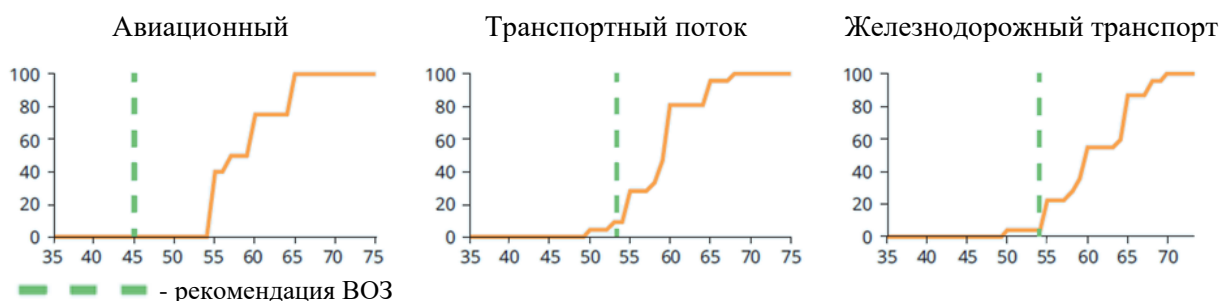


Рисунок 1.5 – Процент стран с различными предельными уровнями для дневных уровней звука

1.2.2 Руководящие принципы ВОЗ по шуму для Европы.

Рассмотрим также рекомендации ВОЗ для членов ЕАОС. Недавно Европейское региональное бюро Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) опубликовало убедительную базу фактических данных о причинно-следственных связях между воздействием шума и здоровьем в виде руководящего документа «Рекомендации по шуму окружающей среды для Европейского региона» [2]. Согласно данному документу, были сформированы рекомендации по нормированию акустического воздействия, основные результаты представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Рекомендации ВОЗ по предельным уровням для мест прибывания человека от различных источников шума

Показатель	Автотранспорт	ЖД транспорт	Авиационный транспорт
Lden, дБ	53	54	45
Lnight, дБ	45	44	40

Эти рекомендации определяют уровень воздействия, выше которого происходит соответствующее усиление негативных последствий, выраженный через Lden и Lnight, которые относятся к нарушениям по шуму в среднем за год.

Рекомендации для всех источников дорожного шума были указаны как «сильные», что означает, что рекомендация может быть принята в качестве политики в большинстве ситуаций. Эти ориентировочные значения основаны на уверенности в том, что снижение уровня шума до заявленных уровней перевесит возможные неблагоприятные последствия. Тем не менее, руководство не содержит рекомендаций для мест, подверженных воздействию шума от комбинации источников или для уязвимых групп.

1.2.3 Нормируемые параметры на территории Российской Федерации

Основным документом регламентирующей нормативные показатели акустического воздействия в России является СанПин 1.2.3685–21 [160], являющийся правопреемником действующего долгое время СН 2.2.4/2.1.8.562-96.[161] В части нормирования акустического воздействия, различия данных стандартов незначительны, в СанПин добавлено разделение нормативов для постоянных и непостоянных источников шума, тем самым добавлен столбец «Уровни звука», который по факту равен «Эквивалентному уровню звука», принятому для непостоянных источников шума.

В отечественных стандартах нормируются: уровни звукового давления, дБ; эквивалентный уровень звука/уровни звука, дБА; максимальные уровни звука, дБА. Все представленные выше параметры имеют разделение на ночное (23:00-7:00) и дневное (7:00-23:00) время суток.

В таблице 1.3 представлены наиболее часто используемые в практике нормативные значения акустического воздействия из СанПин 1.2.3685–21 в помещениях жилых и общественных зданий и шума на селитебной территории.

Таблица 1.3 - Нормируемые параметры шума в октавных полосах частот, эквивалентных и максимальных уровней звука проникающего шума в помещениях жилых и общественных зданий и шума на селитебной территории

N п/п	Назначение помещений или территорий	Время суток	Для источников постоянного шума										Для источников непостоянного шума		
			Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										Уровни звука L(A),	Эквивалентные уровни звука	Максимальные уровни звука
			31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	дБА	L(Aэкв.), дБА	L(Aмакс), дБА	
5	Жилые комнаты квартир, домов стационарных организаций социального обслуживания, организации для детей-сирот и детей, оставшихся без попечения родителей, спальные помещения в школах-интернатах, дошкольных образовательных организациях, домов отдыха, пансионатов	с 7 до 23 ч.	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	40	55	
		с 23 до 7 ч.	72	55	44	35	29	25	22	20	18	30	30	45	
6	Жилые комнаты общежитий и номера гостиниц	с 7 до 23 ч.	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	45	60	
		с 23 до 7 ч.	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	35	50	
13	Территории, непосредственно прилегающие к	с 7 до 23 ч.	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	45	60	
	зданиям больниц и санаториев	с 23 до 7 ч.	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	35	50	
14		с 7 до 23 ч.	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	55	70	

N п/п	Назначение помещений или территорий	Время суток	Для источников постоянного шума									Для источников непостоянного шума		
			Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука L(A),	Эквивалентные уровни звука	Максимальные уровни звука
			31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	дБА	L(Aэкв.), дБА	L(Aмакс), дБА
	Территории, непосредственно прилегающие к зданиям жилых домов, домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, дошкольных образовательных организаций и других образовательных организаций	с 23 до 7 ч.	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	45	60
15	Границы санитарно-защитных зон	с 7 до 23 ч.	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	55	70
		с 23 до 7 ч.	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	45	60
16	Территории, непосредственно прилегающие к зданиям гостиниц и общежитий	с 7 до 23 ч.	93	79	70	63	59	55	53	51	49	60	60	75
		с 23 до 7 ч.	86	71	61	54	49	45	42	40	39	50	50	65
17	Площадки отдыха, функционально выделенные на территории микрорайонов и групп жилых домов, домов отдыха, пансионатов...	-	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	45	60

1.2.4 Сравнение нормируемых параметров на территории Российской Федерации и Европы

Как видно из представленных выше материалов, нормативные значения, принятые на территории России, по большей части имеют предельные значения превосходящие по строгости требования ВОЗ и нормативные уровни, принятые в странах Европы, но стоит отметить, что ВОЗ и ЕАОС по мере проведения исследований, по оценке особенностей воздействия шума на организм человека корректируют нормативные значения в сторону более строгих значений.

Отечественные нормы имеют большую градацию по назначению нормируемых помещений и территорий. Также в отечественных нормах выделяются два периода нормирования: дневное и ночное время суток, в свою очередь согласно рекомендациям ВОЗ и документам, принятым в ЕАОС сутки могут делиться на три периода дневное, вечернее и ночное или проводят нормирование для суток и ночного времени суток с распределением за год.

Нормативные показатели, принятые в Европе, могут быть привязаны к основным источникам шума и учитывать особенности их воздействия на здоровье населения, их спектральный состав. Так отдельные нормативные значения принимают для транспортных средств с разделением для автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта. Отечественные нормы же предусматривают нормирование шума с привязкой непосредственно к нормируемым помещениям, территориям и не учитывают особенности воздействия и различной степени раздражения в зависимости от категории источника воздействия.

Шум автотранспортного потока, является источником непостоянного шума, соответственно, согласно Российскому законодательству, нормируется по показателям эквивалентного и максимального уровня звука.

1.3 Проблема автотранспортного шума

Как указывалось ранее, количество людей, подвергающихся воздействию шума, формируемого автотранспортным потоком, значительно превышает количество людей, подвергающихся воздействию шума от железнодорожных, авиационных и промышленных источников.

Это утверждение верно для стран, расположенных в европейской части континента, как для городских районов, так и за их границами. Это связано с протяженностью автотранспортных сетей, которые больше, чем сети других источников шума [4].

Например, по условиям ДШОС, страны должны оценивать уровни шума для 420 791 км основных дорог, по которым проезжает более 3 миллионов автомобилей в год, а также на всех дорогах в пределах 511 городского района. Более того, согласно ежегодно публикуемому отчету «Используемые транспортные средства, Европа» [33] в ЕС широко используется личный автотранспорт: примерно 560 автомобилей на 1000 жителей и этот показатель заметно растет с каждым годом, к примеру в 2016 году в Европе насчитывалось 262 млн. автомобилей в 2020 уже более 282 млн., аналогичная тенденция наблюдается и в России 43 млн. автомобилей на 2016 год и 46 млн. на 2020 год [1].

Подсчитано, что около 82 миллионов человек страдают от уровня дорожного шума более 55 дБА в течение дня, вечера и ночи в городских районах. В дополнение к этой цифре число людей, подвергающихся воздействию основных дорог за пределами городских районов, оценивается в 31 миллион человек. Что касается ночного шума, то эта цифра составляет 57 мил. и 21 мил. соответственно. Ожидается, что эти значения будут увеличиваться, учитывая, что, к примеру ДШОС, на основании которого можно делать выводы, не охватывает полностью все городские районы и все дороги в Европе.

По результатам анализа отчета «Экологический шум в Европе» 2020 года можно сделать вывод, что основное воздействие на население оказывает шум автотранспортного потока, как в городских районах, так и за их пределами. При этом большинство людей подверженных воздействию повышенных уровней шума находится в городских районах.

Согласно Государственному докладу «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 г» [104] ведущим источником шума в населенных пунктах является автотранспорт, согласно наблюдениям последних 10 лет доля измерений, не соответствующих гигиеническим нормативам на автомагистралях, улицах с интенсивным движением колеблется от 31,8 до 50,2 % (Рисунок 1.6).

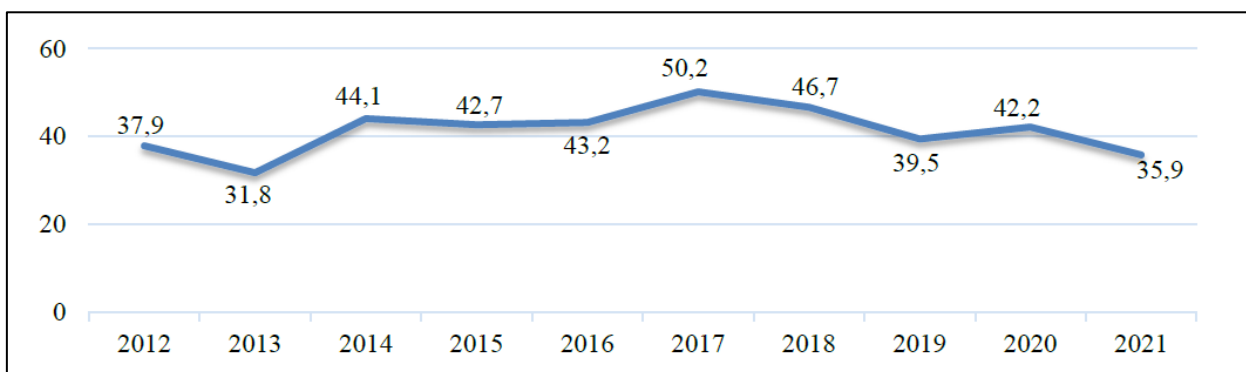


Рисунок 1.6 – Динамика измерений шума, не соответствующих гигиеническим нормативам на автомагистралях, улицах с интенсивным движением в населенных пунктах в 2012–2021 гг., %

Как мы видим, исследования, проводимые в России и странах Европы, подтверждают, что основным источником повышенного воздействия является шум транспортного потока, из которого особенно выделяется автомобильный транспорт, воздействие от которого особенно явно для территории городской застройки. Поэтому вопрос оценки воздействия повышенного шума от автотранспортного потока в городской среде является актуальным.

1.4 Анализ существующих результатов измерений автомобильного шума

Много лет инженеры решают задачи по борьбе с шумом автомобильного транспорта за это время было проведено множество измерений шумовых характеристик автомобильного потока. Результаты этих измерений представлены в работах таких авторов как Асмнин В.Ф., Васильев А.В., Иванов Н.И, Крокер М. Дж., Осипов Г.Л., Поспелов П.И., Цукерников И.Е., Шашурин А.Е., Шубин И.Л., Элькин Ю.И., [71-93]. Значения, полученные в научных трудах авторов в результате натуральных измерений, представлены в Приложении А.

В результате анализа результатов измерений сформирована сводная таблица 1.4 со сравнением полученных разными авторами уровней шума в зависимости от интенсивности и скорости движения автотранспорта.

Таблица 1.4 – Результаты натуральных измерений различных авторов

Интенсивность, авт/ч	Скорость км/ч	Lэкв, дБА
600-800	-	38-65
372-463	50	36-71
800-990	120	38-85
2220-2300	130	57-89
2440-2676	125	74-89
1308-1452	-	66-74
3200-3390	70	72-80
3700-3940	135	73-89

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что при равной интенсивности движения, расхождение уровней звука достигает в различных источниках среднем до 30 дБА, даже если учесть, что не во всех статьях указана средняя скорость движения, поправка на скорость в соответствии с СП 276.1325800.2016 [38] максимально составляет 10 дБА, а поправка на состав потока доходит до 6 дБА, т.е. суммарно 16 дБА., соответственно расхождение уровней составляет не менее 14 дБА. Из полученных результатов можно сделать вывод, о необходимости изучения

вопроса оценки шумовой характеристики автомобильного потока, с целью её уточнения.

1.5 Вопрос определения шумовой характеристики автотранспортного потока

Шумовая характеристика автотранспортного потока характеризуется эквивалентным ($L_{экв}$) и максимальным ($L_{макс}$) уровнем звука в точке на высоте от земли 1,5м, на расстоянии 7,5м от оси ближайшей полосы движения и зависит от:

- интенсивности движения потока;
- суммарной доли грузовых автомобилей и автобусов в транспортном потоке;
- скорости движения потока;
- продольного уклона дороги;
- типа покрытия проезжей части;
- числа полос движения;
- ширина разделительной полосы;
- от режима движения на пересечениях улиц. [35]

В действующей отечественной нормативной документации и литературе, представлены следующие методики расчета:

– по формуле (1) из СП 276.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков» [35]

– по формуле (7) из СП 276.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков» [35]

– метод из ОДМ 218.2.013.2011 «Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам» [39]

– методика из книги «Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика» Осипов Г.Л. [40]

– подход, изложенный в работе «Борьба с шумом на автомобильных дорогах» Поспелов П.И. [41]

– методика из диссертации Мининой Н.Н [60]

1.5.1 Расчёт по СП 276.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков»

1.5.1.1 Расчёт эквивалентного уровня звука по ф.1 СП 276.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков»

В соответствие с СП 276.1325800.2016 на стадии проекта детальной планировки района (микрорайона) или проекта застройки шумовую характеристику автомобильного транспортного потока в виде эквивалентного уровня звука $L_{\text{экв}}^{\text{эрт}}$, дБА, следует определять согласно формуле (1-1).

$$L_{\text{экв}}^{\text{эрт}} = L_{\text{Атрп}} + \Delta L_{\text{Агруз}} + \Delta L_{\text{Аск}} + \Delta L_{\text{Аук}} + \Delta L_{\text{Анок}} + \Delta L_{\text{Апр}} + \Delta L_{\text{Апер}} \quad (1-1)$$

где $L_{\text{Атр.п}}$ - вспомогательная величина, определяемая в зависимости от интенсивности движения автомобильного транспорта N , ед./ч, передвигающегося по прямому сухому горизонтальному участку дороги с мелкозернистым асфальтобетонным покрытием со скоростью 60 км/ч и имеющего в своем составе 40% грузовых автомобилей и автобусов, дБА;

$\Delta L_{\text{Агруз}}$ - коррекция, учитывающая влияние доли грузовых автомобилей и автобусов в рассматриваемом транспортном потоке на его шумовую характеристику, дБА (к грузовым относят автомобили, масса которых составляет более 3500 кг);

$\Delta L_{\text{Аск}}$ - коррекция, учитывающая влияние средней скорости движения транспортного потока, дБА;

$\Delta L_{\text{Аук}}$ - коррекция, учитывающая влияние продольного уклона улицы (дороги), дБА;

$\Delta L_{\text{Апок}}$ - коррекция, учитывающая влияние типа дорожного покрытия, дБА;

$\Delta L_{\text{Ар.п.}}$ - коррекция, учитывающая влияние ширины центральной разделительной полосы на проезжей части, дБА;

$\Delta L_{\text{Апер}}$ - коррекция, учитывающая наличие пересечения улиц (дорог) со светофорным регулированием, дБА; [20]

$L_{\text{Атр.п}}$ зависит от интенсивности движения в часовом диапазоне и определяется согласно формуле (1-2).

$$L_{\text{Атр.п}} = 50 + 8,8 * \lg N_{\text{дн.н}} \quad (1-2)$$

где $N_{\text{дн.н}}$ - расчетные интенсивности движения в час пик дневного периода суток и за наиболее шумный час ночного периода суток соответственно, ед./ч, определяемые по формулам (1-3) и

(1-4):

$$N_{\text{дн}} = 0,076 N_{\text{сут}} \quad (1-3)$$

$$N_{\text{н}} = 0,039 N_{\text{сут}} \quad (1-4)$$

где $N_{\text{сут}}$ - среднегодовая суточная интенсивность движения, ед./сут.

При возможности рекомендуется использование данных с датчиков интенсивности или иных систем наблюдения и контроля установленных стационарно или временно вдоль проектируемых и существующих дорог.

Наибольшее влияние на получаемый эквивалентный уровень шума по данному методу оказывает:

– интенсивность движения автомобильного потока в соответствии с формулой 2.2 (до 20 дБА),

– доля грузового автотранспорта и автобусов в соответствии с [35] таблица 6.2 (до 6 дБА),

- средняя скорость движения в соответствии с [35] таблица 6.3 (до 9,5 дБА),
- наличие значительного уклона в соответствии с [20] таблица 6.5 (до 8 дБА),
- поправка на тип покрытия в соответствии с [20] таблица 6.5 (до 3 дБА),
- поправка на ширину разделительной полосы в соответствии с [20] таблица 6.6 (до 1,5 дБА (при размере полосы более 20 метров)),
- наличие перекрестков и пересечений в соответствии с [20] таблица 6.7 (до 3,5 дБА).

1.5.1.2 Расчёт эквивалентного уровня звука по ф.7 СП 276.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков»

В соответствие с СП 276.1325800.2016, при выполнении расчетов на стадии ТЭО или на стадии разработки генерального плана города, когда многие данные, связанные с параметрами проезжей части, еще неизвестны, следует использовать ориентировочную формулу (1-5) для определения шумовой характеристики (эквивалентного уровня звука) автомобильного транспортного потока, дБА.

$$L_{A_{Экв}}^{ам} = 9,51 \lg N + 12,64 \lg V + 7,98 \lg(1 + p) + 11,39 \quad (1-5)$$

где N - прогнозируемая интенсивность движения автомобильного транспортного потока, ед./ч;

V - прогнозируемая средняя скорость движения автомобильного транспортного потока, км/ч;

p - прогнозируемая доля грузовых автомобилей и общественных транспортных средств в потоке, %; [35]

Для повышения точности прогнозирования расчетной шумовой характеристики по формуле (2) в нее следует внести согласно таблицам 6.2-6.7 [35] коррекции на известные на момент расчетов параметры. [35]

Наибольшее влияние на получаемый эквивалентный уровень шума по данному методу оказывает:

- интенсивность движения автомобильного потока (до 20 дБА),
- доля грузового автотранспорта и автобусов (до 11 дБА),
- средняя скорость движения (до 4 дБА),
- наличие значительного уклона (до 8 дБА),
- поправка на тип покрытия (до 3 дБА), поправка на ширину разделительной полосы (до 1,5 дБА (при размере полосы более 20 метров)),
- наличие перекрестков и пересечений (до 3,5 дБА).

1.5.1.3 Расчёт максимального уровня звука по СП 276.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков»

В соответствие с СП 276.1325800.2016, расчетное значение шумовой характеристики транспортного потока в виде максимального уровня звука $L_{A \text{ макс}}^{\text{авт}}$, дБА, на расстоянии 7,5 м от оси ближней полосы движения автомобильного транспорта следует принимать в соответствии с ГОСТ Р 41.51–2004* при скорости движения автомобильного транспортного потока $v^{\text{опор}} = 50$ км/ч:

- для потока легковых автомобилей $L_{A \text{ макс. } 50}^{\text{авт}} = 74$ дБА;
- при наличии в потоке грузовых автомобилей и/или автобусов $L_{A \text{ макс. } 50}^{\text{авт}} = 80$ дБА.

При скорости движения транспортного потока v , отличной от 50 км/ч, максимальный уровень звука $L_{A \text{ макс } v}^{\text{авт}}$, дБА, на расстоянии 7,5 м от оси ближней полосы движения автомобильного транспорта, соответствующий скорости движения v , км/ч, следует рассчитывать по формуле (1-6).

$$L_{A \text{ макс } V}^{\text{авт}} = L_{A \text{ макс } 50}^{\text{авт}} + 32 \lg(V/50) \quad (1-6)$$

где $L_{Амакс50}^{ам}$ - максимальный уровень звука, соответствующий скорости движения 50 км/ч, дБА.

V- прогнозируемая средняя скорость движения автомобильного транспортного потока, км/ч. [35]

На значение максимального уровня шума по данному методу оказывает влияние:

- наличие грузового автотранспорта в автомобильном потоке (до 6 дБА),
- средняя скорость движения (до 9 дБА).

1.5.2 Расчёт по ОДМ 218.2.013-2011 «Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам»

1.5.2.1 Расчёт эквивалентного уровня шума по ОДМ 218.2.013-2011

В соответствие с ОДМ 218.2.013-2011, для проектируемых или реконструируемых автомобильных дорог значение ШХТП в виде эквивалентного уровня звука рассчитывают по формуле (1-7), которая аналогична ф. (1-1).

$$L_{Аэкв7,5} = L_{Атрп7,5} + \Delta L_{Аск} + \Delta L_{Аук} + \Delta L_{Анок} + \Delta L_{Арп} + \Delta L_{Апер} \quad (1-7)$$

где $L_{Атр.п}$ - вспомогательная величина, определяемая в зависимости от интенсивности движения автомобильного транспорта N, ед./ч, передвигающегося по прямому сухому горизонтальному участку дороги с мелкозернистым асфальтобетонным покрытием со скоростью 60 км/ч и имеющего в своем составе 40% грузовых автомобилей и автобусов, дБА;

$\Delta L_{Агруз}$ - коррекция, учитывающая влияние доли грузовых автомобилей и автобусов в рассматриваемом транспортном потоке на его шумовую

характеристику, дБА (к грузовым относят автомобили, масса которых составляет более 3500 кг);

$\Delta L_{\text{Аск}}$ - коррекция, учитывающая влияние средней скорости движения транспортного потока, дБА;

$\Delta L_{\text{Аук}}$ - коррекция, учитывающая влияние продольного уклона улицы (дороги), дБА;

$\Delta L_{\text{Апок}}$ - коррекция, учитывающая влияние типа дорожного покрытия, дБА;

$\Delta L_{\text{Ар.п.}}$ - коррекция, учитывающая влияние ширины центральной разделительной полосы на проезжей части, дБА;

$\Delta L_{\text{Апер}}$ - коррекция, учитывающая наличие пересечения улиц (дорог) со светофорным регулированием, дБА. [31]

Наибольшее влияние на получаемый эквивалентный уровень шума по данному методу оказывает:

- интенсивность движения автомобильного потока (до 20 дБА),
- доля грузового автотранспорта и автобусов (до 3 дБА),
- средняя скорость движения (до 3,5 дБА),
- наличие значительного уклона (до 5 дБА),
- поправка на тип покрытия (до 4 дБА),
- поправка на ширину разделительной полосы (до 1,5 м (при размере полосы более 20 метров)),
- наличие перекрестков и пересечений (до 3,5 дБА).

1.5.2.2 Расчёт максимального уровня звука по ОДМ 218.2.013-2011

В соответствие с ОДМ 218.2.013-2011, расчетное значение шумовой характеристики транспортного потока в виде максимального уровня звука $L_{\text{А макс}}^{\text{эвт}}$, дБА, на расстоянии 7,5 м от оси ближней полосы движения автомобильного транспорта следует принимать в соответствии с

ГОСТ Р 41.51-2004* при скорости движения автомобильного транспортного потока $v_{\text{опор}} = 50$ км/ч:

- для потока легковых автомобилей $L_{A_{\text{макс.50}}}^{\text{авт}} = 74$ дБА;
- при наличии в потоке грузовых автомобилей и/или автобусов $L_{A_{\text{макс.50}}}^{\text{авт}} = 80$ дБА.

При скорости движения транспортного потока v , отличной от 50 км/ч, максимальный уровень звука $L_{A_{\text{макс } v}}^{\text{авт}}$, дБА, на расстоянии 7,5 м от оси ближней полосы движения автомобильного транспорта, соответствующий скорости движения v , км/ч, следует рассчитывать по формуле (1-8).

$$L_{A_{\text{макс } v}}^{\text{авт}} = L_{A_{\text{макс } 50}}^{\text{авт}} + 32 \lg(V/50) \quad (1-8)$$

где $L_{A_{\text{макс } 50}}^{\text{авт}}$ - максимальный уровень звука, соответствующий скорости движения 50 км/ч, дБА;

V - прогнозируемая средняя скорость движения автомобильного транспортного потока, км/ч. [39]

На значение максимального уровня шума по данному методу оказывает влияние:

- наличие грузового автотранспорта в автомобильном потоке (до 6 дБА),
- средняя скорость движения (до 9 дБА).

1.5.3 Расчёт по методике Осипова Г.Л. «Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика»

1.5.3.1 Расчёт эквивалентного уровня звука по Осипов Г.Л. «Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика»

На стадиях разработки проектов детальной планировки и проектов застройки, когда известны характеристики движения и состава транспортных потоков, параметры поперечного и продольного профиля магистральных улиц и дорог, при покрытия проезжей части улицы или дороги, шумовая

характеристика потоков средств автомобильного транспорта определяется по табл. 10 [40] с учётом поправок, приведенных в табл. 11-13 [40]. Расчёт производится по формуле (1-9).

$$L_{Аэкв}^{авт} = L_{Атрп}^* + \Delta L_{Аск} + \Delta L_{Аук} + \Delta L_{Апок} + \Delta L_{Апол} + \Delta L_{Апер} \quad (1-9)$$

где $L_{Атрп.п}^*$ - вспомогательная величина, определяемая в зависимости от интенсивности движения автомобильного транспорта N , ед./ч, передвигающегося по прямому сухому горизонтальному участку дороги с мелкозернистым асфальтобетонным покрытием со скоростью 60 км/ч, дБА;

$\Delta L_{Аск}$ - коррекция, учитывающая влияние средней скорости движения транспортного потока, дБА;

$\Delta L_{Аук}$ - коррекция, учитывающая влияние продольного уклона улицы (дороги), дБА;

$\Delta L_{Апок}$ - коррекция, учитывающая влияние типа дорожного покрытия, дБА;

$\Delta L_{Апол}$ - коррекция, учитывающая влияние количество полос движения проезжей части улицы или дороги в обоих направлениях, дБА;

$\Delta L_{Апер}$ - коррекция, учитывающая наличие пересечения улиц (дорог) со светофорным регулированием, дБА. [40]

Наибольшее влияние на получаемый эквивалентный уровень шума по данному методу оказывает:

- интенсивность движения автомобильного потока (до 25 дБА),
- доля грузового автотранспорта и автобусов (до 11 дБА),
- средняя скорость движения (до 6,5 дБА),
- наличие значительного уклона (до 8 дБА),
- поправка на тип покрытия (до 3 дБА),
- поправка на число полос движения в обоих направлениях (до 2 дБА),
- наличие перекрестков и пересечений (до 4 дБА).

1.5.3.2 Расчёт максимального уровня звука по Осипов Г. Л. «Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика»

Определение максимального уровня шума в справочнике проектировщика предлагается осуществлять в зависимости от наиболее шумного вида и типа транспорта в потоке, данные представлены в таблице 1.5. Максимальный уровень шума, аналогично эквивалентному определяется на расстоянии 7,5 м. от оси первой полосы движения.

Таблица 1.5– Максимальные уровни звука различного автомобильного транспорта

Вид и тип автомобиля или общественного транспортного средства	Максимальный уровень звука, дБА, при скорости движения, км/ч	
	60	80
<i>Легковые автомобили</i>		
ВАЗ	74	78
РАФ	76	80
"Москвич"	78	82
ГАЗ-24	78	82
ЗАЗ	81	85
<i>Грузовые автомобили</i>		
УАЗ	83	87
ГАЗ-53	86	90
ГАЗ-52	86	90
ЗИЛ-130	88	92
КамАЗ	89	93
МАЗ	94	98
КрАЗ	95	99
<i>Общественные транспортные средства</i>		
Автобусы:		
ПАЗ	80	84
ЛАЗ	87	91
ЛИАЗ	88	92
ИКАРУС	88	92
Троллейбусы:		
ЗИУ-5	89	93
ЗИУ-9	91	95

На значение максимального уровня шума по данному методу оказывает влияние:

– наличие грузового автотранспорта в автомобильном потоке (до 21 дБА),

– средняя скорость движения (до 4 дБА).

В связи с существенных изменением модельного ряда в общем автотранспортном потоке, данную методику рекомендуется не рассматривать.

1.5.4 Расчёт по методике Поспелова П.И. «Борьба с шумом на автомобильных дорогах»

1.5.4.1 Расчёт эквивалентного уровня звука по Поспелов П.И. «Борьба с шумом на автомобильных дорогах»

Определяется аналогично прочим на расстояние 7,5 м. по формуле (1-10).

$$L_{\text{экв}}^{\text{авт}} = L_{\text{трп}} * + \Delta L_{\text{тяж}} + \Delta L_{\text{диз}} + \Delta L_{\text{ск}} + \Delta L_{\text{ук}} + \Delta L_{\text{пок}} + \Delta L_{\text{Арп}} \quad (1-10)$$

где $\Delta L_{\text{Аск}}$ - коррекция, учитывающая влияние средней скорости движения транспортного потока, дБА;

$\Delta L_{\text{Аук}}$ - коррекция, учитывающая влияние продольного уклона улицы (дороги), дБА;

$\Delta L_{\text{Апок}}$ - коррекция, учитывающая влияние типа дорожного покрытия, дБА;

$\Delta L_{\text{Ар.п.}}$ - коррекция, учитывающая влияние ширины центральной разделительной полосы на проезжей части, дБА;

$L_{\text{Атр.п}}^*$ - то же, что $L_{\text{Атр.п}}$ с учётом доли грузовых автомобилей;

$L_{\text{Атяж}}$ - поправка, учитывающая изменение числа грузовых автомобилей с карбюраторными двигателями;

$L_{\text{Адиз}}$ - коррекция, учитывающая изменение числа грузовых автомобилей с дизельными двигателями. [24]

Наибольшее влияние на получаемый эквивалентный уровень шума по данному методу оказывает:

– интенсивность движения автомобильного потока (до 20 дБА),

- доля грузового автотранспорта и автобусов (до 3 дБА),
- средняя скорость движения (до 2,5 дБА),
- поправка на тип покрытия (до 4 дБА),
- наличие грузовых автомобилей с дизельным двигателем (до 1 дБА).

Отметим, что в рассмотренной методике нет метода определения максимальных уровней звука.

1.5.5 Расчёт по методике Мининой Н.Н.

Основная идея, которая была положена в основу настоящего метода, заключается в связи шумовой характеристики с категорией автомобильных дорог. Был проведен большой анализ данных, полученных в результате экспериментов, была установлена связь УЗД и УЗ со скоростью, при рассматриваемой интенсивности движения. Эксперименты, представленные в данной работе, не выявили существенной связи характеристики шума с прочими факторами. [60]

Автотранспортные магистрали по их шумности в дневное время суток можно подразделить на следующие 6 классов (Таблица 1.6). [60]

Таблица 1.6– Классификация автомобильных дорог по шуму

Класс шумности	Наименование класса шумности	Эквивалентный УЗ, дБА (7,5 м)	Скорость движения (км/ч)	Категория автомобильных дорог и городских магистралей
I	малошумные	свыше 55 до 60	до 40	Проезды, парковые дороги, шумозащищенные улицы
II	повышенной шумности	свыше 60 до 65	до 50	Улицы и дороги местного значения, магистральные улицы районного значения
III	шумные	свыше 65 до 70	до 60 – 70	Магистральные улицы транспортнопешеходные
IV	очень шумные	свыше 70 до 75	до 80 – 90	Магистральные улицы непрерывного и регулярного движения

Класс шумности	Наименование класса шумности	Эквивалентный УЗ, дБА (7,5 м)	Скорость движения (км/ч)	Категория автомобильных дорог и городских магистралей
V	сверхшумные	свыше 75 до 80	до 100 – 110	Магистральные дороги
VI	непереносимо шумные	свыше 80 до 85	120	Скоростные дороги

I класс – малошумные (УЗ на расстоянии 7,5 м свыше 55 до 60 дБА);

II класс – повышенной шумности (свыше 60 до 65 дБА);

III класс – шумные (свыше 65 до 70 дБА);

IV класс – очень шумные (свыше 70 до 75 дБА);

V класс – сверхшумные (свыше 75 до 80 дБА);

VI класс – непереносимо шумные (свыше 80 до 85 дБА).

Экспериментальная проверка в данной работе показала, что, если эквивалентный УЗ в норме, то и максимальный УЗ будет в норме. Это значит, что в рассчитанные значения УЗ можно вводить поправку на максимальные значения равную 10 дБА. [60]

Для а/д классом шумности I – IV поправка на ночное время составит -10 дБА, а классов V – VI поправка -5 дБА.[60]

Наибольшее влияние на получаемый эквивалентный и максимальный уровень шума по данному методу оказывает категория дороги.

1.5.6 Сравнение результатов расчёта по различным методикам

Для сравнения существующих методик определения расчетной шумовой характеристики автотранспортного потока, представленных выше и определения расхождения получаемых результатов, выбраны несколько вариантов исходных данных с различной средней скоростью движения потока (выбраны типовые скорости движения по различным категориям дорог: 60, 90 и 110 км/ч), с различной интенсивностью (1000, 2000, 4000 и 8000 авт/ч) и процентом грузовых автомобилей в потоке (0% и 25%), от общего числа автомобилей.

Для определения расхождения получаемых результатов был произведен расчет в соответствии с формулами (1-1)-(1-10). Результаты представлены в таблице 1.7 и 1.8, подробный расчёт представлен в Приложении А.

Таблица 1.7– Результаты расчётов

№ п.п	V, км/ч	N, авт/ч	% груз	ф.1 СП 276.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков»		ф.7 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»	
				$L_{экв7,5}$, дБА	$L_{макс7,5}$, дБА	$L_{экв7,5}$, дБА	$L_{макс7,5}$, дБА	$L_{экв7,5}$, дБА	$L_{макс7,5}$, дБА
1	60	1000	0	76,4	76,5	65,4	76,5	76,4	76,5
2	60	2000	0	79,0	76,5	68,3	76,5	79,0	76,5
3	60	4000	0	81,7	76,5	71,1	76,5	81,7	76,5
4	60	8000	0	84,3	76,5	74,0	76,5	84,3	76,5
5	60	1000	25	76,9	82,5	75,2	82,5	76,9	82,5
6	60	2000	25	79,5	82,5	78,1	82,5	79,5	82,5
7	60	4000	25	82,2	82,5	80,9	82,5	82,2	82,5
8	60	8000	25	84,8	82,5	83,8	82,5	84,8	82,5
9	90	1000	0	78,9	82,2	67,6	82,2	78,9	82,2
10	90	2000	0	81,5	82,2	70,5	82,2	81,5	82,2
11	90	4000	0	84,2	82,2	73,3	82,2	84,2	82,2
12	90	8000	0	86,8	82,2	76,2	82,2	86,8	82,2
13	90	1000	25	79,4	88,2	77,4	88,2	79,4	88,2
14	90	2000	25	82,0	88,2	80,3	88,2	82,0	88,2
15	90	4000	25	84,7	88,2	83,1	88,2	84,7	88,2
16	90	8000	25	87,3	88,2	86,0	88,2	87,3	88,2
17	110	1000	0	79,4	85,0	68,7	85,0	78,9	85,0
18	110	2000	0	82,0	85,0	71,6	85,0	81,5	85,0
19	110	4000	0	84,7	85,0	74,4	85,0	84,2	85,0
20	110	8000	0	87,3	85,0	77,3	85,0	86,8	85,0
21	110	1000	25	79,9	91,0	78,5	91,0	79,4	91,0
22	110	2000	25	82,5	91,0	81,4	91,0	82,0	91,0
23	110	4000	25	85,2	91,0	84,2	91,0	84,7	91,0
24	110	8000	25	87,8	91,0	87,1	91,0	87,3	91,0

Таблица 1.8 – Результаты расчётов

№ п.п	V, км/ч	N, авт/ч	% груз	Осипова Г.Л. «Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика»		Поспелова П.И. «Борьба с шумом на автомобильных дорогах»		Методика Мининой Н.Н.	
				$L_{\text{экв7,5}}$, дБА	$L_{\text{макс7,5}}$, дБА	$L_{\text{экв7,5}}$, дБА	$L_{\text{экв7,5}}$, дБА	$L_{\text{макс7,5}}$, дБА	
1	60	1000	0	69,0	78	76	67,5	77,5	
2	60	2000	0	72,0	78	79	67,5	77,5	
3	60	4000	0	75,0	78	82	67,5	77,5	
4	60	8000	0	78,0	78	84	67,5	77,5	
5	60	1000	25	75,0	88	79	67,5	77,5	
6	60	2000	25	78,0	88	82	67,5	77,5	
7	60	4000	25	81,0	88	85	67,5	77,5	
8	60	8000	25	84,0	88	87	67,5	77,5	
9	90	1000	0	71,5	84	79	77,5	87,5	
10	90	2000	0	74,5	84	82	77,5	87,5	
11	90	4000	0	77,5	84	84	77,5	87,5	
12	90	8000	0	80,5	84	87	77,5	87,5	
13	90	1000	25	77,5	94	82	77,5	87,5	
14	90	2000	25	80,5	94	85	77,5	87,5	
15	90	4000	25	83,5	94	87	77,5	87,5	
16	90	8000	25	86,5	94	90	77,5	87,5	
17	110	1000	0	72,0	88	79	82,5	92,5	
18	110	2000	0	75,0	88	82	82,5	92,5	
19	110	4000	0	78,0	88	84	82,5	92,5	
20	110	8000	0	81,0	88	87	82,5	92,5	
21	110	1000	25	78,0	98	82	82,5	92,5	
22	110	2000	25	81,0	98	85	82,5	92,5	
23	110	4000	25	84,0	98	87	82,5	92,5	
24	110	8000	25	87,0	98	90	82,5	92,5	

Основываясь на результатах, представленных в таблицах 1.7 и 1.8, можно сделать вывод, о значительном расхождении получаемых результатов расчета шумовой характеристики автотранспортного потока, до 20 дБА по эквивалентному и до 11 дБА по максимальному уровню звука, при прочих равных исходных данных. С учётом значительных расхождений в получаемых результатах расчетов, шумовой характеристики автотранспорта, необходимо произвести оценку методики наиболее приближенной к реальной картине.

В работе [63] было проведено сравнение измеренных значений и расчётных; было выявлено значительное расхождение расчётных значений с

измеренными. Наибольшую сходимость с экспериментальным показали две методики. По формуле 7 СП 276.1325800.2016 и по формуле, представленной в книге «Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика» Осипова Г.Л., но даже они дают завышенные уровни и расхождение с натурными измерениями до 8-10 дБА.

Стоит отметить, что расчётные формулы были получены несколько десятилетий назад. Формулы, представленные в литературных источниках, были опубликованы в 1981 г. П.И. Поспелов «Борьба с шумом на автомобильных дорогах» и в 1993 г. Осипова Г.Л. «Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика». А формулы, представленные в действующей нормативной документации, полностью дублируют литературные источники упомянутые ранее, которые, в свою очередь, были получены более 25 лет назад.

О необходимости периодической актуализации нормативной документации, в части подходов к расчету акустической характеристики автотранспортного потока, говорит и тот факт, что используемые в нормативной документации формулы, очевидно, получены по статистической модели. К примеру, статистическая модель опубликованная в 1987 году [105], согласно рекомендации Г.Л. Осипова, требовала актуализации уже в 90-е годы, что и было сделано в 1993 году [40], соответственно можно сделать вывод, что существующие расчетные формулы требуют пересмотра не менее 20 последних лет.

По всей видимости, завышенные уровни шумовой характеристики связаны, с изменением шумности транспортных средств, с каждым годом выпускаемые автомобили становятся всё более тихими, что в свою очередь снижает общую шумность автотранспортного потока. Формулы, представленные в действующей нормативной документации и литературных источниках, являются неактуальными и требуют уточнения, с учётом современного состава транспортного потока, но вероятно, несмотря на

завышенные уровни пропорциональное влияния характеристик потока на шумовую характеристику сохраняется и применимо в данный момент. Второй возможной причиной расхождения натуральных измерений с результатами расчётом может быть неясность с выбором акустического центра и отсутствием учёта распределения транспорта по полосам на многополосных магистралях являющихся, основными источниками повышенного шума.

1.5.7 Вопрос изменения шумности автотранспортного потока в зависимости от характеристики единичного транспортного средства

Было выдвинуто предположение, что завышенные уровни шумовой характеристики автомобильного потока, получаемые расчётным путём, относительно натуральных измерений, вызваны изменением шумности транспортных средств, формирующих автомобильный поток. По всей видимости, завышенные уровни шумовой характеристики связаны, с изменением шумности транспортных средств, с каждым годом выпускаемые автомобили становятся всё более тихими, что в свою очередь снижает шумность всего потока. О чём свидетельствует информация о требуемой наибольшей шумности вновь выпускаемого транспорта [66-68]. Данные с допустимыми уровнями шума базовых моделей автомобилей представлена в таблице 1.9.

Таблица 1.9 - Допустимые уровни шума базовых моделей автомобилей

Тип автомобиля	ГОСТ 27436-87			ГОСТ Р 41.51-99, ГОСТ Р 41.51-04
	Допустимые уровни шума базовых моделей автомобилей			
	до 01.01.87	с 01.01 87	с 01.01 89	с 01.07.00
Легковые и грузопассажирские автомобили	82	80	77	74
Автобусы с двигателем мощностью до 147 кВт и полной массой, кг:				

Тип автомобиля	ГОСТ 27436-87			ГОСТ Р 41.51-99, ГОСТ Р 41.51-04
	Допустимые уровни шума базовых моделей автомобилей			
	до 01.01.87	с 01.01 87	с 01.01 89	с 01.07.00
до 3500 включ.	84	81	78	76
св.3500	89	82	80	80
Автобусы с двигателем мощностью 147 кВт и выше	91	85	83	78
Грузовые автомобили, автопоезда с полной массой, кг:				
до 3500 включ.	84	81	79	77
св. 3500	89	86	83	78
12000 с двигателем мощностью 147 кВт и выше	91	88	84	80

Для оценки влияния изменения допустимых уровней базовых моделей автомобилей на снижение шума автотранспортного потока, необходимо понять возраст существующего автомобильного парка в России. По данным аналитического агентства «АВТОСТАТ», являющейся ведущим аналитическим агентством в сфере статистики и аналитики автомобильного бизнеса России, предоставляющего самую полную и актуальную информацию о нём. Средний возраст автомобилей в России составляет 13,1 год. Что говорит, о том, что большинство автомобилей имеют шумность меньше или равную представленной в ГОСТ Р 41.51-04 [68].

Существующие стандарты, базируется на источниках тридцатилетней давности. Шумовые характеристики, получаемая по данным формулам, соответствуют или превышают допустимым уровням шума базовых моделей автомобилей соответствующим ГОСТ 27436-87 [66]. В среднем отличие шумности базовых моделей по ГОСТ 27436-87 [66] и ГОСТ Р 41.51-04 [68] составляет 5-6 дБА, что не в полной мере отражают расхождение в расчетных и измеренных уровнях.

Вероятно, на шумовую характеристику, определяемую на расстоянии 7,5 м. от оси ближайшей полосы движения, помимо снижения шумности транспортных средств, оказывает влияние положение акустического центра

автотранспортного потока и отсутствие учёта распределения транспорта по полосам на многополосных магистралях являющихся, основными источниками повышенного шума.

1.6 Проблема выбора акустического центра автотранспортного потока

Согласно существующей нормативной документации, акустический центр автодороги вне зависимости от количества проезжих частей принимается на оси ближайшей к краю дороги полосе движения.[38,39] Данный вариант расположения акустического центра приемлем, но не всегда точен даже при расчете акустического воздействия без учета шумозащитного экрана, в случае расчета с учетом шумозащитного экрана, принимают за акустический центр, ближайшую, дальнюю полосу движения или полосу на усмотрение проектировщика, данные варианты расположения акустического центра дают большое расхождение относительно реальной картины.

Для рассмотрения выдвигается предположение, что автомобильный поток не распределен равномерно по всем полосам движения (при наличии более 1 полосы на проезжую часть), большая доля грузового автотранспорта движется ближе к крайним правым полосам по ходу движения и средняя скорость движения по полосам различна.. На дорогах с тремя полосами и более такие грузовики могут занимать крайнюю левую полосу только для поворота налево и разворота. Вне населенных пунктов водители всех автомобилей не должны занимать левые полосы при свободных правых, т.е. грузовой автотранспорт должен в первую очередь двигаться по крайней правой полосе. И только в случае, если правая полоса занята, можно занимать вторую и последующие полосы. А при движении по автомагистрали в соответствии с п. 16.1 на автомагистралях грузовики категории С (более 3,5

тонн) могут двигаться только по двум правым полосам. Выезжать на остальные полосы они могут в крайнем случае.

Необходимо уточнить расположение акустического центра автотранспортного потока с использованием действующей нормативной документации и с учётом параметров и предположений, описанных выше. Для определения акустического центра в зависимости от количества полос движения и состава автомобильного потока, необходимо рассмотреть вопрос распределения автотранспорта по полосам движения и их средней скорости движения на каждой из них. Учёт распределения потока по полосам может позволить приблизить к реальной картине расчетные модели автотранспортного потока.

Согласно работе [43] в нормативной документации методики определения распределения транспортного потока по полосам представлены в ОДН 218.046-2001 [46], где используется коэффициент $f_{\text{пол}}$ и в ОДМ 218.2.020-2012 [45] приведен коэффициент распределения по полосам для четырех- и шестиполосных дорог, также интересующая нас информация представлена в отчете НИР [47] и других подходах.

Авторы работы [43] сопоставили существующие подходы к определению распределения потока по полосам с результатами мониторинга ГК «Автодор» с 2011 по 2015 гг. получившиеся данные не дали удовлетворительных результатов сходимости.

Для дальнейшей работы принято решение об обобщении и систематизации данных с пунктов наблюдения, для получения приближенного к реальной картине распределения потока по полосам движения.

1.7 Проблема оценки звукового поля образующегося от автотранспортного потока

Исследования вопроса распространения звука в атмосфере имеет долгую историю. В период с 1850 по 1950 годы был проведен ряд независимых друг от друга исследований, с целью решения специфических потребностей того времени, такими как: оценка сигналов туманной сигнализации (для судов), оценка шума артиллерийских орудий и других потребностей военной направленности [134], но уже в 50-х годах прошлого века на шум стали обращать внимание, как на социальную проблему в связи с появлением таких источников шума, как реактивные самолеты, увеличения количества транспортных средств и бурного развития промышленности. В связи с этим возродилась и расширилась исследовательская деятельность в направлении оценки распространения звука, для этого стали адаптировать существующих знаний из других областей физики и развивать отдельное её направление, на более высоком уровне, чем ранее. Исследования в данной области ведутся по сегодняшний день, всем известны исследования, проводимые Ивановым Н.И., Шубиным И.Л., Осиповым Г.Л., Шашуриным А.Е., Аттенборо К. и др.

В данной работе рассматривается вопрос распространения звука, от транспортного потока, который можно приближённо принять как линейный источник шума. Однако следует иметь в виду, что это допущение справедливо только для тех случаев, когда шумовой характеристикой потока, лежащей в основе расчета, является эквивалентный уровень звука за период времени, превышающий продолжительность прохождения транспортного средства.

Многие годы производилось усовершенствование схем прогнозирования распространения звука от источника. В части из них показано, что подстилающая поверхность может существенно влиять на звуковое поле на всем пути распространения звуковых волн.

Основываясь на результатах, полученных расхождений между действующими расчетными методиками, разночтениями в расчетах программных комплексов, неточностей при учете дифракции, подстилающей поверхности и особенностей отражения от фасадов, можно сделать вывод, о необходимости актуализации существующих нормативно-технических документов в части расчёта ожидаемых уровней звука, при распространении звука от автотранспортных потоков.

Далее рассмотрим подходы, используемые в действующей нормативно-технической документации.

1.8 Анализ действующей нормативной документации и литературы

Для оценки существующих методик распространения звука в атмосфере, произведен анализ действующей нормативной документации и литературы. Составлен перечень методик по расчету затухания звука при распространении на местности, результаты представлены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 - Формулы расчёта ожидаемых уровней шума на территории

Наименование нормативного документа	Формула
СП 276.1325800.2016	$L_{A_{экв.р.т.}} = L_{A_{экв}} - L_{A_{рас}} - L_{A_{воз}} - L_{A_{\beta/T}} - L_{A_{нок}} - L_{A_{зел}} - L_{A_{экр}} - \Delta L_{A_{\alpha}} - L_{A_{засгр}} + L_{A_{отпр}}$
ОДМ 218.2.013.2011	$L_{A_{эквPT}} = L_{A_{экв7,5}} - (\Delta L_{A_{рас}} + \Delta L_{A_{воз}} + \Delta L_{\frac{\beta}{T}} + \Delta L_{A_{нок}} + \Delta L_{A_{зел}} + \Delta L_{A_{экр}} + \Delta L_{A_{экр_{зас}}} + \Delta L_{A_{отпр_{зас}}} + \Delta L_{A_{отпр}} + \Delta L_{A_{\theta}})$
ГОСТ 31295.2.2005 «Затухание звука при распространении на местности» Часть 2,	$L_{fT}(DW) = L_W + D_C - A; A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}$
«Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика» Осипов Г.Л	$L_{A_{эквPT}} = L_{A_{экв}} - \Delta L_{A_{рас}} - \Delta L_{A_{нок}} - \Delta L_{A_{воз}} - \Delta L_{A_{зел}} - \Delta L_{A_{\theta}}$

где $L_{A_{экв}}$ - шумовая характеристика - эквивалентный уровень шума транспортного потока на соответствующем подучастке магистрали, дБА; $L_{A_{рас}}$ - коррекция, учитывающая снижение уровня транспортного потока в зависимости от расстояния между ним и расчетной точкой, рассчитывают по

7.4, дБА; $L_{\text{Авоз}}$ - коррекция, учитывающая снижение уровня звука вследствие его затухания в воздухе, рассчитывают по 7.5, дБА; $L_{\text{Ав/т}}$ - коррекция, учитывающая влияние турбулентности атмосферы и ветра на процесс распространения звука, дБА; $L_{\text{Апок}}$ - коррекция, учитывающая снижение уровня звука вследствие его поглощения поверхностью территорий, дБА; $L_{\text{Азел}}$ - коррекция, учитывающая снижение уровня звука полосами зеленых насаждений, дБА; $L_{\text{Аэкp}}$ - коррекция, учитывающая снижение уровня звука существующими экранирующими сооружениями и препятствиями (зданиями, насыпями, холмами, выемками и т.п.) на пути звуковых лучей от транспортной магистрали к расчетной точке, дБА; $L_{\text{А}\alpha}$ - коррекция, учитывающая снижение уровня звука вследствие ограничения угла α видимости улицы (дороги) из расчетной точки, дБА; $L_{\text{Азастp}}$ - коррекция, учитывающая характер придорожной застройки, дБА; $L_{\text{Аотp}}$ - коррекция, учитывающая отражение звука от ограждающих конструкций зданий, вблизи которых расположена расчетная точка, дБА (обычно принимают без расчета равной +3 дБА); L_W - октавный уровень звуковой мощности точечного источника шума относительно опорного значения звуковой мощности, равного 1 пВт, дБ; D_c - поправка, учитывающая направленность точечного источника шума и показывающая, насколько отличается эквивалентный уровень звукового давления точечного источника шума в заданном направлении от уровня звукового давления ненаправленного точечного источника шума с тем же уровнем звуковой мощности L_W , дБ. Поправка D_c равна сумме показателя направленности точечного источника шума D_1 и поправки D_Ω вводимой при распространении звука в пределах телесного угла Ω менее 4π ср (стерадиан). Для ненаправленного точечного источника шума, излучающего в свободное пространство, $D_c = 0$; A - затухание в октавной полосе частот при распространении звука от точечного источника шума к приемнику, дБ; A_{div} - затухание из-за геометрической дивергенции (из-за

расхождения энергии при излучении в свободное пространство); A_{atm} - затухание из-за звукопоглощения атмосферой; A_{gr} - затухание из-за влияния земли; A_{bar} - затухание из-за экранирования; A_{bar} - затухание из-за влияния прочих эффектов.

Можно сделать вывод, что расчетные методики представленные в СП 276.1325800.2016, ОДМ 218.2.013.2011, «Затухание звука при распространении на местности» Часть 2, «Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика» Осипов Г.Л. аналогичны и расчёт по ним далее по работе будет именоваться, как расчёт по СП 276.1325800.2016.

Стоит отметить, что ГОСТ 31295.2-2005 [94], который является обязательным документом согласно СП 51.13330.2011 [96], соответствует международному методу расчета затухания звука ISO 9613-2:1996 [114].

1.8.1 Сравнение действующих расчётных методик

Для сравнения методов расчёта затухания шума на местности были выбраны несколько вариантов исходных данных с различным расстоянием до фасада здания 50, 100, 200 и 400м с высотой здания 20 этажей, расчет проводился на примагистральной территории и территории прилегающей к фасаду.

Результаты расчетов по двум методикам показали расхождения между результатами более 6 дБ, для расчетов на расстоянии 200–400 м, для расчетов на расстоянии до 100 метров расхождение составило до 7-9 дБ, для свободного поля и более 9 дБ для поля с учётом фасада.

Отечественные проектировщики используют в работах по оценке акустического воздействия следующие программные комплексы: «Эколог-Шум», «АРМ Акустика», «SoundPlan», «Шум «ЭКОцентр - Стандарт» и др. В работе [97] был произведен анализ результатов расчетов, наиболее часто

встречающихся в работе программных комплексов «АРМ Акустика» и «Эколог-шум», авторы делают выводы о существенных расхождениях результатов полученных с помощью программных комплексов в среднем более 5 дБА.

В рассматриваемых программных комплексах реализована расчетная методика из ГОСТ 31295.2–2005, предусматривающая расчет затухания звука от точечного источника, при оценке затухания звука от линейного источника шума, производится его разбиение на ряд эквивалентных точечных источников шума, при этом параметры разбиения в программных комплексах разнятся.

В работе [97] представлены результаты, свидетельствующие что расчеты, полученные при помощи российских программных комплексов, существенно разнятся, несмотря на то что реализуются в них одинаковые методики.

Следовательно, различными командами разработчиков по-разному толкуют один и тот же нормативный документ, необходима единая методика расчета акустического воздействия или дополнение существующих, для исключения вариации толкования.

Основной проблемой действующих методик, является:

- оценка экранирования (дифракции шума), т.к. даже в ГОСТ 31295.2-2005 [94] указывается, что оценка данного эффекта при помощи измерений может отличаться на величину до 10 дБА от расчетного значения.

- 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;

– оценка отражения в существующих методиках, не в полной мере учитывает особенности отражения звука на различных частотах для различных поверхностей, что вносит значительные погрешности в результаты расчета.

1.9 Распространение звука вблизи земли

Для решения проблемы оценки распространения акустической волны с учётом подстилающей поверхности необходимо определить подход к определению методики оценки влияния подстилающей поверхности на акустическую волну.

Теория распространения звука вблизи или вдоль земли рассматривается в литературе, по крайней мере, с тремя подходами:

– земля рассматривается как локально реагирующая поверхность, а волны в земле не учитываются;

– земля рассматривается как изотропная жидкая среда, способная передавать дилатационные волны в любом направлении в результате падающей волны на поверхность;

– земля рассматривается как упругая твердая среда, способная передавать как дилатационные, так и поперечные волны, возникающие в результате падающей на поверхность волны.

Хотя в литературе имеются теоретические модели для последних двух, а также более сложные модели, пока имеется очень мало свидетельств, показывающих, что распространение звука над землей не может быть адекватно предсказано с помощью использования первой, гораздо более простой, «локально реагирующей» модели земной поверхности. Поэтому это единственная модель, которая будет подробно рассмотрена в данной работе.

1.9.1 Определение коэффициента отражения от поверхности

Для решения проблемы оценки распространения акустической волны с учётом подстилающей поверхности необходимо определить подход к определению коэффициента отражения от «локально реагирующей» подстилающей поверхности в зависимости от угла падения.

Рассмотрим решение данной задачи на примере расчетной схемы для точечного источника (Рисунок 1.7).

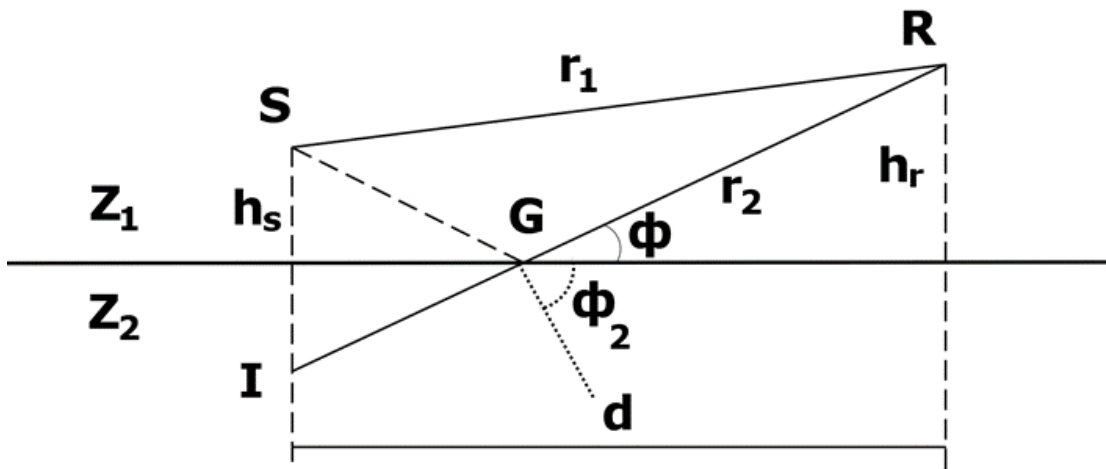


Рисунок 1.7 - Расчетная схема отраженного звукового поля

Точечный источник из представленной схемы, расположен на высоте h_s над границей раздела воздуха и полубесконечного слоя материала с конечным волновым сопротивлением Z_2 . Коэффициент отражения звукового давления для плоской звуковой волны, распространяющейся в воздухе (характеристический импеданс Z_1) и падающей под углом ϕ на материал, равен:

$$R_p = \frac{Z_2 \sin \phi - Z_1 \sin \phi_2}{Z_2 \sin \phi + Z_1 \sin \phi_2} \quad (1-11)$$

где ϕ_2 – угол к горизонту, под которым проходит преломленная волна во второй среде.

ϕ – угол падения волны к поверхности

Z_1 – акустический импеданс воздушной среды

Z_2 – акустический импеданс поверхности.

При этом угол падения и преломления можно представить в виде следующего соотношения:

$$k_2 \cos \phi = k_1 \cos \phi_2$$

где k_1 и k_2 – волновое число в различных средах.

Для применения рассматривались два подхода к определению коэффициента отражения волны сформированных Т. Рудником и У. Ингардом [127,128]. Они использовали различные предположения о граничных условиях при построении своих решений.

Т. Рудник рассматривал случай двух полубесконечных сред, в которых коэффициент отражения записывается в следующем виде.

$$R_p = \frac{\sin \phi - \frac{Z_1}{Z_2} \left(1 - \frac{k_1^2}{k_2^2} \cos^2 \phi_1\right)^{1/2}}{\sin \phi + \frac{Z_1}{Z_2} \left(1 - \frac{k_1^2}{k_2^2} \cos^2 \phi_1\right)^{1/2}} \quad (1-12)$$

При этом У. Ингард рассмотрел отражение от границы с нормальным сопротивлением, в которой пренебрегается распространением во второй среде (случай локальной реакции) и получил выражение следующего вида:

$$R_p = \frac{\sin \phi - Z_1/Z_2}{\sin \phi + Z_1/Z_2} \quad (1-13)$$

Данный параметр позволяет учитывать изменение фазы, а также амплитуды при отражении звуковой волны падающей под углом в зависимости от характеристики подстилающей поверхности.

В материале [129], представлены результаты сравнения двух подходов к прогнозированию избыточного затухания из-за наличия различных сред. Было обнаружено, что во всех случаях результаты находятся в близком согласии, максимальная найденная разница составляет примерно 0,3 дБ. Для инженерных расчетов рекомендуется использовать упрощенный подход предложенный У. Ингардом в формуле (1-13).

Для применение данного подхода необходимо определиться с методикой определения импеданса подстилающей поверхности.

1.9.2 Оценка акустических свойств поглощающих материалов

Эффект, который поверхность земли оказывает на звуковое поле, можно определить, выбрав соответствующее значения сопротивления потоку поверхности земли. Значения импеданса материала определяются в основном по результатам натурных измерений. В общем случае распространение звука в изотропном однородном материале определяется двумя комплексными величинами: волновым сопротивлением $Z_0 = R + jX$ и коэффициентом распространения $\gamma = \alpha + j\beta$ [116].

Согласно различным исследованиям [118,119] удельное сопротивление потоку (далее – cgs) материалов распределяется от примерно 10 cgs для свежеснежного сухого снега до примерно 30 000 cgs для асфальта. (Примечание: $1 \text{ cgs} = 1000 \text{ П} \cdot \text{см}/\text{м}^2$) [120].

Удельное гидравлическое сопротивление материала, образующего поверхность земли, может быть измерено напрямую с использованием метода измерения перепада давления предложенном в работе Болена и Басса [121].

На акустический импеданс влияет извилистость, пористость и коэффициент динамической формы поверхности земли, а также ее сопротивление постоянному потоку. В данном разделе и в предлагаемой модели, в качестве используемых показателей нас интересуют значения, полученные из измеренных уровней звукового давления, с использованием одного простого параметра эффективного удельного сопротивления потоку.

1.9.3 Определение поглощения звука пористыми материалами

Падающие на материал звуковая волна частично отражается, частично поглощается. Отношение поглощенной энергии к падающей называется коэффициентом поглощения материала:

$$\alpha = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}} = \frac{E_{\text{пад}} - E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} = 1 - \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} \quad (1-14)$$

где $E_{\text{пад}}$ – энергия, падающая на поверхность,

$E_{\text{погл}}$ – энергия, поглощённая поверхностью,

$E_{\text{отр}}$ – энергия, отражённая на поверхность,

Если обозначить амплитуду падающей волны P_i , а амплитуду отраженной волны P_r , то коэффициент поглощения может быть представлен в виде:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{P_r}{P_i} \right|^2 = 1 - |\beta_1|^2 \quad (1-15)$$

где β_1 – коэффициент отражения

В общем случае коэффициент поглощения зависит от угла падения звука, частоты, свойств материала, степени пористости, толщины и импеданса основания.

Рассмотрим случай падения плоской звуковой волны из воздушной среды на однородный изотропный звукопоглощающий материал. Вследствие отражения звуковых волн от границы слоя давление в каждой точке пространства будет представлять собой суперпозицию волн, бегущих в прямом и обратном направлениях. При $x=0$ выражение для выходного импеданса слоя Z будет иметь вид:

$$Z_1 = \frac{P(0)}{u(0)} = (P_i + P_r) * \rho_0 c / (P_i - P_r) \quad (1-16)$$

ρ_0 – плотность поверхности,

Отсюда

$$\beta_1 = \frac{P_i}{P_r} = (Z_1 - \rho_0 c) / (Z_1 + \rho_0 c) \quad (1-17)$$

Если входной импеданс слоя нормировать в долях $\rho_0 c$, т.е. $\bar{Z} = Z / \rho_0 c$

$$\beta_1 = \frac{\bar{Z}_1 - 1}{\bar{Z}_1 + 1}$$

Откуда

$$\alpha = 1 - |\beta_1|^2 = 1 - \left| \frac{\bar{Z}_1 - 1}{\bar{Z}_1 + 1} \right|^2 = \frac{4 \bar{R}}{(\bar{R} + 1)^2 + \bar{Y}^2} \quad (1-18)$$

где \bar{R} – активная компонента импеданса

\bar{Y} – реактивная компонента импеданса

1.9.4 Оценка импеданса поверхности

При прогнозировании уровней звука от внешних источников шума, расположенных на уровне земной поверхности и (или) при расположении приемника на высоте близкой к земной поверхности, необходимо учитывать, среди прочего, акустическую характеристику поверхности земли. Важно не только учитывать акустически жесткие и мягкие поверхности, как это предлагается в ГОСТ 31295.2015, но и различия между поверхностями, включая поверхностное расслоение, переменность покрытий и другие нарушения.

Достаточным акустическим дескриптором является комплексное поверхностное нормальное сопротивление, которое зависит от частоты. Существует множество методов измерения поверхностного нормального импеданса для различных типов покрытий [121-123]. Некоторые из этих методов основаны на измерениях распространения на малых расстояниях и хорошо зарекомендовавших себя выражениях для звукового поля, создаваемого точечным источником над границей импеданса. Либо выводится наиболее подходящий импеданс для каждой частоты измерения [121,124], либо предполагается модель частотной зависимости импеданса [119,125].

Вывод наиболее подходящих параметров для модели делает возможным расчет импеданса на любой частоте и более точные прогнозы звукового поля.

В простейшей из этих моделей [116], называемой моделью Делани-Базли, используется один параметр, названный эффективным сопротивлением потоку (σ_e) [119]. Поверхностный нормальный импеданс, нормализованный по отношению к воздуху, определяется как частота, деленная на эффективное сопротивление потока, и выражается в виде формулы [126]:

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 9.08 \left(10^3 \frac{f}{\sigma_e} \right)^{-0.75} + i \cdot 11.8 \left(10^3 \frac{f}{\sigma_e} \right)^{-0.73} \right] \quad (1-19)$$

где f – частота, Гц;

σ_e – удельное сопротивление потоку, Па·см/м².

Авторы модели дают следующие границы применимости формулы:

$$0.01 < \frac{f}{\sigma_e} < 1.00 \quad (1-20)$$

Позже, в случае с несколькими слоями, Мики заметил, что действительная часть поверхностного импеданса при расчете с помощью исходной модели Делани-Базли иногда становится отрицательной на низких частотах, обозначая нефизический результат [117]. На основе данных измерений Делани и Базли, проведенных 20 лет назад на волокнистых материалах с пористостью, близкой к 1,00, Мики предложил использовать следующие выражения для волнового числа и характеристического импеданса.

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 5.50 \left(10^3 \frac{f}{\sigma_e} \right)^{-0.632} + i \cdot 8.43 \left(10^3 \frac{f}{\sigma_e} \right)^{-0.632} \right] \quad (1-21)$$

Большое число исследований [118-126] подтверждает корректность результатов, полученных при применении, предложенной выше упрощенной модели учёта импеданса различных поверхностей. Поэтому в дальнейшем данный подход применяется для расчета ожидаемых уровней звука.

В таблице 1.11 представлены сведения об удельном сопротивлении потоку различных материалов. [119, 126].

Таблица 1.11 – Удельное сопротивление потоку

Тип покрытия	Удельное сопротивление потоку, cgs (1 cgs = 1 000 Па·см/м ²)
Сухой снег (Новый слой 0,1 м, старый слой 0,4 м)	10-30
Мокрый снег	25-50
Лесная почва (сосновый лес)	20-80
Трава: утоптанное пастбище, аэропорт, общественные здания и т. д.	150-300
Придорожная грязь, мелкие камни с ячейкой до 0,1 м.	300-800
Песчаный ил, утрамбованный транспортными средствами	800-2 500
«Чистый» известняк	1 500-4 000
Старая грунтовая дорога, засыпка мелких камней (0,05 м)	2 000 -4 000
Земля, открытая и залитая дождем	4 000-8 000
Карьерная пыль, мелкая, сильно утрамбованная транспортными средствами	5 000- 20 000
Асфальт, герметизированный пылью и легким использованием	30 000
Верхний предел задается теплопроводностью и вязким граничным слоем	От 200 000 до 1 000 000

1.10 Снижение звука за счет поглощения атмосферным воздухом

Для случая, когда проводится оценка распространения звука на значительном расстоянии, важно проводить оценку поглощения звука атмосферой. Потери на атмосферное поглощение имеют два основных вида:

– классические потери, связанные с переходом акустической энергии (или кинетической энергии молекул) в тепловую за счет фундаментальных газотранспортных свойств среды;

– для многоатомных газов релаксационные потери, связанные с изменением кинетической или поступательной энергии молекул во внутреннюю энергию самих молекул.

Классические потери могут быть разделены на потери:

- теплопроводности и вязкости (потери Штокса-Киргофа),
- диффузионные,

– радиационные.

Важно, что только потери Штокса-Киргофа считаются значимыми для воздушной среды при нормальных атмосферных условиях. Диффузные потери вносят лишь около 0,3% от общих потерь, а радиационные потери значительны только на очень низких частотах.

Известно, что потери на релаксационное поглощение в многоатомных газах имеют следующий вид:

– термическая релаксация между поступательной энергией и колебательной энергией состояния молекул;

– термическая релаксация между близкими колебательными резонансами двух разных молекул;

– термическая релаксация между колебаниями одной молекулы и вращения других молекул;

– термическая релаксация между поступательной энергией и вращательные энергетические состояния молекул;

– электромагнитные энергетические состояния молекул.

Электромагнитная релаксация существенна только для оксида азота и то только на высоких ультразвуковых частотах.

Исследования механизмов звукопоглощения в воздухе проводились многими учеными со времен пионерских работ Пилейера в 1929 г [135]. Большой объем исследований представлен в работах Харриса [136-138], Темпеста [137], Монка и Эванса [139,140].

По результат этих и других исследований группа авторов Эванс, Басс и Сандреленд [141] провели оценку затухания звука в воздухе с учётом приведенных выше параметров, в общей сложности было учтено до 20 различных характеристик воздушной среды. По результатам данной работы были опубликованы кривые поглощения в спокойной атмосфере, затем данные кривые дополнялись для поглощения полной амплитуды. Основываясь на результатах, приведённых выше статей, коллективом авторов

Басс, Сандерленд, Зукервар [142], были получена формула для учёта поглощения атмосферы, которая была дополнена тем же коллективом в 1995 г [143] итоговая формула имеет вид:

$$\alpha = 8.686f^2 \left(\left[1.84 \cdot 10^{-11} \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \right] + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \cdot \left\{ 0.01275 \left[\exp \left(\frac{-2239.1}{T} \right) \right] \left[f_{rO} + \left(\frac{f^2}{f_{rO}} \right) \right]^{-1} + 0.1068 \left[\exp \left(\frac{-3352}{T} \right) \right] \left[f_{rN} + \left(\frac{f^2}{f_{rN}} \right)^{-1} \right] \right\} \right) \quad (1-22)$$

где p_a – атмосферное давление, кПа

p_r – эталонное атмосферное давление, 101,325 кПа

T – температура воздуха, К

T_0 – эталонная температура воздуха, 293,15 К

f_{rO} – релаксационная частота кислорода

f_{rN} – релаксационная частота азота

$$f_{rO} = \frac{p_a}{p_r} \left(24 + 4.04 \cdot 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right) \quad (1-23)$$

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \cdot \left(9 + 280 \cdot h \cdot \exp \left\{ -4.17 \cdot \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\} \right) \quad (1-24)$$

где h – концентрация водяного пара, %

В этом случае при оценке снижения для УЗД применяется следующая формула:

$$L_t(f) = 10 \lg \left(\frac{p_i^2}{p_t^2} \right) = \alpha r_1 = A_{atm} \quad (1-25)$$

Стоит отметить, что данная формула реализуется для учёта поглощения атмосферой в п.6.2 ГОСТ 31295.1. С учётом данного факта и рекомендации к

применению данной формулы в материалах Малкома Дж. Крокера, Томаса Россинга [144,145], считаю допустимым принять данный подход при определении ожидаемых уровней, в качестве фактора снижения шума за счет звукопоглощения атмосферы.

1.11 Постановка задач исследования

Обзор состояния вопроса позволил выделить основные задачи исследования:

1. Создание научно обоснованного подхода к определению акустического центра автотранспортного потока, учитывающая 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.

Глава 2. Теоретические основы методики расчета акустического центра автотранспортного потока

2.1 Методика определения акустического центра автотранспортного потока

Для решения задачи по определению акустического центра автотранспортного потока, учитывающая распределение звуковой энергии над проезжей частью, было решено использовать методику по определению точки сосредоточения силы, используемой в аксиомах и теоремах статики. Для этого необходимо рассмотреть способ перехода от распределённой нагрузки, в нашем случае звуковой энергии, к сосредоточенной силе, в нашем случае акустическому центру.

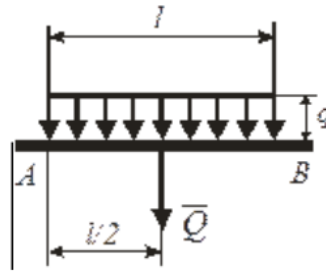
При этом принимаются следующие допущения:

- 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.

Рассмотрим подробнее подход, используемый в аксиомах и теоремах статики для определения сосредоточения распределённых сил.

Плоская система распределенных сил характеризуется ее интенсивностью q , т. е. значением силы, приходящейся на единицу длины нагруженного отрезка.

Самый простой случай — это равномерное распределение нагрузки, в этом случае, центр сосредоточения сил расположится на середине отрезка приложения сил (Рисунок 2.1).[101]



где, Q - равнодействующая сила, параллельная силам распределенной нагрузки, направлена в направлении распределенных сил и прикладывается посередине нагруженного отрезка АВ.

Рисунок 2.1 – Эпюра распределения сил простой случай

При данном типе расчета равномерно распределенную силу можно заменить равнодействующей Q .[101] По модулю равную:

$$Q = lq \quad (2-1)$$

Следующий вариант распределения силы, вдоль отрезка по линейному закону. Для этих сил интенсивность q является величиной переменной, растущей от нуля до максимального значения q_{max} . Равнодействующая Q таких сил определяется аналогично равнодействующей сил тяжести, действующих на однородную треугольную пластину ABC. [101] Так как вес однородной пластины пропорционален ее площади, то, по модулю:

$$Q = 0,5lq_{max} \quad (2-2)$$

Приложение силы Q осуществляется на расстоянии $1/3$ от стороны BC треугольника ABC.

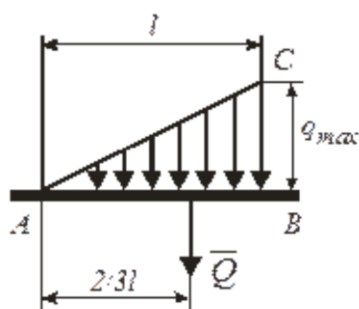
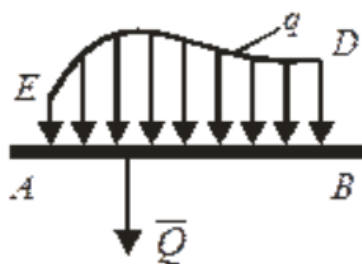


Рисунок 2.2 – Эпюра распределения сил вдоль отрезка по линейному закону

Для сил, распределенных вдоль отрезка по произвольному закону, центром сосредоточения сил будет являться центр массы (центр тяжести) этой фигуры [101] (Рисунок 2.3).



где, Q - равнодействующая сила, параллельная силам распределенной нагрузки, направлена в направлении распределенных сил и прикладывается посередине нагруженного отрезка АВ.

Рисунок 2.3 – Эпюра распределения сил произвольное распределение

В данном случае равнодействующая сила будет равняться сумме всех приложенных к пластине сил.

С учётом допущения, что энергия распределения потока равномерна для всего участка движения, для случая произвольного распределения энергии над дорожным полотном, в расчет принимается плоская ограниченная фигура с акустическим центром в центре тяжести фигуры произвольной формы.

Центр тяжести плоской ограниченной фигуры произвольной формы определяется с использованием двойного интеграла, который позволяет определить координаты центра тяжести фигуры, но т.к. нами принято допущение, о неизменность высоты акустического центра автотранспортного

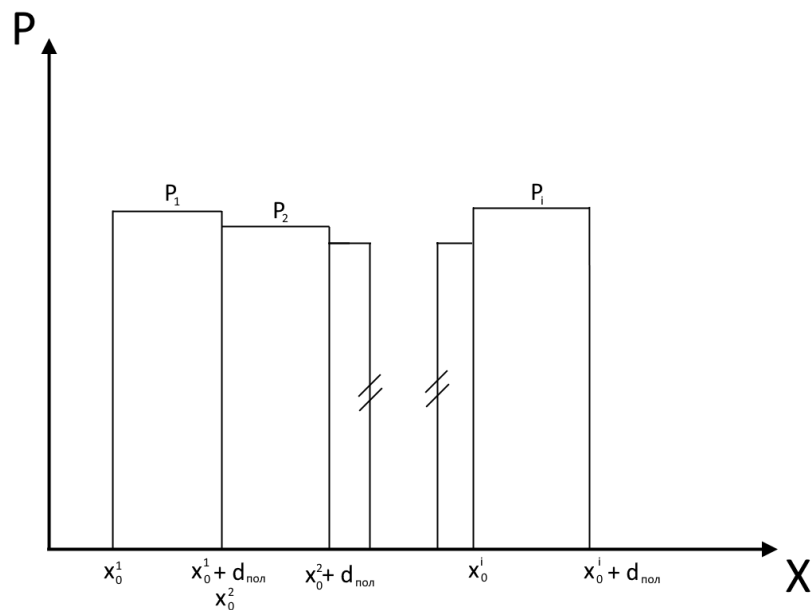
потока, необходимо определить только координату центра тяжести по оси X, т.е. по горизонтали вдоль дорожного полотна.

Центр тяжести по оси X плоской однородной ограниченной фигуры D определяется согласно следующим формулам:

$$x_0 = \frac{\iint_D x dx dy}{\iint_D dx dy} \quad (2-3)$$

$$x_0 = \frac{\iint_D x dx dy}{S} \quad (2-4)$$

где S – площадь области D (фигуры).



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, Па
Рисунок 2.4 – Расчетная схема центра тяжести (акустического центра) над проезжей частью

Выполним вывод формулы для определения акустического центра автотранспортного потока:

$$X_{АЦ} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_0^{P_i} dy \int_{x_0^i}^{x_0^i + d_{пол}} x dx}{S} \quad (2-5)$$

где n – число полос движения

P_i – среднеквадратичное значение звукового давления от полосы движения, Па;

X_0^i - расстояние от края дороги до начала полосы движения, м;

$d_{\text{пол}}$ - ширина полосы движения, м;

S - площадь искомой фигуры.

Рассмотрим решение каждого из интегралов отдельно:

$$\int_{x_0^i}^{x_0^i+d_{\text{пол}}} x dx = \frac{(x_0^i + d_{\text{пол}})^2 - x_0^{i2}}{2} \quad (2-6)$$

$$\int_0^{P_i} dy = P_i \quad (2-7)$$

Площадь искомой фигуры будет равняться:

$$S = d_{\text{пол}} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2-8)$$

Подставив (2-6)-(2-8) в (2-5) получим следующее выражение:

$$X_{\text{АЦ}} = \frac{\sum_{i=1}^n ((P_i(x_0^i + d_{\text{пол}})^2 - x_0^{i2})/2)}{d_{\text{пол}} \sum_{i=1}^n P_i} \quad (2-9)$$

где: $P_i = P_0 10^{\frac{L_i}{20}}$

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

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

Для случаев, когда акустическая энергия распределена равномерно или по линейному закону, или по своему характеру близка к данным распределениям, для упрощения расчетов возможно использование в качестве акустического центра стандартные положения центров масс.

2.2 Распределение автотранспортного потока по полосам движения

Для определения аналитической зависимости расположения акустического центра в зависимости от характеристики автотранспортного потока, использовалось осредненное распределение различных категорий транспорта по полосам движения и средняя скорость движения, по данным предоставленные 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.

2.3 Распределение потока для дорог общего пользования федерального значения

Для оценки распределения автотранспортного потока и определения энергетического распределения по полосам, от ФКУ УПРДОР «Северо-Запад» получена информация об интенсивности потока, количестве грузового и автобусного транспорта, средней скорости по каждой из полос движения. Результаты наблюдений представлены для различных участков дорог общего пользования федерального значения с различным количеством полос движения, за период с 2010 по 2022 год.

Полученные данные были разделены на несколько выборок по количеству полос движения, затем по проценту грузового автотранспорта от общего потока, интервалы выбраны согласно Таблице 6.2 [35]: до 5, 5-20, 20-35, 35-50, более 50 %.

Затем для исключения аномальных результатов в полученных выборках, были использован метод критерия Смирнова-Граббса, согласно методике представленной в ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 [64] с расширением до 250 значений [48].

После исключения аномальных отклонений по критерию Смирнова-Граббса, для определения релевантной интенсивности и средней скорости потока по полосам применяется функция Медиана, это такое число выборки, что ровно половина из элементов выборки больше него, а другая половина меньше него.

Для определения медианы используется следующая формула:

$$M_e = X_{M_e} + i_{M_e} \frac{\frac{\sum f}{2} - S_{M_e-1}}{f_{M_e}} \quad (2-10)$$

где

X_{M_e} - нижняя граница медианного интервала

i_{M_e} - величина медианного интервала

$\sum f$ - сумма частот ряда

S_{M_e-1} – сумма накопленных частот в интервалах, предшествующих медианному

f_{M_e} – частота медианного интервала

В результате обработки выборок были получены следующие значения, представленные в таблицах 2.1 - 2.6.

Таблица 2.1 – Результаты обработки выборок для 2 полос движения на проезжую часть

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Часовая интенсивность движения, авт/ч														
		Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	менее 100	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	101-200	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	201-300	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	301-400	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	401-500
более 50 %	1	54,5	1	0,95	47	1	0,97	46	1	0,98	54,5	1	0,8	52,5	1	0,77
	2	11,5	0	0,05	29,5	0	0,03	28	0	0,02	65	0	0,2	64,5	0	0,23
49-35 %	1	57,0	0,9	0,85	56,5	1	0,87	48	1	0,88	48	1	0,79	49	1	0,77
	2	38,0	0,1	0,15	46	0	0,13	40	0	0,12	52,5	0	0,21	50	0	0,23
20-34 %	1	77,5	0,9	0,77	63	0,8	0,64	76,5	0,7	0,72	63	0,7	0,76	65	0,8	0,79
	2	73,0	0,1	0,23	58	0,2	0,36	82,5	0,3	0,28	54	0,3	0,24	50	0,2	0,21
5-19 %	1	63,5	0,7	0,66	67	0,8	0,78	63	0,5	0,43	64,5	0,8	0,61	68	0,8	0,65
	2	54,0	0,3	0,34	57	0,2	0,22	71	0,5	0,57	64,5	0,2	0,39	65	0,2	0,35
до 5 %	1	54,0	0,5	0,53	51	0,4	0,41	54,5	0,3	0,38	61,5	0,4	0,39	68	0,6	0,48
	2	57,0	0,5	0,47	61	0,6	0,59	63,5	0,7	0,62	62	0,6	0,61	69	0,4	0,52

Таблица 2.2 – Результаты обработки выборок для 2 полос движения на проезжую часть (продолжение)

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Часовая интенсивность движения, авт/ч											
		Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	501-750	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	751-1000	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	1001-1500	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	более 1501
49-35 %	1	-	-	-	-	-	-	58	0,9	0,65	52	0,6	0,5
	2	-	-	-	-	-	-	70	0,1	0,35	48	0,4	0,5
20-34 %	1	64	0,76	0,8	58	0,6	0,63	73	0,6	0,57	55,5	0,9	0,58
	2	52	0,24	0,2	61	0,4	0,37	69,5	0,4	0,43	67,5	0,1	0,42
5-19 %	1	76	0,8	0,56	81	0,7	0,57	71	0,6	0,54	64	0,5	0,51
	2	67	0,2	0,44	90,5	0,3	0,43	76	0,4	0,46	73	0,5	0,49

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Часовая интенсивность движения, авт/ч											
		Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	501-750	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	751-1000	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	1001-1500	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	более 1501
до 5 %	1	68	0,6	0,45	73	0,5	0,43	-	-	-	-	-	-
	2	72	0,4	0,55	76	0,5	0,57	-	-	-	-	-	-

По результатам анализа распределения потока для двух полос движения на проезжую часть, можно сделать вывод, что средняя скорость потока по полосам с интенсивностью движения до 300 авт/ч, по крайней правой стороне выше, чем по левой, при этом для интенсивности выше 300 авт/ч скорость по полосам уравнивается, за редким исключением различаясь не более чем на 10 км/ч. При этом основная доля потока осуществляет движение по крайней правой полосе, причем, чем больше доля грузового автотранспорта в потоке, тем большая доля приходится на крайнюю правую полосу, в среднем 0,8 при доле грузового автотранспорта более 50 % и 0,5 при доле грузового автотранспорта менее 5 %. Доля грузового транспорта от интенсивности движения по полосе, аналогично доле потока, тем больше, чем больше доля грузового автотранспорта во всем потоке, так имеет долю 1 при доле грузового автотранспорта более 50 % и 0,6 при доле грузового автотранспорта менее 5 %.

Таблица 2.3 – Результаты обработки выборок для 3 полос движения на проезжую часть

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Часовая интенсивность движения, авт/ч																	
		Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	до 100	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	101-200	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	201-300	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	301-400	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	401-500	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	501-750
20-34 %	1	85	0,8	0,39	88	0,8	0,43	89	0,8	0,44	81	0,7	0,34	79	0,7	0,31	80	0,6	0,28
	2	94,5	0,2	0,52	98	0,2	0,49	95	0,2	0,41	94	0,3	0,51	94	0,3	0,49	93	0,3	0,47
	3	65	0	0,08	64	0	0,09	97	0	0,15	83,5	0	0,15	88	0	0,21	113	0	0,24
5-19 %	1	83	0,8	0,37	89	0,8	0,38	90	0,8	0,41	87	0,8	0,32	87	0,8	0,3	90	0,8	0,28
	2	90	0,2	0,54	99	0,2	0,52	97	0,2	0,48	96	0,2	0,53	100,5	0,2	0,53	102	0,2	0,52
	3	56,5	0	0,09	71	0	0,1	67	0	0,11	71	0	0,15	76,5	0	0,17	82	0	0,2

Таблица 2.4 – Результаты обработки выборок для 3 полос движения на проезжую часть (продолжение)

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Часовая интенсивность движения, авт/ч														
		Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	751-1000	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	1001-1500	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	1501-2000	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	2001-2500	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	более 2501
20-34 %	1	94	0,9	0,3	95	0,9	0,28	45	0,2	0,08	-	-	-	-	-	-
	2	107	0,1	0,54	102	0,1	0,54	100	0,3	0,44	-	-	-	-	-	-
	3	116	0	0,16	92	0	0,18	102	0,6	0,48	-	-	-	-	-	-
5-19 %	1	90	0,8	0,28	90	0,7	0,27	89	0,7	0,27	84,5	0,6	0,26	80,5	0,6	0,22
	2	102	0,2	0,49	101	0,3	0,47	99	0,3	0,44	93	0,4	0,41	90	0,4	0,39
	3	92,5	0	0,23	98	0	0,27	100,5	0	0,29	104,5	0	0,33	104	0	0,39

По результатам анализа распределения потока для трех полос движения на проезжую часть, можно сделать вывод, что средняя скорость потока по полосам с интенсивностью движения до 750 авт/ч, по крайней правой и средней полосе

выше, чем по левой, с редким нарушением этой закономерности не более, чем на 10 км/ч, при этом для интенсивности выше 750 авт/ч скорость по полосам уравнивается, с незначительным превалированием средней полосы, для интенсивности более 2000 авт/ч характерна большая скорость по крайней правой полосе, с разницей в среднем 20 км/ч. При этом основная доля потока осуществляет движение по средней полосе, с распределением остального потока в сторону крайней правой полосы для интенсивности движения до 400 авт/ч и с распределением остального потока равномерно по остальным двум полосам для интенсивности выше 400 авт/ч, при этом доля грузового автотранспорта в потоке существенно не влияет на распределение потока. Доля грузового транспорта для интенсивно движения до 1500 авт/ч имеет доли - крайняя правая полоса 0,8; средняя полоса 0,2; для интенсивности выше 1500 авт/ч составляет для крайней правой полосы 0,6; для средней 0,4.

Таблица 2.5 – Результаты обработки выборок для 4 полос движения на проезжую часть

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Часовая интенсивность движения, авт/ч																	
		Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	до 400	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	401-500	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	501-750	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	751-1000	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	1001-1500	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	1501-2000
20-34 %	1	81	0,43	0,21	81	0,46	0,22	81	0,48	0,22	81	0,47	0,22	82,5	0,44	0,2	83	0,32	0,19
	2	92	0,54	0,39	91	0,49	0,34	91	0,48	0,34	90	0,48	0,31	89	0,47	0,3	96	0,4	0,28
	3	106	0,04	0,32	101,5	0,04	0,35	101	0,04	0,33	98	0,04	0,35	99	0,07	0,36	106	0,25	0,3
	4	116,5	0	0,08	111	0	0,1	111	0,01	0,1	82,5	0	0,12	74,5	0,01	0,14	125	0,02	0,22
5-19 %	1	88	0,52	0,21	82	0,51	0,23	84	0,49	0,19	80	0,49	0,19	81	0,43	0,17	86	0,44	0,16
	2	96	0,44	0,36	92	0,43	0,33	92	0,47	0,32	90	0,47	0,3	91,5	0,51	0,3	93	0,48	0,27
	3	95,5	0,04	0,35	99	0,06	0,33	95	0,04	0,37	94	0,04	0,37	100	0,06	0,36	103	0,07	0,36

	4	70	0	0,08	85	0	0,1	73	0,01	0,11	72	0,01	0,13	109,5	0,01	0,17	106	0,01	0,22
--	---	----	---	------	----	---	-----	----	------	------	----	------	------	-------	------	------	-----	------	------

Таблица 2.6 – Результаты обработки выборок для 4 полос движения на проезжую часть (продолжение)

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Часовая интенсивность движения, авт/ч														
		Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	2001-2500	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	2501-3000	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	3001-4000	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	4001-5000	Ср. ск. Движения	Доля гр. по полосам	более 5001
20-34 %	1	77	0,25	0,15	-	-	-	72	0,3	0,13	-	-	-	-	-	-
	2	87,5	0,33	0,24	-	-	-	85	0,46	0,23	-	-	-	-	-	-
	3	106	0,24	0,34	-	-	-	97	0,15	0,33	-	-	-	-	-	-
	4	126,5	0,18	0,27	-	-	-	108	0,09	0,3	-	-	-	-	-	-
5-19 %	1	84	0,43	0,15	83	0,42	0,15	80	0,41	0,15	77	0,39	0,15	71	0,39	0,17
	2	92	0,48	0,25	90	0,49	0,24	87	0,49	0,23	84	0,5	0,23	77	0,48	0,22
	3	100,5	0,06	0,35	99	0,07	0,34	95	0,08	0,32	92	0,08	0,31	84	0,11	0,29
	4	105	0,02	0,25	104	0,02	0,27	103	0,03	0,29	101	0,03	0,31	94	0,03	0,32

По результатам анализа распределения потока для четырех полос движения на проезжую часть, можно сделать вывод, что средняя скорость потока по полосам растет от крайней правой к крайней левой в среднем разница составляет 20 км/ч. При этом основная доля потока осуществляет движение по крайней правой и средней полосе, для интенсивности менее 500 авт/ч, около 0,8 от общего потока, для интенсивности выше 500 авт/ч характерно превалирование по потоку второй полосы движения с равномерным распределением 0,5 доли потока по крайней правой и третьей полосам, при этом доля грузового автотранспорта в потоке существенно не влияет на распределение потока. Грузовой автотранспорт вне

зависимости от интенсивности движения осуществляет движения по крайним правым полосам, с редким выездом на третью полосу (не более 0,03 доли)

2.4 Распределение потока для городских дорог

Для оценки распределения автотранспортного потока и определения энергетического распределения по полосам, от С-Пб ГБУ «Центр транспортного планирования» получена информация об интенсивности потока, количестве грузового и автобусного транспорта, средней скорости по каждой из полос движения. Результаты наблюдений представлены для различных участков городских дорог с различным количеством полос движения, за период с 2019 по 2021 год с разделением на временные промежутки.

Из полученных данных были отобраны участки с исключением влияния пересечений, полученные данные для каждого из участков были объединены по для различного времени суток в единую выборку для каждой из проезжих частей. Затем полученные выборки усреднялись по каждой из полос движения с целью получения долей общего потока и доли грузового автотранспорта. Результаты обработки выборок представлены в Приложении В. Обобщённые результаты представлены в таблице 2.7

Таблица 2.7 – Результаты обработки выборок для городских дорог

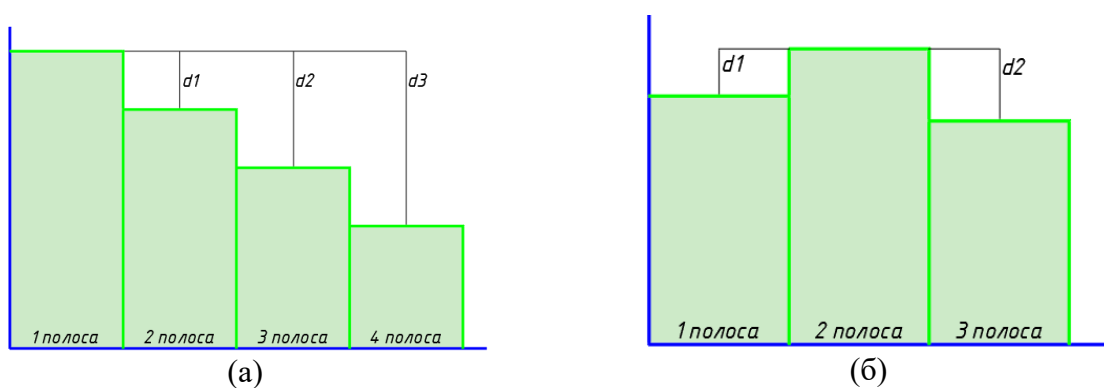
Участок		1 полоса движения			2 полоса движения			3 полоса движения			4 полоса движения		
от	до	Ср. ск. движения	Доля от общего потока по ПЧ	Доля гр. а.т.	Ср. ск. движения	Доля от общего потока по ПЧ	Доля гр. а.т.	Ср. ск. движения	Доля от общего потока по ПЧ	Доля гр. а.т.	Ср. ск. движения	Доля от общего потока по ПЧ	Доля гр. а.т.
Тихорецкий пр.	пр. Энгельса	51	0,51	0,02	55	0,49	0,01						
пр. Шафировский	пр. Ириновский	26	0,24	0,06	31	0,26	0,05	37	0,26	0,04	35	0,24	0,04
ул. Потапова	пр. Энергетиков	21	0,41	0,04	26	0,32	0,06	28	0,27	0,04			
ул. Десантников	ул. Доблести	29	0,49	0,11	29	0,51	0,05						
ул. Доблести	ул. Десантников	30	0,49	0,14	29	0,51	0,03						
пл. Ленинский	Рихарда Зорге ул.	26	0,48	0,03	25	0,52	0,04						
Рихарда Зорге ул.	пл. Ленинский	22	0,49	0,01	26	0,51	0,04						
Кузнецовская ул.	ул. Фрунзе	39	0,35	0,12	39	0,32	0,06	34	0,32	0,03			
ул. Фрунзе	Кузнецовская ул.	46	0,36	0,09	34	0,33	0,05	32	0,31	0,04			
Кубинская ул.	Ленинский пр.	35	0,44	0,04	37	0,56	0,01						
Ленинский пр.	Кубинская ул.	33	0,44	0,05	34	0,56	0,01						
ул. Седова	Софийская ул.	59	0,28	0,12	66	0,38	0,10	70	0,33	0,02			
Софийская ул.	ул. Седова	61	0,51	0,19	59	0,49	0,04						
Коннолахтинский пр.	Военная ул.	54	0,55	0,08	52	0,45	0,03						
Военная ул.	Коннолахтинский пр.	47	0,56	0,07	45	0,44	0,03						
Автозаводская ул.	Грузовой пр-д	58	0,30	0,08	60	0,37	0,18	62	0,33	0,03			
Грузовой пр-д	Автозаводская ул.	53	0,31	0,08	64	0,37	0,16	61	0,32	0,04			
Кричевский пер.	наб. р. Фонтанки	31	0,51	0,04	27	0,49	0,02						
Потемкинская ул.	Литейный пр.	43	0,49	0,07	35	0,51	0,02						

По результатам анализа распределения потока для городских дорог, можно сделать вывод, что вне зависимости от количества полос движения автотранспортный поток равномерно распределяется по проезжей части.

2.5 Распределение звуковой энергии потока для дорог общего пользования федерального значения

С учётом информации, представленной в разделах выше по интенсивности движения с разделением по каждой полосе, скорости движения и формуле расчета шумовой характеристики потока с наибольшей сходимостью с натурными результатами измерений, произведем расчет шумовой характеристики от каждой из полос движения. В результате расчетов были выявлены закономерности, по распределению звуковой энергии над проезжей частью в зависимости от количества полос и доли грузовых автомобилей и автобусов от общей интенсивности потока.

Для наглядности на рисунке 2.5 представлено графическое обозначение $d1$, $d2$, $d3$ обозначающих разность уровней между полосами движения.



(а) - для двух и четырех полос движения на проезжую часть (б) – для трех полос движения на проезжую часть

Рисунок 2.5 – Разность уровней между полосами движения

С учётом распределения энергии и принятой ширины полосы движения 3,75м согласно ГОСТ Р 52399-2005 [98], был определен акустический центр автотранспортного потока для различного количества полос движения, доли

грузового автотранспорта и интенсивности движения, результаты расчетов представлены в Приложении Б.

По результатам анализа результатов расчета можно сделать следующие выводы:

1. Для 2 полос движения характерно смещение акустического центра в промежуток:

– от 4,0 до 3,5 м от крайней полосы для всех интенсивностей движения и при доле грузового автотранспорта до 5%, и при интенсивности от 200 до 300 и более 1500 авт/ч и при доле грузового автотранспорта от 5 до 19 %;

– от 3,5 до 3,0 м от крайней полосы при интенсивности движения до 300 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 5 до 35 %, при интенсивности от 200 до 300 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 20 до 35 %, при интенсивности от 300 до 1000 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 5 до 20 %, при интенсивности движения от 750 до 1500 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 5 до 35 %, при интенсивности движения более 1500 и доле грузового автотранспорта от 35 до 40 %;

– от 3,0 до 2,5 м от крайней полосы при интенсивности движения до 400 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 35 до 49 %, при интенсивности движения от 400 до 1000 авт/ч и доле грузового автотранспорта более 20 %, при интенсивности движения от 1000 до 1500 авт/ч и доле грузового автотранспорта более 35 %, при интенсивности движения более 1500 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 24 до 34 %;

– от 2,5 м до 2,0 м от крайней полосы при интенсивности движения до 400 авт/ч и доле грузового автотранспорта более 5000 авт/ч.

2. Для 3 полос движения характерно смещение акустического центра в промежуток:

– от 6,0 до 5,5 м от крайней полосы для интенсивности движения от 500-750 авт/ч и при доле грузового автотранспорта более 20%, и при

интенсивности движения более 2000 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 5 до 19 %;

– от 5,5 до 5,0 м от крайней полосы для интенсивности движения от 300 до 500 авт/ч и доле грузового автотранспорта более от 20 до 34 %, для интенсивности движения от 400 до 2000 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 5 до 20 %;

– от 5,0 до 4,5 м от крайней полосы для интенсивности движения до 400 авт/ч и любой доли грузового автотранспорта, для интенсивности движения от 300 до 400 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 5 до 19 %, для интенсивности движения от 750 до 1500 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 20 до 35 %.

3. Для 4 полос движения характерно смещение акустического центра в промежуток:

– от 6,5 до 7,1 м от крайней полосы для интенсивности движения до 1000 авт/ч и любой доле грузового автотранспорта, для интенсивности движения от 1000 до 1500 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 20 до 35%;

– от 7,1 до 7,5 м от крайней полосы для интенсивности движения от 1500 до 2000 авт/ч и доле грузового автотранспорта до 20 %, для интенсивности движения от 1500 до 2000 авт/ч и доле грузового автотранспорта от 20 до 35 %;

– от 7,5 до 8,0 м от крайней полосы для интенсивности движения от 1500 авт/ч и доли грузового автотранспорта от 5 до 19 %;

– от 8,0 до 8,5 м от крайней полосы для интенсивности движения от 200 до 2500 авт/ч и доли грузового автотранспорта от 20 до 35 %, для интенсивности движения от 3000 до 4000 авт/ч и доли грузового автотранспорта от 20 до 35 %.

Результаты расчета смещения акустического центра для дорог общего пользования федерального значения с шириной полосы 3,75м [98], были

сведены в единую таблицу с целью дальнейшего классификации и использования в инженерных расчетах.

Таблица 2.8 – Сводная таблица смещения акустического центра для дорог общего пользования федерального значения

Кол-во полос на проезжую часть	Интенсивность, авт./ч.	Доля грузовых автомобилей в составе потока	Смещение акустического центра
2	до 100	более 50 %	2,1
		49-35 %	2,6
		20-34 %	3
		5-19 %	3,3
		до 5 %	3,7
	101-200	более 50 %	2,2
		49-35 %	2,6
		20-34 %	3,3
		5-19 %	3,1
		до 5 %	3,9
	201-300	более 50 %	2,2
		49-35 %	2,5
		20-34 %	3,1
		5-19 %	3,9
		до 5 %	4
	301-400	более 50 %	2,6
		49-35 %	2,6
		20-34 %	2,9
		5-19 %	3,4
		до 5 %	4
	401-500	более 50 %	2,7
		49-35 %	2,7
		20-34 %	2,8
		5-19 %	3,3
до 5 %		3,8	
501-750	более 20 %	2,7	
	5-19 %	3,4	
	до 5 %	3,8	
751-1000	более 20 %	3,2	
	5-19 %	3,4	
	до 5 %	3,9	
1001-1500	более 35 %	3,2	
	20-34 %	3,3	
	до 19%	3,4	
более 1501	более 35 %	3,4	
	20-34 %	3,6	
	до 19 %	3,8	
3	до 100	более 20 %	4,7

Кол-во полос на проезжую часть	Интенсивность, авт./ч.	Доля грузовых автомобилей в составе потока	Смещение акустического центра
	101-200	до 19 %	4,8
		более 20 %	4,6
	201-300	до 19 %	4,8
		более 20 %	4,8
		5-19 %	4,7
		20-34 %	5
	401-500	До 19 %	5
		более 20 %	5,3
	501-750	до 19 %	5,1
		более 20 %	5,5
	751-1000	до 19 %	5,2
		более 20 %	4,8
	1001-1500	до 19 %	5,3
		более 20 %	4,6
	1501-2000	до 19 %	5,3
более 20 %		7,4	
2001-2500	-	5,3	
более 2501	-	5,5	
4	до 400	до 19 %	7
		более 20 %	6,8
	400-500	до 19 %	7,1
		более 20 %	7
	501-750	до 19 %	7
		более 20 %	7
	751-1000	до 19 %	6,8
		более 20 %	7,1
	1001-1500	до 19 %	6,8
		более 20 %	7,5
	1501-2000	до 19 %	7,4
		более 20 %	7,6
	2001-2500	до 19 %	7,5
		более 20 %	7,7
	2501-3000	-	7,7
3001-4000	до 19 %	7,7	
	более 20 %	8	
4001-5000	-	7,7	
более 5001	-	7,6	

По результатам расчетов можно сделать 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.

Проведем оценки влияния смещения акустического центра 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 [66] и ГОСТ Р 41.51-04 [68], и влияния положения акустического центра автотранспортного потока, учитывающего распределения транспорта по полосам на многополосных магистралях, можно сделать вывод, что совокупное влияние составит в среднем до 10 дБА, что соответствует расхождению результатов расчетов и натуральных измерений.

2.6 Распределение звуковой энергии потока для городских дорог

С учётом распределения энергии и принятой ширины полосы движения 3,5 м согласно СП 396.1325800.2018 [99], был определен акустический центр автотранспортного потока для различного количества полос движения, доли грузового автотранспорта и интенсивности движения.

Согласно результатам, представленным в разделе 2.3, можно сделать вывод, о равномерном распределении потока и доли грузового автотранспорта по полосам движения городских дорог. Соответственно, акустический центр для участка автодороги, на который не оказывает влияние пересечения автодорог, расположен на середине проезжей части.

Проведена оценка влияния смещения акустического центра 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.

Выводы по главе

1. Для решения задачи по определению акустического центра автотранспортного потока, учитывающей распределение звуковой энергии над проезжей частью, было предложено решение на основании методики по определению точки сосредоточения силы, используемой в аксиомах и теоремах статики. Для этого был рассмотрен переход от распределённой нагрузки, в нашем случае звуковой энергии, к сосредоточенной силе, в нашем случае акустическому центру.

В результате ряда преобразований, сформирована формула для определения акустического центра автотранспортного потока, учитывающая распределение акустической энергии по каждой из полос движения, а также их ширину.

2. 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.

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

4. Для определения аналитической зависимости расположения акустического центра, 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 её характеристики и характеристик автотранспортного потока. При отсутствии полного перечня данных, позволяющего проводить расчет по предложенной методике, допустимо использование осредненных показатели.

5. 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. О чем свидетельствует что, с учётом влияния снижения шумности транспортных средств, подтверждённой согласно отличиям к требованиям допустимых уровней шумности базовых моделей автотранспорта, приведенных в ГОСТ 27436-87 [66] и ГОСТ Р 41.51-04 [68], и влияния положения акустического центра автотранспортного потока, учитывающего распределения транспорта по полосам на многополосных магистралях, совокупное влияние составит в среднем до 10 дБА, что соответствует расхождению результатов расчетов и натурных измерений.

Глава 3. Теоретические основы разработки методики оценки акустического поля на примагистральной территории и территории прилегающей к фасадам

3.1 Общие положения

Распространение шума на городской территории – сложный процесс, влияние на который оказывает дивергенция, интерференция, дифракция, рефракция, рассеяние, поглощение звука внешней среды и др.

Геометрическое затухание при распространении звуковой волны обычно принимают: для точечного источника 6 дБ(дБА) на удвоение расстояния (сферическая звуковая волна), от бесконечного линейного источника 3 дБ(дБА) на удвоение расстояния (цилиндрическая звуковая волна) и распространение без потерь от источника бесконечной площади.

Для источников конечного размера поле разделяют на ближнее, где он характеризуется, как площадной источник, затем источник переходит по характеру затухания в цилиндрический, а после в сферический. Для упрощения учёта, данного перехода и учёта сложных форм линейных источников шума, характерных для городских дорог, было принято решение, о проведении расчетов распространения звука от линейного источника, при разбиении его на серию эквивалентных точечных.

Принятые 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.

3.2 Принципы деления линейного источника шума на серию точечных и определение их шумовой характеристики

3.2.1 Описание методики разбиения линейного источника на серию точечных

Для решения задачи разбиения линейного источника, на серию эквивалентных точечных, необходимо выработать подход к его разбиению. Для этого воспользуемся требованием п.4 ГОСТ 31295.2005, где даются следующие рекомендации:

- а) источники приблизительно равноценны по излучению и расположены примерно на одной высоте над землей;
- б) условия распространения звука от источников до приемника одинаковые;
- в) расстояние H_{\max} от эквивалентного точечного источника до приемника более удвоенного максимального размера ΔL в группе источников ($H_{\max} > 2\Delta L$)

При разработке последующей методики разбиения источника в работе будем придерживаться данных рекомендаций. Наиболее распространенные автодороги всех категорий и конфигураций, отвечают требованиям пунктов а и б.

Основным вопросом, рассматриваемым в данном разделе, является методика деления линейного источника шума на сегменты, определение конфигурации сегментов и распределение звуковой мощности сегментов для задания точечных источников шума.

За основу в части сегментации линейного источника шума возьмем, требования п.4 ГОСТ 31295.2005, которые указывают, что допустимо деление линейного источника на сегменты в соотношении представленном ниже:

$$\Delta L = \frac{H}{n} \quad (3-1)$$

где ΔL – размер сегмента, м;

H – расстояние от ближайшей точки источника шума до расчетной точки, м;

n – безразмерный коэффициент отношения, отвечающий требованиям >2 .

Из формулы, представленной выше, можно сделать вывод, что линейный источник шума, допустимо делить на равные сегменты, с учётом обозначенных требований, но в случае значительной протяженности источников шума, в случае разбиения источника на равные сегменты, пропорционально увеличивается количество расчетов.

Для упрощения решения задачи распространения, в работе, представлен алгоритм по оптимизации сегментации, с целью сокращения количества сегментов и соответственно количества точечных источников шума, с сохранением корректности расчетов.

Первоочередной задачей стал вопрос выбора безразмерного коэффициента n , для применения подхода, в том числе, при решении задачи в программных комплексах, было принято решение использовать постоянное число π , т.к. оно соответствует критерию перехода от сферической волны к цилиндрической. [163]

$$\Delta L_i = \frac{H_i}{\pi} \quad (3-2)$$

Соответственно, дальнейший алгоритм сегментации 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 определяются, 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 3.1 приведена схема построения сегментов.

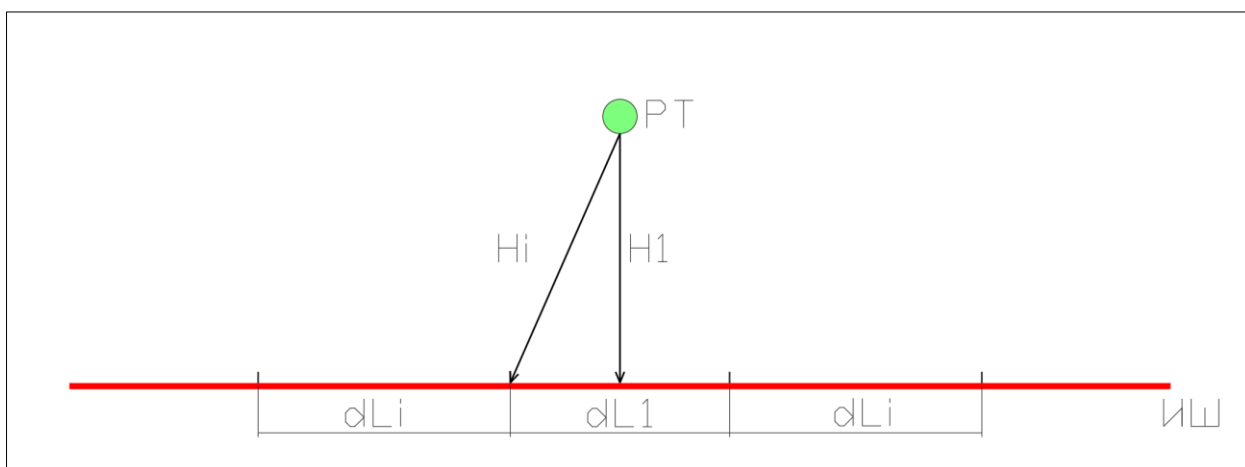


Рисунок 3.1 - Схема построения сегментов линейного источника шума

На рисунке 3.2 приведен пример разделения линейного источника на серию эквивалентных точечных.

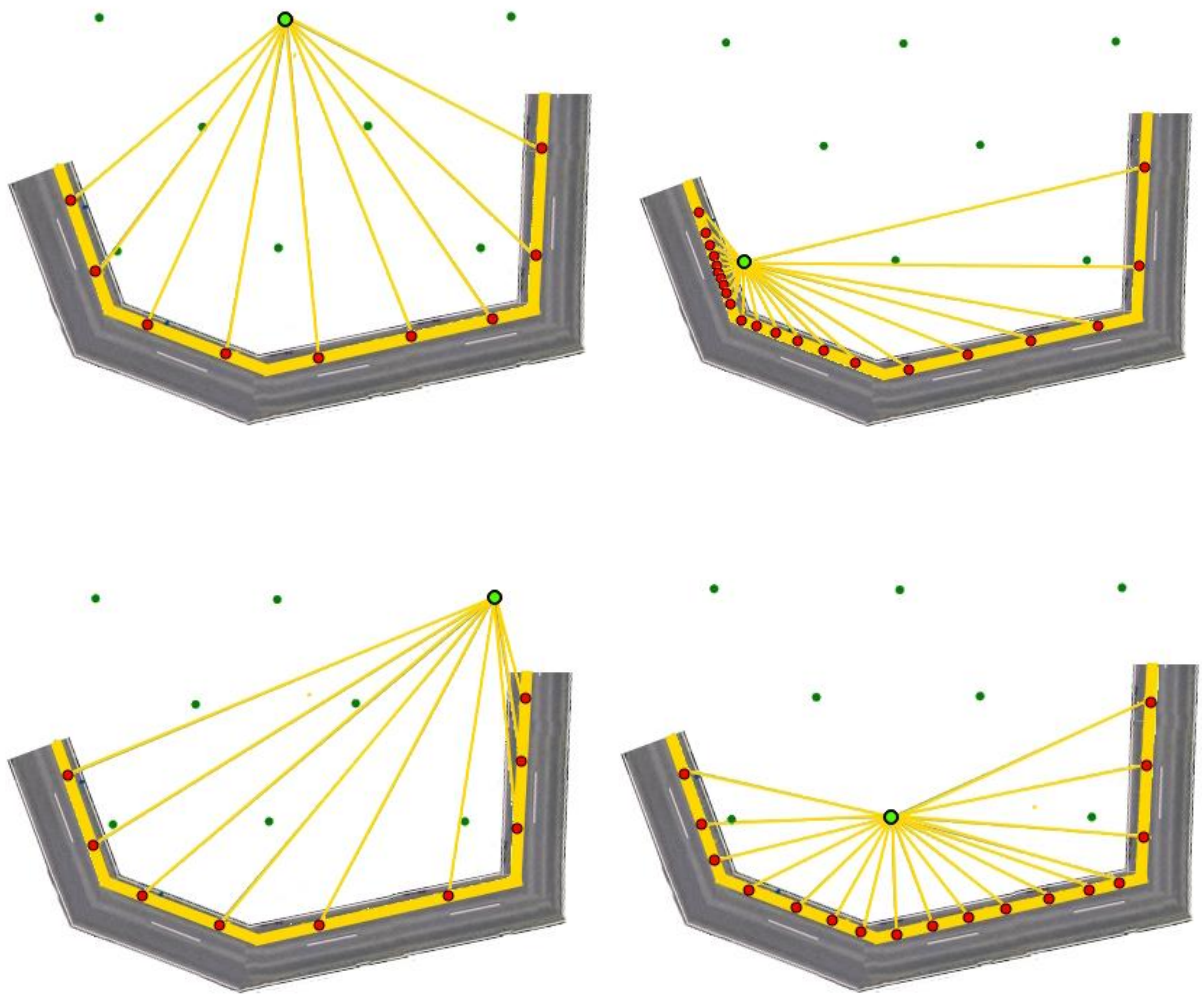


Рисунок 3.2 – Пример разделения линейного источника на серию эквивалентных точечных

3.2.2 Описание методики определения УЗМ

Распространении звуковой волны от точечного источника шума приводит к распределению звуковой волны по всему фронту. В простейшем случае источник звука, излучает энергию одинаково во всех направлениях с интенсивностью I [Вт·м²]. Интенсивность в данном случае характеризуется, как мощность на единицу площади сферы, на расстоянии r [м] от источника мощностью W [Вт]:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (3-3)$$

В логарифмической форме зависимость приобретает следующий вид:

$$L_p = L_w - 20 \cdot \log(r) - 11, \text{ дБ} \quad (3-4)$$

где L_p – уровень звука в расчетной точке, дБ (дБА);

В формируемой модели мы принимаем транспортный поток, как линию некогерентных всенаправленных источников шума, на акустически твердой поверхности. Согласно представленной ранее методике, источник, принимаемый в расчет, будет сегментирован на смежные участки длиной dL . Если их акустическая мощность будет определяться, как WdL , то интенсивность в точке на расстоянии r_0 от неё, будет иметь зависимость $dL = r_0 d\theta / \cos\theta$, где r_0 это расстояние от любого элемента под углом θ к перпендикуляру, и определяться, согласно формуле:

$$I = \int_{-1/2}^{1/2} \frac{W}{2\pi r^2} = \frac{W}{2\pi H} \left[2 \cdot \arctg \left(\frac{l}{2r_0} \right) \right] \quad (3-5)$$

Перейдем от формулы вида (3-5) к логарифмическому виду:

$$L_p = L_w - 10 \log r_0 - 8 + 10 \log \left[2 \cdot \arctg \left(\frac{l}{2r_0} \right) \right] \quad (3-6)$$

где L_w – уровень акустической мощности источника шума, дБ;

l – протяженность сегмента линейного источника, м.;

r_0 – базовое расстояние, характеризующее шумовую характеристику, м.

Акустические характеристики точечных источников шума, в дальнейших расчетах определяются согласно формуле (3-6) [145].

3.3 Расчет распространения звуковой волны в воздушной среде

Одним из основных факторов, характеризующих распространения звуковой волны в воздушной среде, является его затухание с расстоянием из-

за различных необратимых процессов, которые снижают энергию акустической волны и преобразуют её в тепло.

Факторы, влияющие на затухание звуковой энергии, можно классифицировать следующим образом:

– Затухание при распространении

- Потери при равномерном сферическом распространении
- Потери при неравномерном распространении
 - Отражение от поверхностей
 - Преломление атмосферой

– Потери при поглощении

- Поглощение подстилающей поверхностью
- Поглощение атмосферой
 - Классическое поглощение
 - Молекулярная релаксация поглощения

3.3.1 Сферические волны, прямые и отраженные

Распространение сферических волн от точечного источника вблизи отражающей плоскости — сложная тема как с математической, так и с концептуальной точки зрения. Данным вопросом занимались многие учёные И. Рудник, У. Ингард, С. Чессел, Вензель, Донато и др. [128,131,132]

Наибольшие по объёму исследования относящаяся к вопросу распространения шума над земной поверхностью, была проведена Эмблтоном, Перси и Олсоном [122,126,130,118,119].

3.3.2 Функция распространения сферической волны

Для безграничной среды потенциал акустического поля равен следующему выражению:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi R} e^{i(kR - \omega t)} \quad (3-7)$$

где $Q = 4\pi a^2 v_0$ - производительность источника шума;

$4\pi a^2$ - площадь сферы вокруг источника шума;

v_0 - амплитуда колебательной скорости на границе сферы радиуса a ;

R - расстояние от источника шума до расчетной точки/

Из выражения (3-7) с учётом следующей зависимости:

$$p(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t) \frac{\delta\varphi(\vec{r}, t)}{\delta t} \quad (3-8)$$

И с учётом рассмотрения монохромной волны, мы можем выразить уравнение для акустического давления в безграничной среде в следующем виде:

$$p = -i\omega\rho\varphi = \frac{p_0}{R} e^{ikR} \quad (3-9)$$

p_0 - амплитудный множитель, Па · м

Для оценки распространения сферической волны в ограниченной среде, можно воспользоваться методом мнимых источников, располагаемым симметрично источнику излучения, относительно отражающей поверхности.

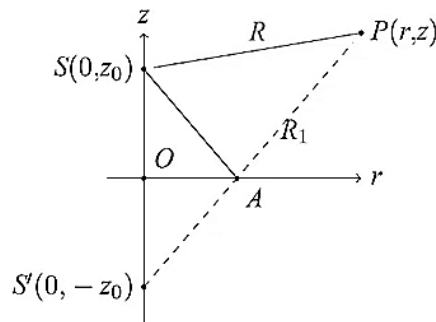


Рисунок 3.3 - Схема расчета с мнимым источником

В этом случае для акустически мягкой ограничивающей поверхности, с учётом уравнения (3-9), получим следующее выражение:

$$p = \frac{p_0}{R} e^{ikR} - \frac{p_0}{R_1} e^{ikR_1} \quad (3-10)$$

где R_1 – расстояние от мнимого источника до расчетной точки;

Для случая распространения звука в натуральных условиях необходимо учитывать угол падения и импеданс поверхности. Для решения данной задачи, разложим поле точечного источника в совокупность плоских волн, рассмотрим отражение каждой из плоских волн от границы раздела двух сред, после чего просуммируем их в точке приема сигнала.

Снова вернемся к вопросу распространения волны в бесконечной среде, для этого рассмотрим следующую вариацию уравнения Гельмгольца:

$$\Delta p(\vec{r}) + k^2 p(\vec{r}) = \delta(\vec{r}) \quad (3-11)$$

Для решения данного уравнения воспользуемся функцией Грина:

$$p(\vec{r}) = G^\pm(\vec{r}) = -\frac{e^{\pm i\vec{k}\vec{r}}}{4\pi r} \quad (3-12)$$

Так как мы рассматриваем вопрос расхождения звуковой волны от источника в бесконечность, согласно условию Зоммерфельда, степень $\pm i\vec{k}\vec{r}$ принимает знак +.

Для правой части выражения (3-12) выполним преобразование Фурье, в результате чего получим выражение следующего вида:

$$p(\vec{r}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \frac{1}{k^2 - k'^2} e^{i\vec{k}'\vec{r}} d\vec{k}' \quad (3-13)$$

В правой части полученного уравнения выражение $e^{i\vec{k}'\vec{r}}$ будет определять плоскую волну с волновым вектором \vec{k}' .

В решаемой нами задаче примем, что на оси z проходит граница раздела двух сред. Для учёта данного фактора выполним преобразования интеграла из уравнения (3-13) выделив части относящиеся к каждой из осей. После чего разделим получившийся интеграл на два интеграла.

$$\begin{aligned}
& \int \frac{1}{k^2 - k'^2} e^{i\vec{k}'\vec{r}} d\vec{k}' = \\
& = \int \frac{1}{k^2 - k'_x{}^2 - k'_y{}^2 - k'_z{}^2} e^{ik'_x x + ik'_y y + ik'_z z} dk'_x dk'_y dk'_z = \quad (3-14) \\
& = \int dk'_x dk'_y e^{ik'_x x + ik'_y y} \int \frac{e^{ik'_z z} dk'_z}{a^2 - k'_z{}^2}
\end{aligned}$$

где $a^2 = (k^2 - k'_x{}^2 - k'_y{}^2)$

Внутренний интеграл уравнения (3-14) можно решить с помощью применения теории функции комплексного переменного, за которую примем k'_z .

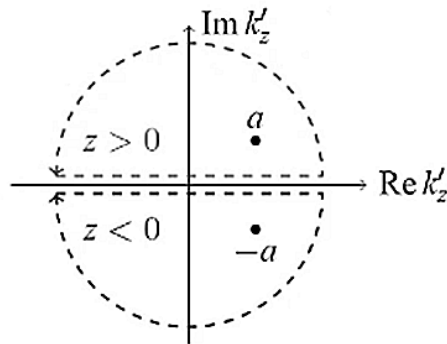


Рисунок 3.4 - Схема на комплексной плоскости

Как видно из рисунка 3.4 при решении интеграла по действительной оси и добавлении решения по мнимой оси, наш интеграл примет значение на действительной оси и соответственно решение интеграла не изменится.

Соответственно, мы можем решить данный интеграл используя теорему о вычетах, для замкнутого интеграла на комплексной плоскости, тогда уравнение (3-14) примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
& \int dk'_x dk'_y e^{ik'_x x + ik'_y y} \int \frac{e^{ik'_z z} dk'_z}{a^2 - k'^2_z} = \\
& = -2\pi i \int dk'_x dk'_y e^{ik'_x x + ik'_y y} \frac{e^{ia|z|}}{2a} = \\
& = -\pi i \int dk'_x dk'_y \frac{e^{ik'_x x + ik'_y y} + i \sqrt{k^2 - k'^2_x - k'^2_y}}{\sqrt{k^2 - k'^2_x - k'^2_y}}
\end{aligned} \tag{3-15}$$

Вернемся к рассмотрению уравнения звукового давления для точечного источника с учётом полученных выше выражений уравнение (3-9) примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
p & = \frac{p_0}{R} e^{ikR} = -4\pi p_0 G^+(\vec{R}) = \\
& = \frac{ip_0}{2\pi} \int dk'_x dk'_y \frac{e^{ik'_x x + ik'_y y} + |z| i \sqrt{k^2 - k'^2_x - k'^2_y}}{\sqrt{k^2 - k'^2_x - k'^2_y}}
\end{aligned} \tag{3-16}$$

Рассмотрим случай расположения источника не в начале координат, а в точке с координатами $(0, z_0)$

$$p = \frac{ip_0}{2\pi} \int dk'_x dk'_y \frac{e^{ik'_x x + ik'_y y + ik_z |z - z_0|}}{k_z} \tag{3-17}$$

С учетом использования метода мнимых источников, можно по аналогии записать уравнение для отраженной волны:

$$p_r = \frac{ip_0}{2\pi} \int dk'_x dk'_y V(k_z) \frac{e^{ik'_x x + ik'_y y + ik_z (z + z_0)}}{k_z} \tag{3-18}$$

где $V(k_z)$ – коэффициент отражения

Для того чтобы уйти от k'_x, k'_y и не рассматривать угол по горизонтали, в уравнении отраженной волны, введем следующие показатели в цилиндрической системе координат. Угол χ будет использоваться в координатном пространстве, а угол ψ будет использоваться в пространстве угловых векторов:

$$x = s \cos \chi ; y = s \sin \chi \quad (3-19)$$

где s – расстояние по горизонтали от источника до точки наблюдения

$$k_x = k_{\parallel} \cos \psi ; k_y = k_{\parallel} \sin \psi \quad (3-20)$$

где k_{\parallel} - горизонтальная проекция вектора k

Подставим значения из уравнений (3-19) и (3-20) в уравнение (3-18) при этом вынесем в отдельный интеграл значения зависящие от k_z . При этом получим во внутреннем интеграле значение функции Бесселя нулевого порядка.

$$\begin{aligned} p_r &= \frac{ip_0}{2\pi} \int_0^{\infty} e^{ik_z(z+z_0)} V(k_z) \frac{k_{\parallel} dk_{\parallel}}{k_z} \int_0^{2\pi} e^{ik_{\parallel} \cos(\psi+\chi)} d\psi = \\ &= ip_0 \int_0^{\infty} e^{ik_z(z+z_0)} V(k_z) J_0(k_{\parallel} s) \frac{k_{\parallel} dk_{\parallel}}{k_z} \end{aligned} \quad (3-21)$$

Рассмотри отдельно функцию Бесселя и произведем переход к функции Ханкеля нулевого порядка первого рода:

$$\begin{aligned} J_0(k_{\parallel} s) &= \frac{1}{2} \left(H_0^{(1)}(k_{\parallel} s) + H_0^{(2)}(k_{\parallel} s) \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left(H_0^{(1)}(k_{\parallel} s) + H_0^{(1)}(-k_{\parallel} s) \right) \end{aligned} \quad (3-22)$$

Подставим результаты из уравнения (3-20) в (3-21) получим уравнение следующего вида:

$$\begin{aligned} p_r &= ip_0 \int_0^{\infty} e^{ik_z(z+z_0)} V(k_z) J_0(k_{\parallel} s) \frac{k_{\parallel} dk_{\parallel}}{k_z} = \\ &= \frac{ip_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_z(z+z_0)} V(k_z) H_0^{(1)}(k_{\parallel} s) \frac{k_{\parallel} dk_{\parallel}}{k_z} \end{aligned} \quad (3-23)$$

Предположим, что коэффициент отражения $V(k_z) \equiv V$, тогда выражение (3-23) примет следующий вид:

$$p_r = \frac{ip_0}{2} V \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{e^{ik_z(z+z_0)} H_0^{(1)}(k_{\parallel} s) \frac{k_{\parallel} dk_{\parallel}}{k_z}}_{-2i \frac{e^{ik \sqrt{r^2 + (z+z_0)^2}}}{\sqrt{r^2 + (z+z_0)^2}}} = p_0 V \frac{e^{ikR_1}}{R_1} \quad (3-24)$$

$$\text{где } R_1 = \sqrt{r^2 + (z + z_0)^2}$$

Рассмотри случай, если коэффициент отражения непостоянен и зависит от угла падения: $V(k_z) = V(\theta)$. Данное обстоятельство наиболее важно для большого расстояния расчета. Для этого начнем решение данной задачи с использованием асимптотики функции Ханкеля, ограничившись первыми двумя членами:

$$H_0^{(1)}(k_{\parallel} s) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi k_{\parallel} s}} e^{i(k_{\parallel} s - \frac{\pi}{4})} \left(1 + \frac{1}{8ik_{\parallel} s} + \dots\right) \quad (3-25)$$

Подставим результаты из уравнения (3-25) в (3-21) получим уравнение следующего вида:

$$\begin{aligned} p_r &= \frac{ip_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_z(z+z_0)} V(k_z) H_0^{(1)}(k_{\parallel} s) \frac{k_{\parallel} dk_{\parallel}}{k_z} \approx \\ &\approx \frac{p_0}{\sqrt{2\pi s}} e^{i\pi/4} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k_{\parallel} s + k_z(z+z_0))} V(k_z) \frac{\sqrt{k_{\parallel}} dk_{\parallel}}{k_z} \end{aligned} \quad (3-26)$$

Для того, чтобы взять получившийся интеграл воспользуемся методом стационарной фазы и примем за стационарную точку $\frac{dw}{dk_{\parallel}} = 0$, тогда:

$$dk_{\parallel} = \frac{ks}{\sqrt{s^2 + (z + z_0)^2}} = k \frac{s}{R_1} = k \sin \theta_0 \quad (3-27)$$

где θ_0 – угол падения волны на поверхность

Теперь разложим выражение $w(k_{\parallel})$ в ряд с учётом результатов, полученных в выражении (3-27) с приближением до трех членов.

$$w(k_{\parallel}) = w(k_{\parallel}) + \frac{1}{2} w''(k_{\parallel 0}) (k_{\parallel} - k_{\parallel 0})^2 \quad (3-28)$$

Подставим уравнение (3-28) в (3-26) тогда:

$$p_r \approx \frac{p_0}{\sqrt{2\pi k R_1 \cos \theta_0}} e^{i\pi/4} e^{i w k_{\parallel 0}} V(\theta_0) \int_{-\infty}^{\infty} e^{\left[\frac{i}{2} w''(k_{\parallel 0})(k_{\parallel} - k_{\parallel 0})^2\right]} dk_{\parallel} \quad (3-29)$$

Интеграл в уравнении (3-26) является табличным интегралом Гаусса тогда:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{\left[\frac{i}{2} w''(k_{\parallel 0})(k_{\parallel} - k_{\parallel 0})^2\right]} dk_{\parallel} = \sqrt{\frac{2\pi}{|w''(k_{\parallel 0})|}} e^{sgn(w''(k_{\parallel 0}))\frac{\pi i}{4}} \quad (3-30)$$

Рассмотрим $w''(k_{\parallel 0})$ и получим следующее выражение:

$$w''(k_{\parallel 0}) = -\frac{R_1}{k \cos^2(\theta_0)} \quad (3-31)$$

Если собрать между собой выражения (3-29), (3-30), (3-31) получим следующее соотношения, которое будет характеризовать отраженную волну от точечного источника шума:

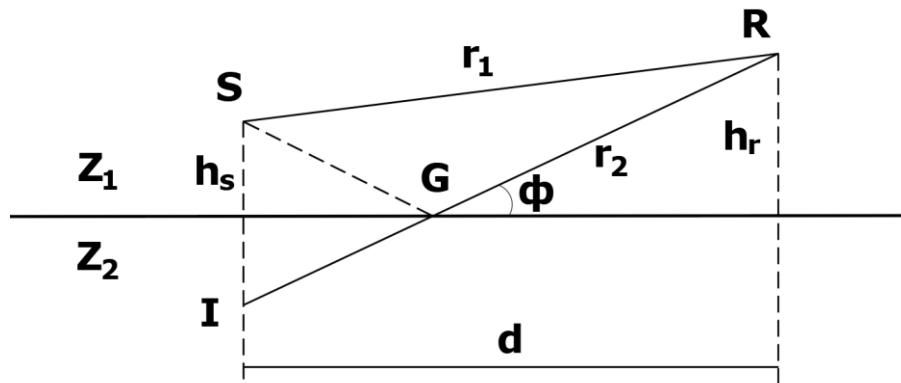
$$p_r \approx \frac{p_0}{R_1} V(\theta_0) e^{i k R_1} \quad (3-32)$$

С учётом решения задачи распространения звуковой волны от автотранспортного потока и расчетов на значительные расстояния, для волнового решения задачи, достаточно применение выражений в пределах приближения геометрической акустики. При этом в расчетах учитывается влияние фазы приходящей отраженной и прямой волны, что позволяет учесть влияния интерференционных процессов на формирующееся звуковое поле.

3.3.3 Определение ожидаемых уровней звука на примагистральной территории

Для расчета ожидаемых уровней звука на примагистральной территории использовалась следующая расчетная схема, показанная на рисунке 3.5. 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 3.5 - Расчетная схема ожидаемых уровней звука на примагистральной территории

С учётом результатов, полученных в формулах (3-9) и (3-32) амплитуда давления p в точке R можно представить, а следующем виде:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{e^{ik_1 r_1}}{r_1} + R_p \frac{e^{ik_1 r_2}}{r_2} \quad (3-33)$$

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 (3-33) сформируем формулу, рекомендуемую для инженерных расчетов при оценке распространения звука от автотранспортных потоков на примагистральной территории:

$$L_{dec} = 20 \log(A_{div} + A_{grad}) \quad (3-34)$$

где $A_{div} = \frac{e^{ik_1 r_1}}{r_1}$

$$A_{grd} = R_p \frac{e^{ik_1 r_2}}{r_2}$$

3.3.4 Определение ожидаемых уровней звука на территории прилегающей к фасаду

Для оценки ожидаемых уровней звука у фасада многоэтажных зданий, необходимо учитывать звуковую энергию, отражённую от самого здания. Для этого предлагаемую выше методику необходимо дополнить показателем, оценивающим отражение звука от поверхности фасада.

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

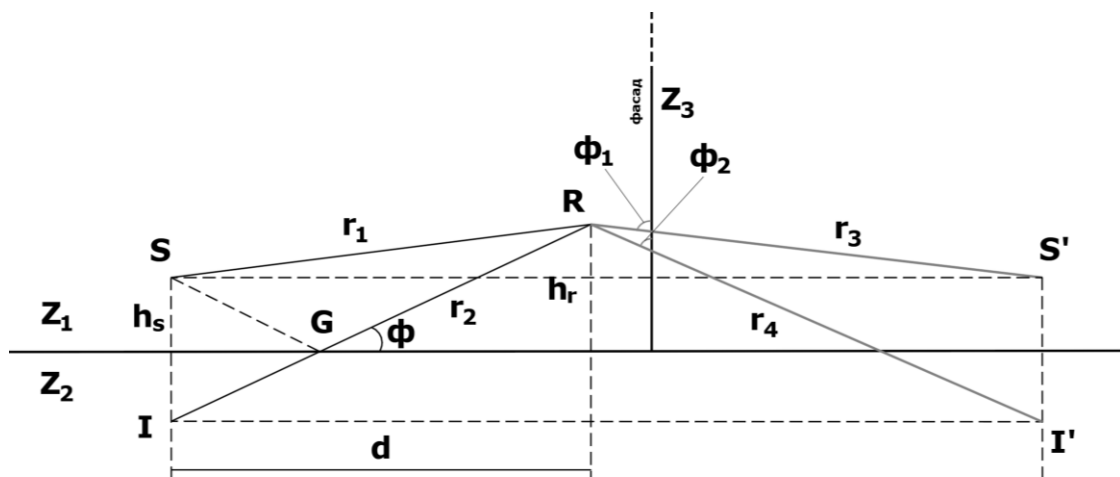


Рисунок 3.6 - Расчетная схема ожидаемых уровней звука на территории прилегающей к фасаду

Для учёта отражения от фасада введем дополнительные показатели, учитывающие характеристику отражения от фасада R_{pbld_S} и R_{pbld_I} , в этом случае формула (3-33) примет следующий вид:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{e^{ik_1 r_1}}{r_1} + R_p \frac{e^{ik_1 r_2}}{r_2} + R_{pbld_S} \frac{e^{ik_1 r_3}}{r_3} + R_p R_{pbld_I} \frac{e^{ik_1 r_4}}{r_4} \quad (3-35)$$

где $R_{p\ bld_s} = \frac{\sin \phi_1 - \frac{Z_1}{Z_3}}{\sin \phi_1 + \frac{Z_1}{Z_3}}$ – коэффициент отражения от фасада здания мнимого

источника шума S’;

$R_{p\ bld_l} = \frac{\sin \phi_2 - Z_1/Z_3}{\sin \phi_2 + Z_1/Z_3}$ - коэффициент отражения от фасада здания мнимого

источника шума Г’;

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

r_4 – расстояние от мнимого источника Г’ до приемника;

Z_3 – акустический импеданс поверхности фасада.

В итоге получим следующую формулу в логарифмическом виде для оценки акустического поля у фасада многоэтажного здания:

$$L_{dec} = 20 \log(A_{div} + A_{grd} + A_{div\ bld} + A_{grd\ bld}) \quad (3-36)$$

где

$$A_{div\ bld} = R_{p\ bld_s} \frac{e^{ik_1 r_3}}{r_3}$$

$$A_{grd\ bld} = R_p R_{p\ bld_l} \frac{e^{ik_1 r_4}}{r_4}$$

Выводы по главе

1. Описана методика разбиения линейного источника шума на серию эквивалентных точечных источников шума, что позволит учитывать криволиненность и ограниченность протяженности дорог в городских условиях.

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

3. Математическая модель распространения акустического поля на примагистральных территориях, основанная на представлении о теории волновой акустики, излучаемого автотранспортным потоком;

Были разработаны следующие расчетные схемы и математические модели:

– методика расчета шума от автотранспортного потока на примагистральной территории;

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

Глава 4. Методические основы проведения экспериментальных исследований

4.1 Измерения шумовых характеристик потоков автомобильного транспорта

Измерения шумовых характеристик автотранспортного потока проводятся согласно методике, представленной в ГОСТ 20444–2014 «Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики» [69], с целью анализа затухания звука при распространении на местности и по высоте фасадов многоэтажных зданий.

Измерения проводятся на прямых участках элементов улично-дорожной сети и автомобильных дорог общего пользования, при этом расстояние до перекрёстков, площадей и остановочных пунктов должно составлять не менее 150 м, скорость движения потока транспорта должна быть установившейся.

Оценка шумовой характеристики потока проводится параллельно с измерениями на территории, прилегающей к автотранспортным магистралям и на фасадах многоэтажных зданий. По результатам измерений получают характеристику эквивалентного и максимального уровня звука, дБА, уровня звукового давления, дБ.

Измерения не проводятся при скорости ветра более 5 м/с, во время дождя или тумана, а также при мокром дорожном покрытии. Если скорость ветра была 1-5 м/с, применяется специальное штатное устройство для защиты мембраны микрофона от ветра, которое надевается на микрофон и позволяет предотвратить искажения результатов измерений.

Во время проведения натурных измерений ось микрофона ориентирована в сторону потока транспорта и расположена перпендикулярно дороге. Расстояние от микрофона до оси ближайшей полосы движения составляет $7,5 \pm 0,2$ м. Высота расположения микрофона составляет $1,5 \pm 0,1$ м от уровня проезжей части как показано на рисунке 4.1. Вблизи точки

измерений на расстоянии не менее 5,0 м отсутствовали отражающие поверхности.

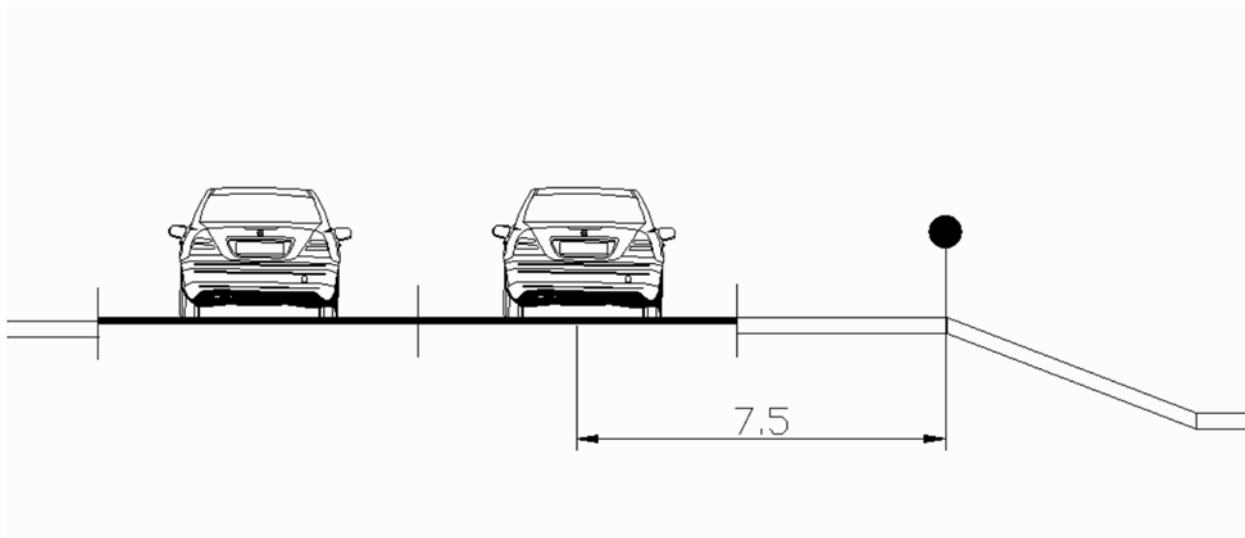


Рисунок 4.1– Расположение микрофона при измерении шумовой характеристики автодороги

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

В период проведения измерений контролировать, уровни фонового шума, с соблюдением различия не менее 10 дБ (дБА). В случае, если определение уровней фонового шума было невозможно, его влияние не учитывалось.

Измерения проводить шумомером 1-го класса, имеющим свидетельство о поверке, калибровку средства измерения проводить до и после каждой серии измерений.

По результатам проведения измерений необходимо заносить данные в таблицу 4.1, с указанием полученных шумовых характеристик.

Таблица 4.1 – Результаты измерений шумовой характеристики автотранспортного потока

Участок проведения измерений	Период	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Эквивалентный уровень звука, дБА	Максимальный уровень звука, дБА	
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000			8000

Параллельно фиксируются условия проведения измерений и условия движения в формате таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Условия движения (указать или выбрать из предложенного)

Температура, °С	
Скорость ветра (не более 5 м/с), м/с	
Тип шин (шипованные-нешипованные)	
Перекрестки (есть-нет)	
Расположение дороги (в нулевой отметке, на насыпи, на эстакаде, на двухъярусной эстакаде с указанием высоты)	
Уклон дороги, %	
Количество полос движения	
Разделительная полоса, м	
Режим движения (разгон, торможение или постоянная скорость)	
Тип и возраст дорожного покрытия (асфальтобетон, ЩМА, крупнозернистый бетон; колеи, трещины, другие повреждения дорожного покрытия)	

4.2 Измерения шума на примагистральной территории и у территории прилегающей к фасаду

Измерения проводятся по методике, основанной на ГОСТ 23337–2014 «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий» [70].

Измерения не проводятся при скорости ветра более 5 м/с, во время дождя или тумана, а также при мокром дорожном покрытии. Если скорость ветра была 1-5 м/с, применяется специальное штатное устройство для защиты мембраны микрофона от ветра, которое надевается на микрофон и позволяет предотвратить искажения результатов измерений.

Измерения шума проводились от автомобильных дорог, в периоды максимальной интенсивности движения автотранспорта.

При проведении измерений были оценены уровни звукового деления, дБ, эквивалентный и максимальный уровни звука, дБА.

При проведении измерений на примагистральной территории микрофон располагается на высоте $(1,5 \pm 0,1)$ м. в точках с шагом удвоения расстояния от 7,5 м до 60 м, при этом проводилась оценка влияния подстилающей

поверхности на акустическое состояние среды, для этого дополнительно выбиралась точки с шагом 0,5 м по высоте до 3 м.

На территории, прилегающей к фасаду зданий измерения, проводились в точках, расположенных на расстоянии 2 м от фасадов по всей высоте здания. Расстояние от ближайшей оси движения автомобильной дороги до здания составляет не менее 7,5 м. Микрофон был направлен в сторону источника шума.

В каждой точке выполнялась серия из 3 измерений. Продолжительность каждого измерения была не менее 5 мин. Если результаты отдельных измерений различались между собой более чем на 3 дБА, проводили дополнительные измерения в тех же точках числом не менее 2. При отличии результатов на величину менее 3 дБА, учитывалось их среднеарифметическое значение.

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

В период проведения измерений контролировать, уровни фонового шума, с соблюдением различия не менее 10 дБ (дБА). В случае, если определение уровней фонового шума было невозможно, его влияние не учитывалось.

Измерения проводить шумомером 1-го класса, имеющим свидетельство о поверке, калибровку средства измерения проводить до и после каждой серии измерений.

Условия проведения измерений вносились в таблицу 4.3 Результаты измерений в таблицу 4.4.

Таблица 4.3 – Условия проведения измерений

Температура, °С	
Скорость ветра (не более 5 м/с), м/с	
Тип поверхности (грунт, асфальт, трава)	

Высота здания (этажность)	
Ситуационный план территории с указанием расположения зданий, транспортных дорог и точек измерения	

Таблица 4.4 – Результаты измерений (для каждого измерения)

№ измерения	Номер расчетной схемы	Адрес	Эквивалентный уровень звука, дБА	Максимальный уровень звука, дБА
1				
2				
3				

Места проведения измерений

Измерения шумовых характеристик потока автотранспорта проводятся для автомобильных дорог общего пользования, магистральных городских дорог и улиц, перечень приведен ниже:

- г. Санкт-Петербург, проспект Тореза, 112к1 (Смешенное покрытие);
- г. Санкт-Петербург, Кушелевская дорога, 3к2 (Смешенное покрытие);
- г. Санкт-Петербург, Северный проспект, 63к1 (Смешенное покрытие);
- г. Санкт-Петербург, Северный проспект (Травяное покрытие);
- г. Санкт-Петербург, пр. Маршала Блюхера (Травяное покрытие);
- г. Санкт-Петербург, Светлановский пр. (Снежное покрытие).

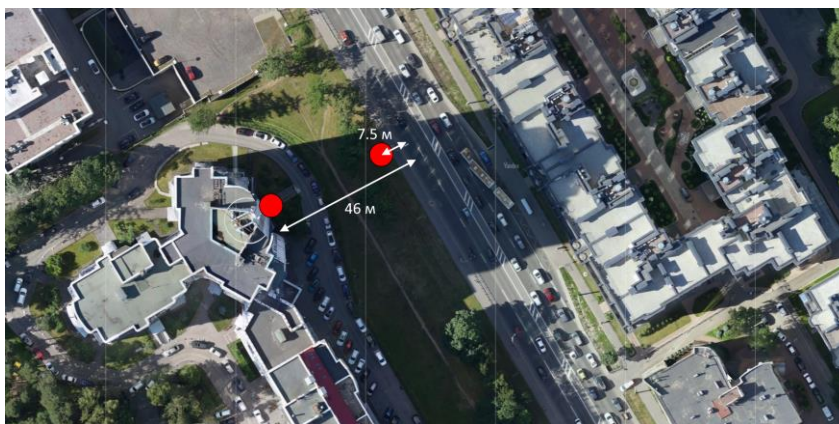


Рисунок 4.2– Место проведения испытаний (проспект Тореза, 112к1)



Рисунок 4.3– Место проведения испытаний (Кушелевская дорога, 3к2)



Рисунок 4.4– Место проведения испытаний (Северный проспект, 63к1)



Рисунок 4.5– Место проведения испытаний (Северный проспект)



Рисунок 4.6– Место проведения испытаний (проспект Маршала Блюхера)



Рисунок 4.7– Место проведения испытаний (Светлановский пр.)

4.3 Измерения шума над проезжей частью

Для оценки распределения акустического поля над дорожным полотном необходимо производить измерение непосредственно над каждой из полос движения.

Измерения проводятся на прямых участках движения автотранспорта со стабилизированным скоростью 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.

Оценивается характерный для автотранспортного потока, как непостоянного источника шума, эквивалентный уровень звука, дБА.

Измерения проводятся в период отсутствия атмосферных осадков, тумана и скорости ветра менее 5 м/с.

Во время проведения натурных измерений ось микрофона должна быть сориентирована в сторону потока транспорта и расположена перпендикулярно полотну дороги.

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

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

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

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

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

Места проведения измерений

Городские дороги

4 полосы движения на проезжую часть.



Рисунок 4.8– Место проведения испытаний (пр. Испытателей. г. Санкт-Петербург)
3 полосы движения на проезжую часть.

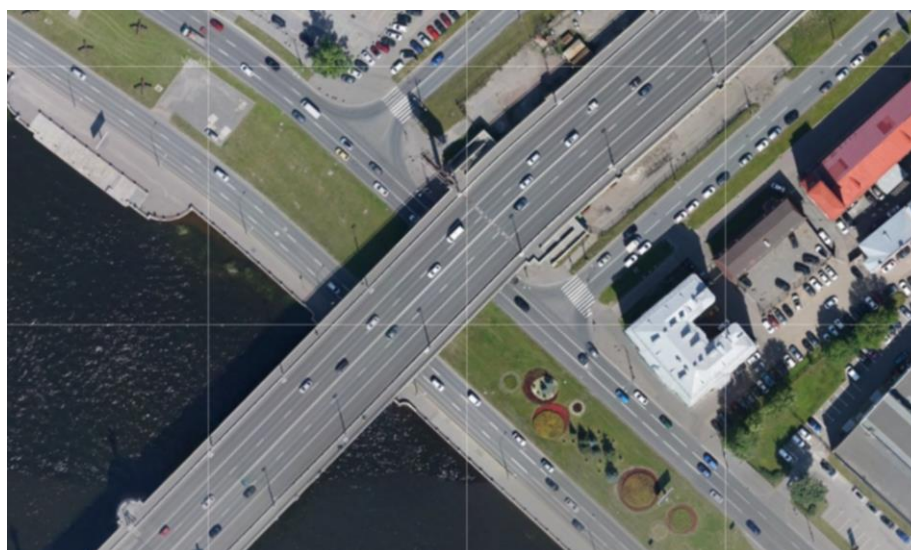


Рисунок 4.9– Место проведения испытаний (Выборгская наб./ Кантемировский мост)

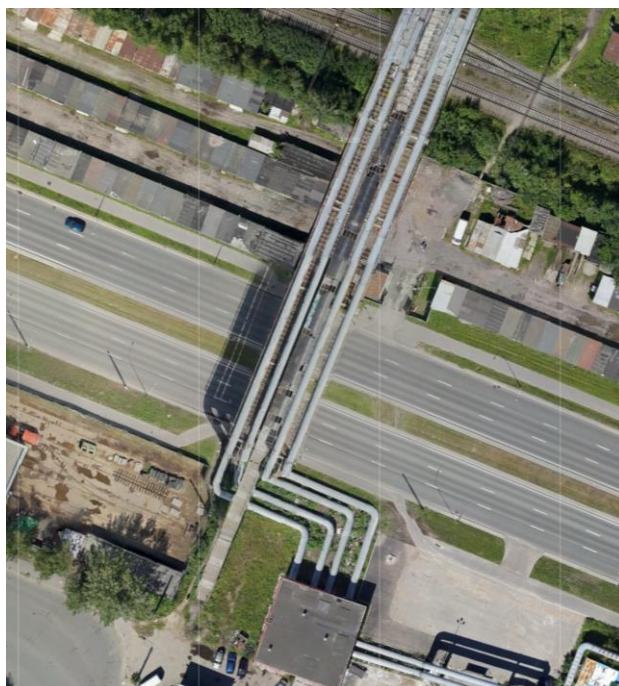


Рисунок 4.10– Место проведения испытаний (Суздальский пр.)
2 полосы движения на проезжую часть

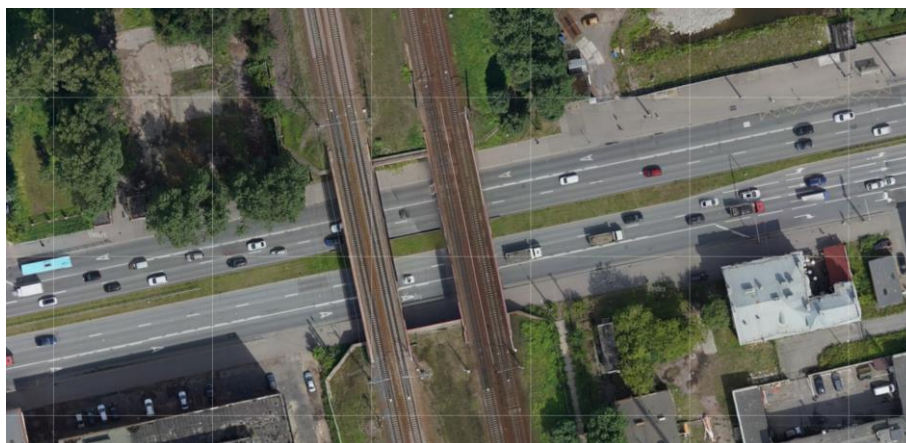


Рисунок 4.11– Место проведения испытаний (Кантемировский пр.)

Федеральные дороги общего пользования

2 полосы движения на проезжую часть



Рисунок 4.12– Место проведения испытаний (КАД. от ЗСД до Приморское ш.)



Рисунок 4.13– Место проведения испытаний (Приозерское шоссе в районе Мистолово)

3 полосы движения на проезжую часть



Рисунок 4.14– Место проведения испытаний (КАД. В районе посёлка Петергоф Сити)



Рисунок 4.15– Место проведения испытаний (КАД. Участок от Энгельса к Выборгскому ш.)

4 полосы движения на проезжую часть



Рисунок 4.16– Место проведения испытаний (КАД. Участок ЗСД)

4.4 Измерительная аппаратура

Измерения проводились шумомерами 1-го класса, имеющими действующие свидетельства о поверке. Измерительная аппаратура соответствовала требованиям, предъявляемым ГОСТ Р 53188.1-2019 [146] и ГОСТ Р 70024.2-2022 [147].

Для проведения экспериментальных исследований использовалась следующая аппаратура, перечень которой приведен в таблице 4.5.

Вспомогательные устройства включают адаптеры для передачи телеметрических данных, кабели и штативы.

До и после каждой серии измерений проводилась проверка калибровки средств измерения согласно «Государственной поверочной схеме для средств измерений звукового давления в воздушной среде и аудиометрических шкал» [148].

Таблица 4.5 – Перечень средств измерения

№ п.п.	Наименование	Зав.№	Микрофон	Предусилитель
1	Шумомер-анализатор спектра	110096	ВМК-205 зав. № 6918	P200 зав. № 112671

№ п.п.	Наименование	Зав.№	Микрофон	Предусилитель
2	Шумомер-анализатор спектра Октава-110А	120118	В&К 4133 зав. № 532365	P200 зав. № 154329
3	Шумомер-виброметр, анализатор спектра Экофизика-110А	БА170428	ВМК-205 зав. № 5538	P200 зав. № 175187
4	Шумомер-виброметр, анализатор спектра Экофизика-110А	БА170427	ВМК-205 зав. № 5942	P200 зав. № 175191

4.5 Обработка результатов измерений

Результаты измерений обрабатывались по стандартной методике в соответствии с требованиями ГОСТ 20444-2014 [69], а также с учетом положений ГОСТ 23337-2014 [70].

Условия проведения измерений выбраны так, чтобы все коррекции, вносимые в соответствии с указанными ГОСТами, были равны нулю, поэтому они не учитывались в результатах измерений.

Погрешность результатов измерений шумовых характеристик потоков транспорта оценена в соответствии с ГОСТ 31296.2 [149] при помощи расширенной неопределенности измерений, которая зависит от параметров источника шума, длительности измерения, расстояния до измерительной точки и других условий проведения измерений.

Расширенная неопределенность измерений $U(N)$ шумовых характеристик потоков транспорта оценивалась при помощи одностороннего интервала охвата усредненного уровня звука, дБА, уровня доверия N , %, и коэффициента охвата k по формуле:

$$U(N) = ku \quad (4-1)$$

где k – коэффициент охвата ($k=2$ с уровнем доверительной вероятности $N=95\%$),

u – стандартная неопределенность измерения, дБА.

Таким образом, 95% значений, полученных при тех же условиях, будут ниже величины верхней границы интервала охвата, которая определяется как $(\bar{L}_{Aeq} + U)$.

Расширенная неопределенность измерений была определена в несколько этапов:

1. Вычислялись средние значения эквивалентных уровней звука в данной точке по формуле:

$$\bar{L}_{Aeq} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} - 10 \lg n \quad (4-2)$$

где L_i – значения измеренного уровня звука и откорректированного, дБА,

$i = 1, 2, 3, \dots, n$,

n – общее количество измерений.

2. Для каждой серии измерений была рассчитана неопределенность по типу А, обусловленная погрешностью измерительной методики и условиями измерений, которая определяется как:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}_{Aeq})^2}{n(n-1)}} \quad (4-3)$$

3. Была оценена неопределенность по типу В, которая зависит от погрешностей измерительных приборов и калибровки. Данная неопределенность рассчитывается по формуле:

$$u_B = \frac{\Delta L_{\text{инстр}}}{\sqrt{3}} \quad (4-4)$$

где $\Delta L_{\text{инстр}}$ – погрешности инструментальных измерений уровней звука, дБА.

4. Расширенная неопределенность измерения (95%) рассчитывалась по формуле:

$$U(95\%) = 2\sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (4-5)$$

При этом верхнюю границу интервала охвата можно определить как:

$$\bar{L}_{A_{eq}} + U(95\%) \quad (4-6)$$

При такой оценке в качестве шумовой характеристики транспортного потока или уровня звука в расчетной точке принимается величина:

$$L_{A_{eq}} = \bar{L}_{A_{eq}} + U(95\%) \quad (4-7)$$

Выводы по главе

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

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

Глава 5. Апробация результатов расчетных методик и рекомендации для дополнения нормативно-технической документации

5.1 Апробация измерений и расчетной методики распределения звукового поля над проезжей частью

Для подтверждения предположений из результатов статистической обработки и подтверждения, предложенной в главе 2, расчетной методики, был проведен ряд натуральных измерений, описанный в главе 3 и 4, с целью подтверждения сходимости результатов статистической обработки и подтверждения возможности применения расчетной методики, для результатов натуральных измерений

5.1.1 Результаты апробации результатов измерений и расчетной методики

Проведен анализ осредненных результатов серии измерений (Таблица , Таблица) и сравнение их с результатами полученным по расчетной методике предложенной в работе, результаты представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнение результатов натурных измерений и результатов расчета

Адрес	Период измерений	Кол-во полос движения на ПЧ	Хар-ка потока движения		Положение акустического центра по результатам измерений, м	Положение акустического центра согласно расчетам, м
			Общ. инт.	% ГА		
Городских дороги						
Кантемировский пр	-	2	2100	6,7	3,5	3,5
Кантемировский мост	-	3	2100	5,7	5,25	5,25
Суздальский пр.	-	3	1421	2,5	5,38	5,25
Проспект Испытателей	-	4	2220	3,6	6,85	7
Федеральные дороги						
Участок КАД от ЗСД до Приморского ш.	1	2	1000	24,0	3,22	3,3
	2		920	17,4	3,33	3,4
	3		1200	23,3	3,22	3,3
	4		1440	8,3	3,22	3,4
Приозерское шоссе в районе Мистолово	1	2	3000	24,7	2,78	2,6
	2		1040	23,1	3,22	3,3
Участок КАД. В районе посёлка Петергоф Сити	1	3	2480	12,9	5,48	5,5
	2		2260	4,4	5,33	5,5
	3		2540	3,9	5,48	5,7
Участок КАД от Энгельса к Выборгскому ш.	1	3	3000	26,0	5,9	5,7
	2		3580	13,4	5,77	5,7
Участок ЗСД. Васильевский остров	1	4	74860	18,2	7,53	7,6
	2		73400	17,3	7,46	7,6

Результаты измерений подтвердили выводы представленные в Главе 2, о равномерном распределении потока и доли грузового автотранспорта по полосам движения городских дорог и неравномерности для дорог федерального уровня, с отклонением от методики определения акустического центра автотранспортного потока не более чем на 0,2 м.

5.2 Апробация результатов расчета методики расчета ожидаемых уровней шума на примагистральной территории и на территории прилегающей к фасаду

Для подтверждения методики расчета ожидаемого звукового поля, предложенной в Главе 3, необходима проверка результатов расчета. Сравнение будет проводиться с результатами расчетов по методу конечных элементов и результатами измерений.

5.2.1 Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и методу конечных элементов

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

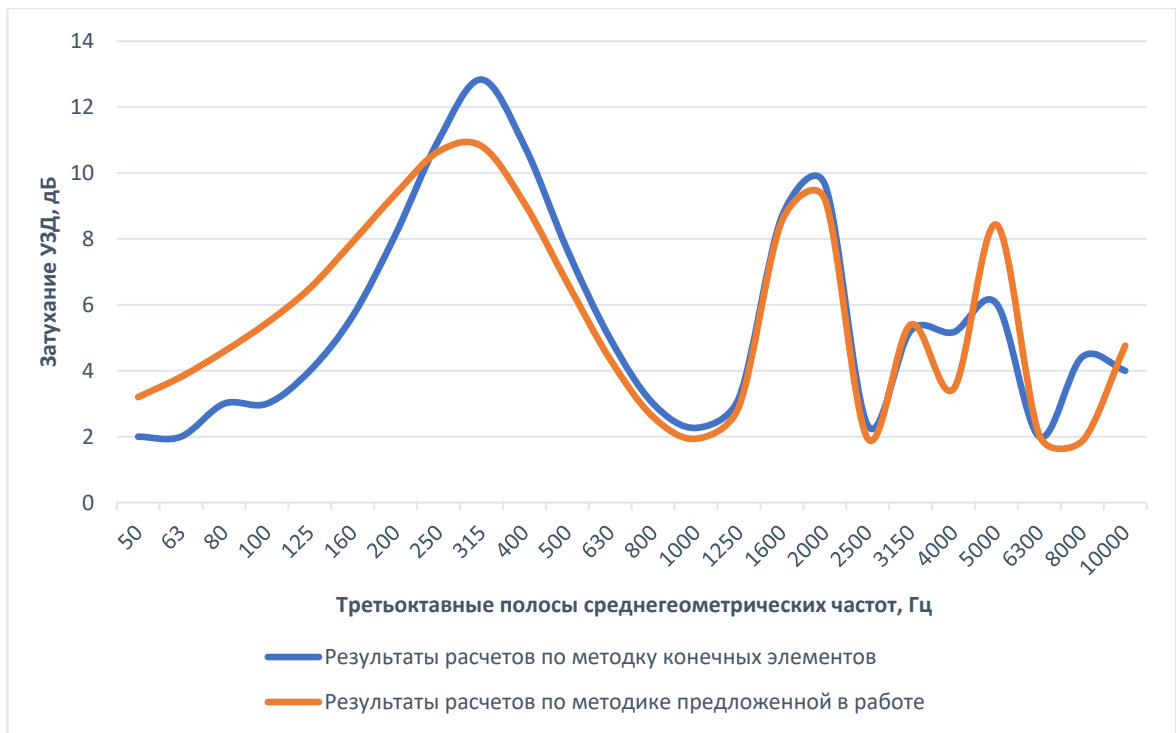


Рисунок 5.1– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и методике конечных элементов для примагистральной территории (15 метров, снежное покрытие)



Рисунок 5.2– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и методике конечных элементов для примагистральной территории (15 метров, травяное покрытие)



Рисунок 5.3– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и методике конечных элементов для примагистральной территории (15 метров, бетонное покрытие)

По результатам расчетов можно сделать вывод, что значения, получаемые по предложенной формуле (3-34) и методу конечных элементов показали хорошую сходимость, с максимальным расхождением ± 3 дБ на треть октавную полосу частот, а в среднем расхождение составило ± 1 дБ.

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

5.2.2 Сравнение результатов расчёта и измерений влияния подстилающей поверхности на ожидаемые уровни на примагистральной территории

Проведен анализ осредненных результатов серии измерений подводимых на примагистральной территории на высоте от 0,5 до 3 м, с шагом 0,5 м (Таблица , Таблица) и сравнение их с результатами полученным по

расчетной методике, предложенной в разделе 3.3.3, с целью проверки корректности расчетной методики и анализа влияния подстилающей поверхности на ожидаемые уровни звука.

Сравнение проводилось для переходов по высоте от 0,5 к 1,0 м, от 1,5 к 2,0 м и от 2,5 м до 3,0 м. Измерения и расчеты проводились для травяного покрытия.

Рассмотрим результаты расчетов для расстояния 15 м. Сравнения результатов представлены на рисунках 5.4 - 5.6.



Рисунок 5.4– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для примагистральной территории (15 метров, от 0,5 до 1,0 м, травяное покрытие)

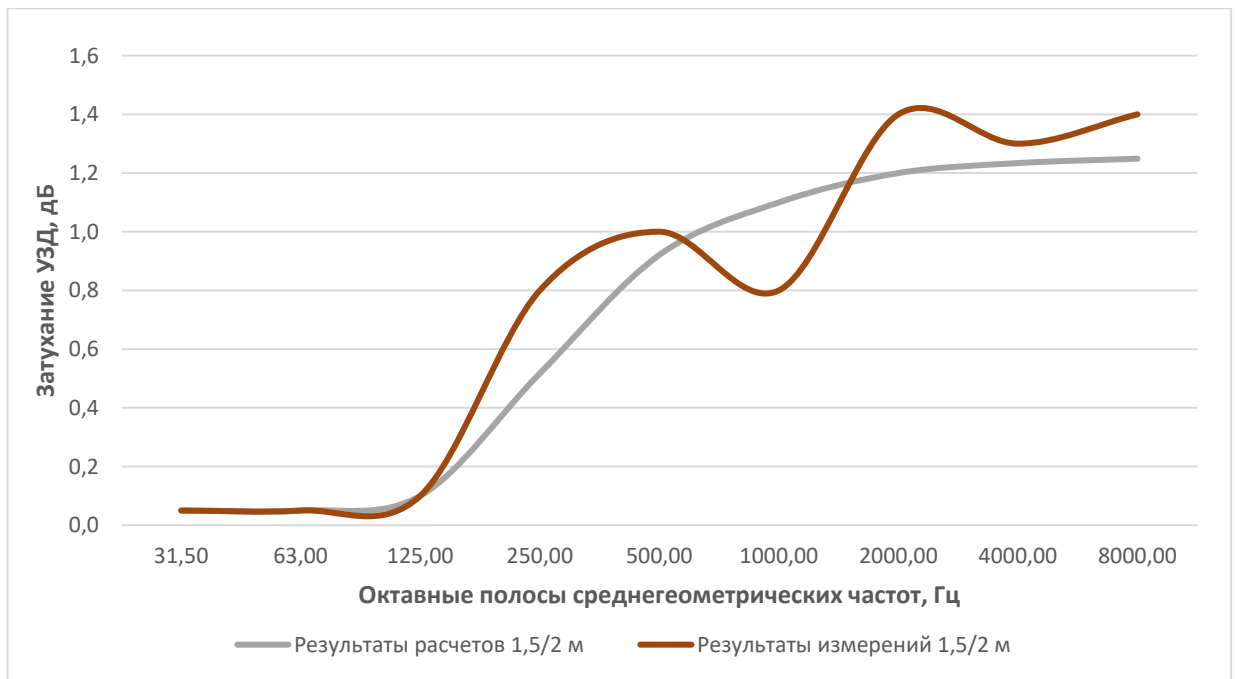


Рисунок 5.5– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для примагистральной территории (15 метров, от 1,5 до 2,0 м, травяное покрытие)

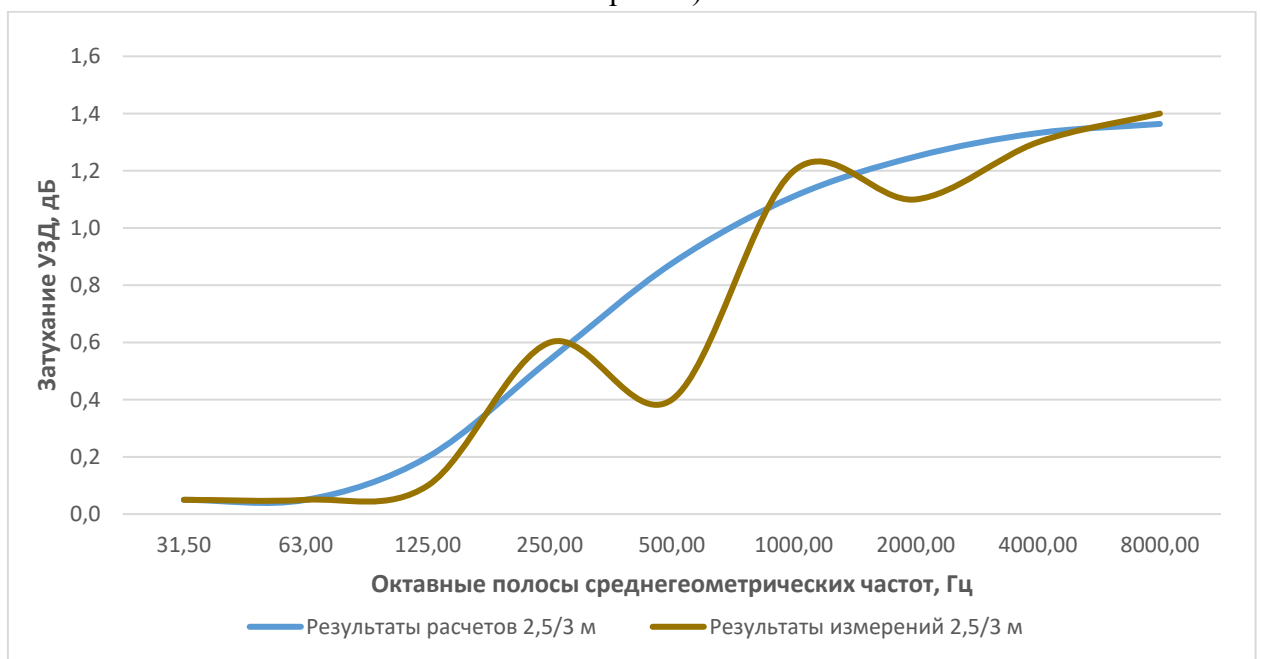


Рисунок 5.6– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для примагистральной территории (15 метров, от 2,5 до 3,0 м, травяное покрытие)

По результатам анализа результатов расчета и натуральных измерений, на расстоянии 15 м от источника шума, можно сделать вывод, о сходимости результатов до 2 дБ по уровням звукового давления. При этом существенное

влияние подстилающей поверхности проявляется до 2,0 м от поверхности земли.

Рассмотрим результаты расчетов для расстояния 30 м. Сравнения результатов представлены на рисунках 5.7 - 5.9.

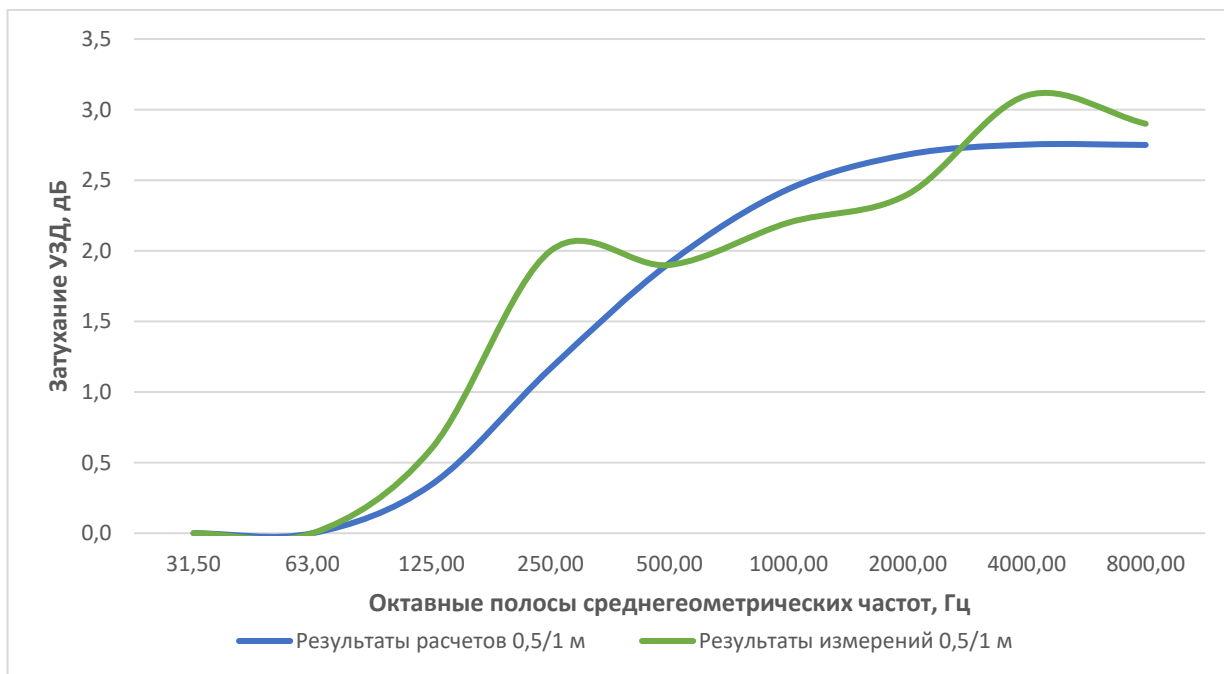


Рисунок 5.7– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для примагистральной территории (30 метров, от 0,5 до 1,0 м, травяное покрытие)



Рисунок 5.8– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для примагистральной территории (30 метров, от 1,5 до 2,0 м, травяное покрытие)

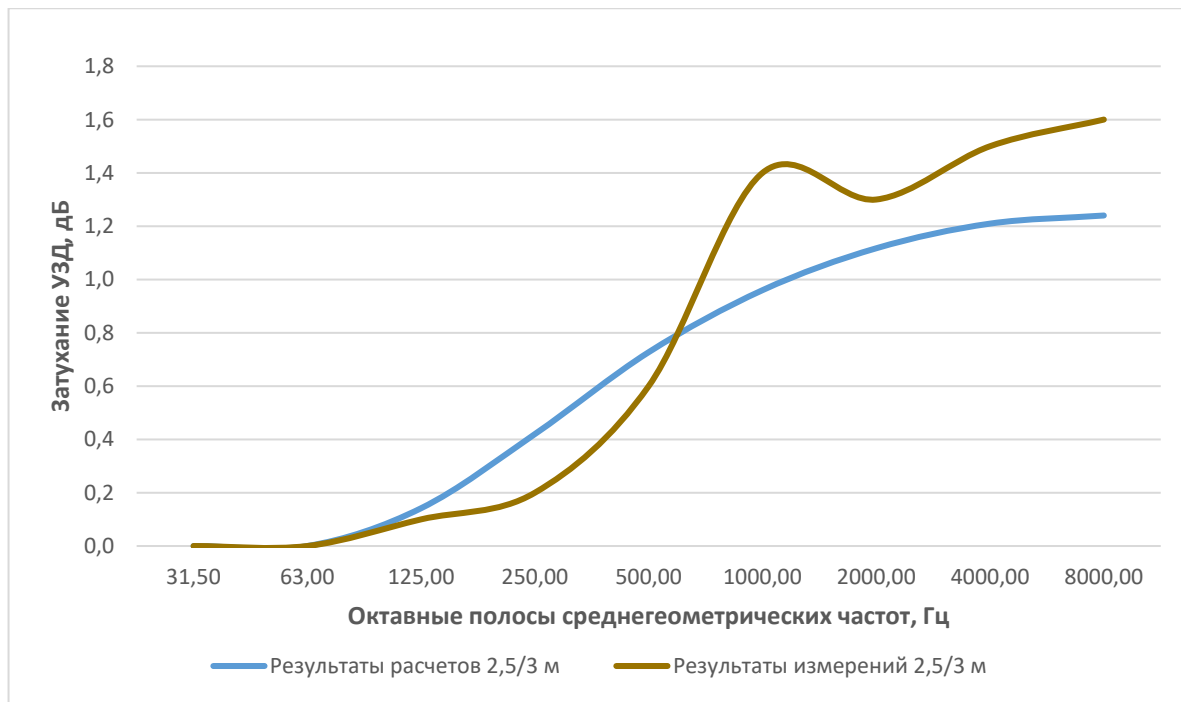


Рисунок 5.9– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для примагистральной территории (30 метров, от 2,5 до 3,0 м, травяное покрытие)

По результатам анализа результатов расчета и натуральных измерений, на расстоянии 30 м от источника шума, можно сделать вывод, о сходимости результатов до 2 дБ по уровням звукового давления. При этом существенное влияние подстилающей поверхности проявляется до 2,5 м от поверхности земли.

Рассмотрим результаты расчетов для расстояния 60 м. Сравнения результатов представлены на рисунках 5.10 - 5.12.

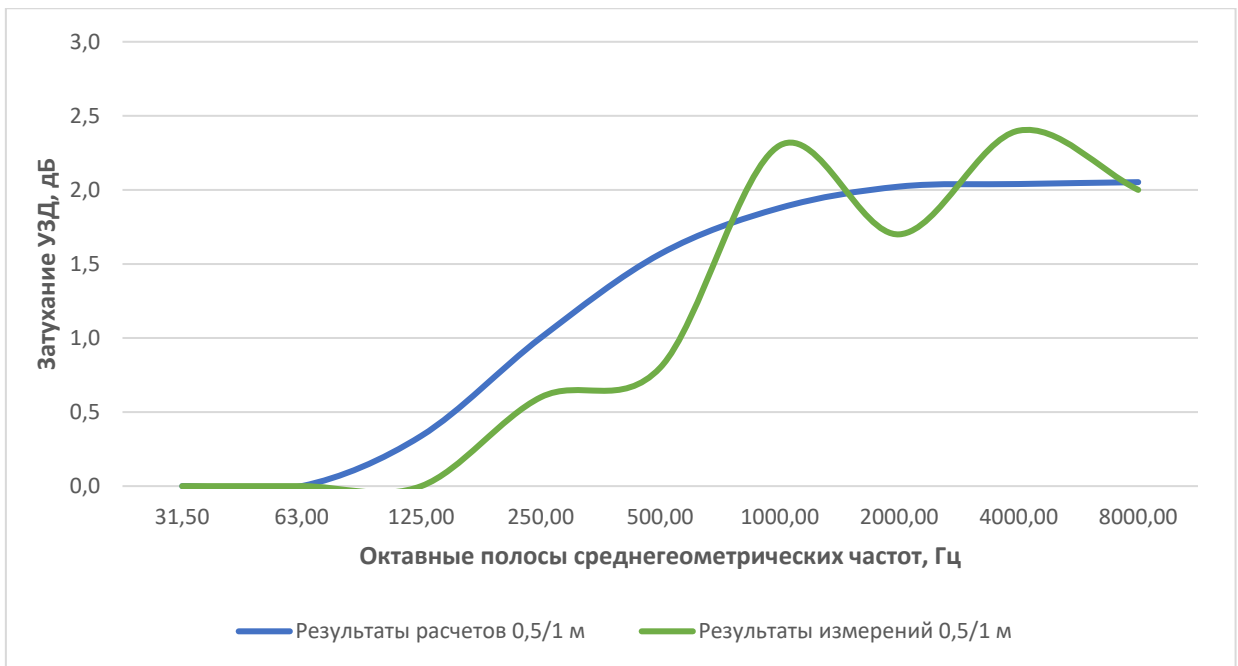


Рисунок 5.10– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для примагистральной территории (60 метров, от 0,5 до 1,0 м, травяное покрытие)

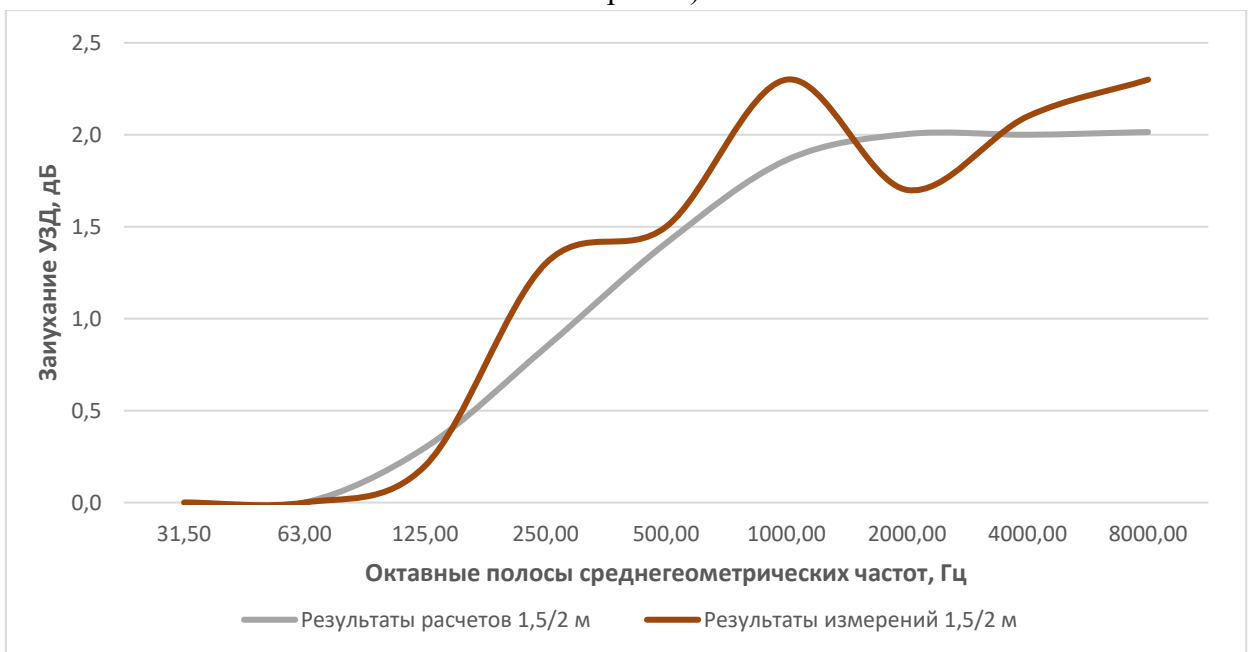


Рисунок 5.11– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для примагистральной территории (60 метров, от 1,5 до 2,0 м, травяное покрытие)

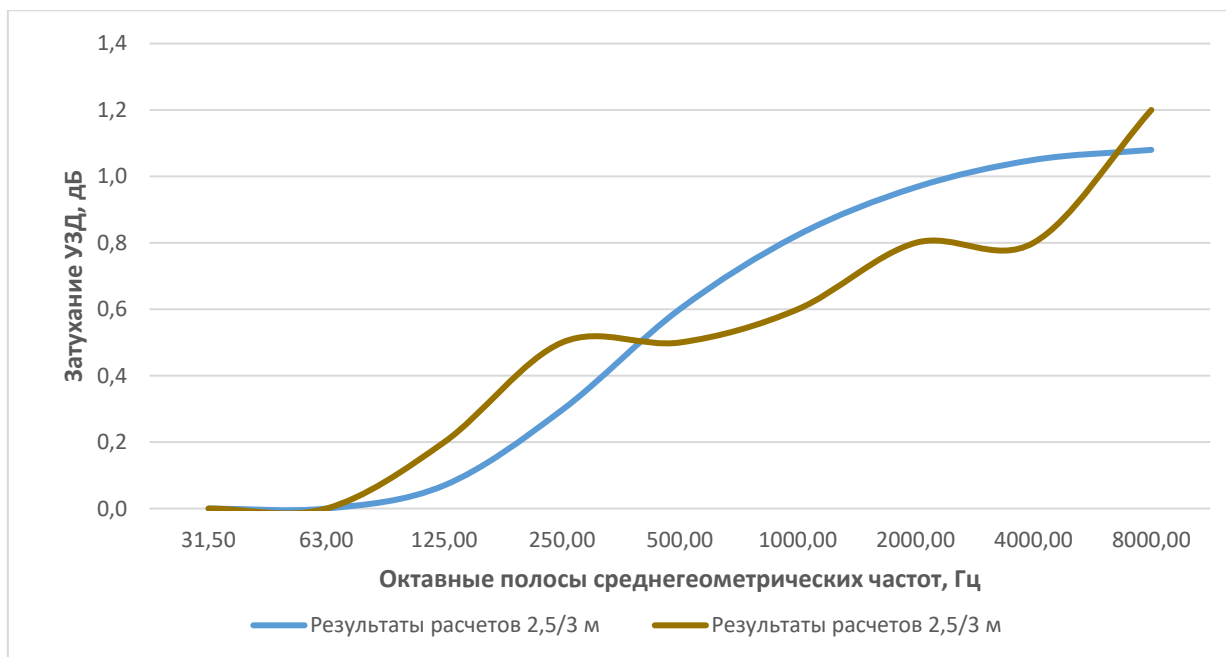


Рисунок 5.12– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для примагистральной территории (60 метров, от 2,5 до 3,0 м, травяное покрытие)

По результатам анализа результатов расчета и натуральных измерений, на расстоянии 60 м от источника шума, можно сделать вывод, о сходимости результатов до 2 дБ по уровням звукового давления. При этом существенное влияние подстилающей поверхности проявляется до 3,0 м от поверхности земли.

При этом по результатам расчетов по ГОСТ 31295.05 влияние подстилающей поверхности, с коэффициентом звукопоглощения равном 1, при остальных аналогичных условиях, показывает влияние не более 2 дБ по УЗД и менее 1 дБА по УЗ, для перехода от 0,5 м к 1,0 м, для переходов от 1,0 до 3,0 м влияние подстилающей поверхности составляет не более 0,2 дБ, что не соответствует результатам натуральных измерений.

Предложенная в работе методика позволяет с большей точностью учесть влияние подстилающей поверхности на ожидаемые уровни звука на примагистральной территории.

5.2.3 Сравнение результатов расчёта и измерений на территории прилегающей к фасаду

Проведен анализ осредненных результатов серии измерений подводимых на территории прилегающей к фасаду многоэтажного здания (Таблица , Таблица) и сравнение их с результатами полученным по расчетной методике, предложенной в разделе 3.3.4, с целью проверки корректности расчетной методики и анализа распределения акустического поля на фасаде здания.

Сравнение проводилось для территории, прилегающей к фасаду, расположенному на расстоянии 40 м, с травяным подстилающим поверхностью, с высотой здания 50 метров (16 этажей). Результаты представлены на рисунках 5.13 - 5.21.

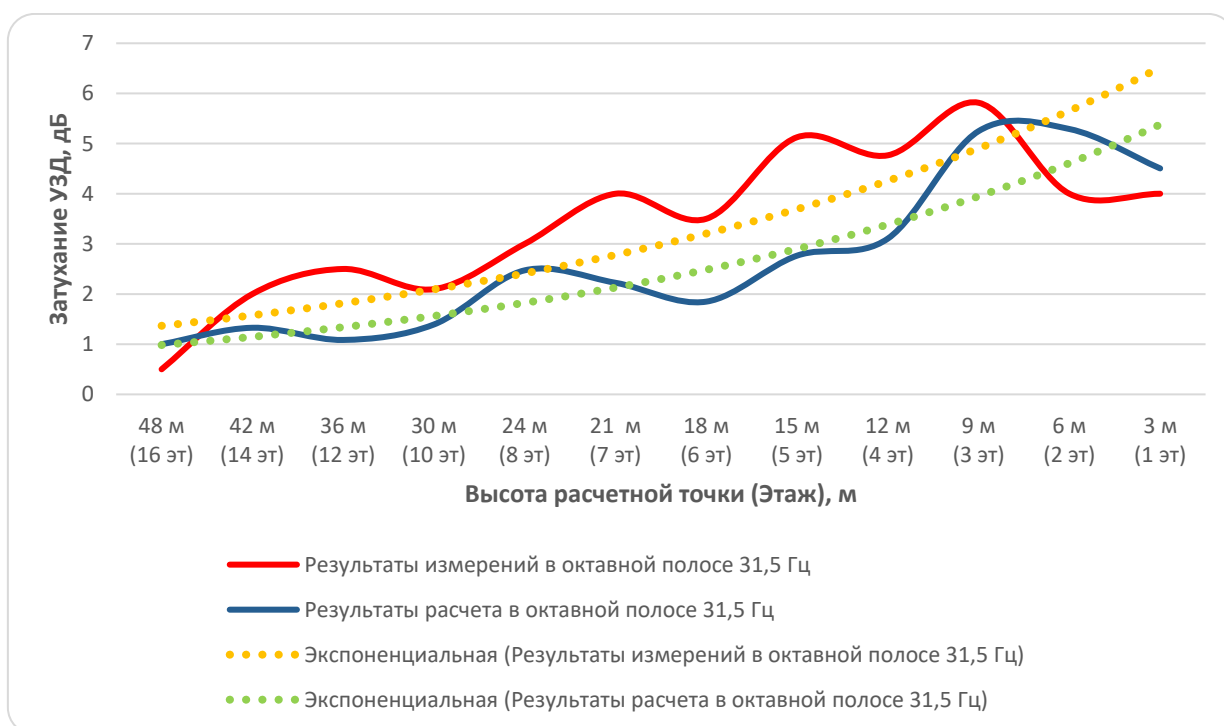


Рисунок 5.13– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 31,5 Гц

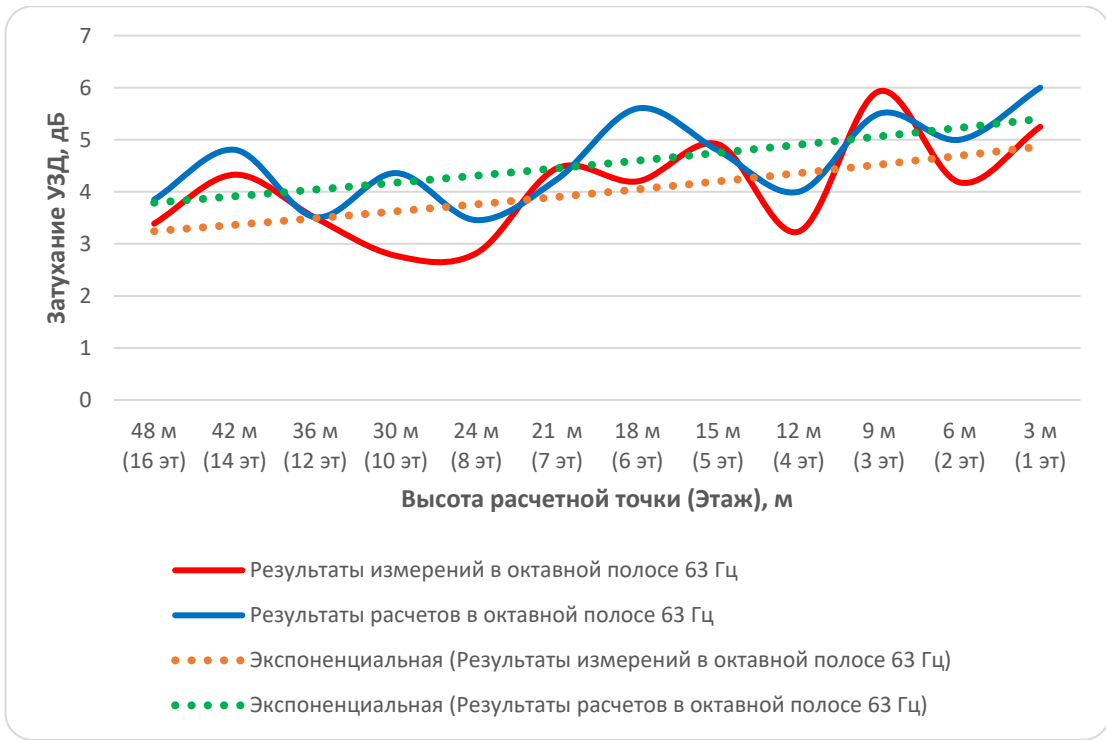


Рисунок 5.14— Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 63 Гц

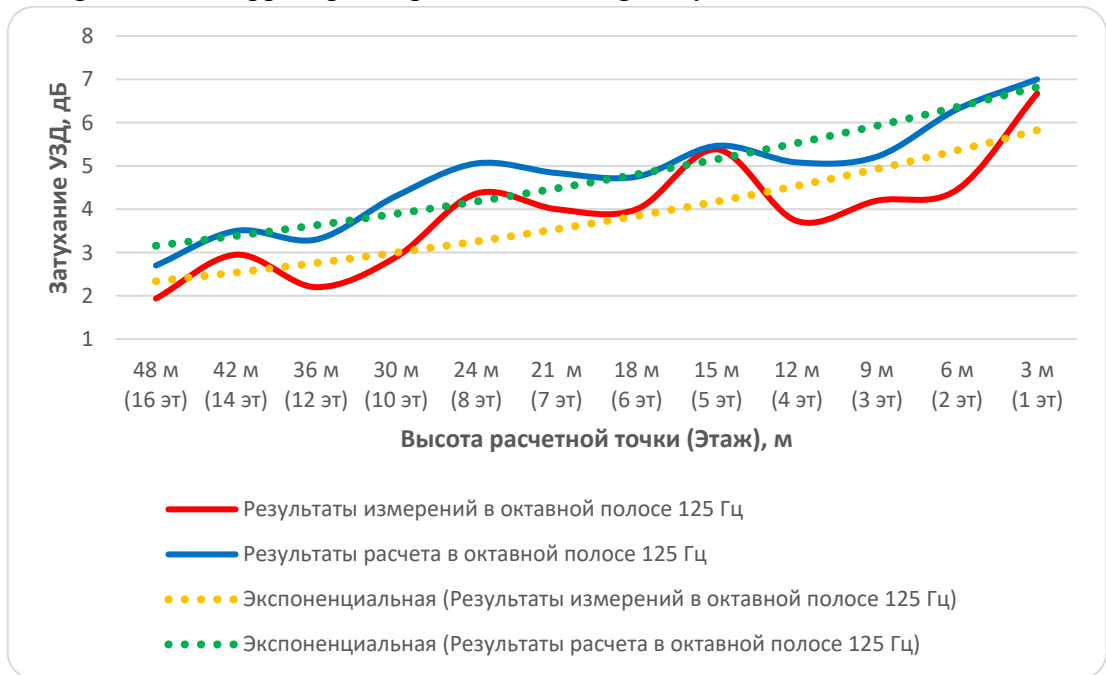


Рисунок 5.15— Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 125 Гц

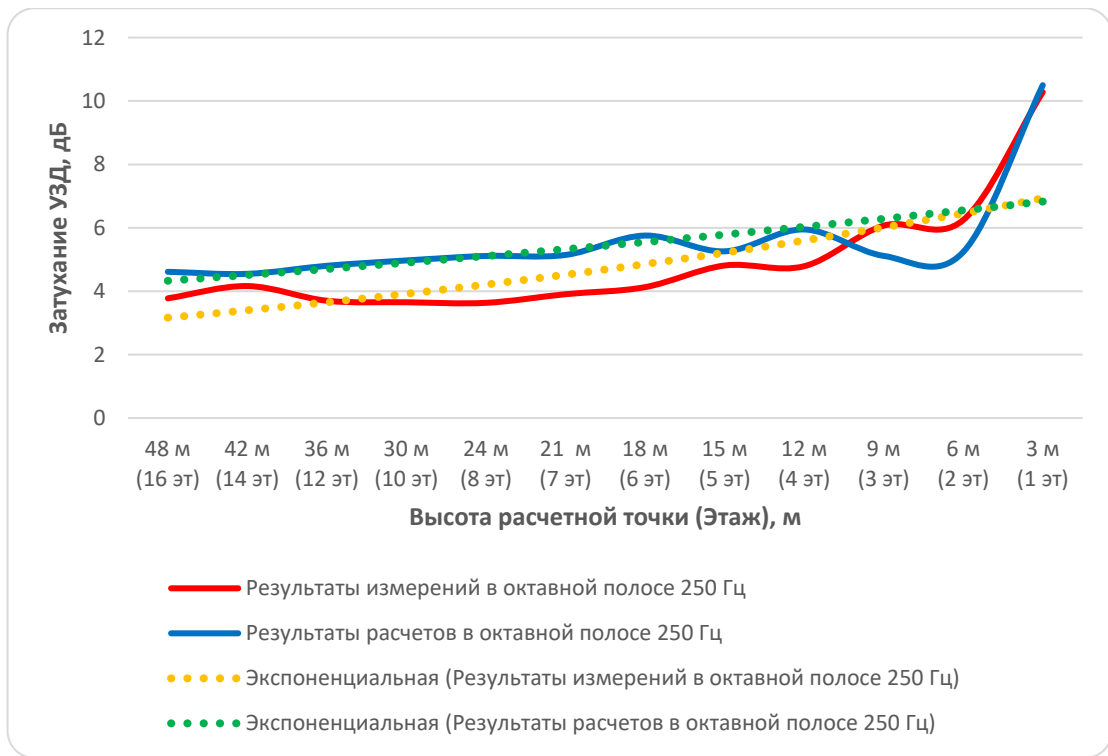


Рисунок 5.16– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 250 Гц

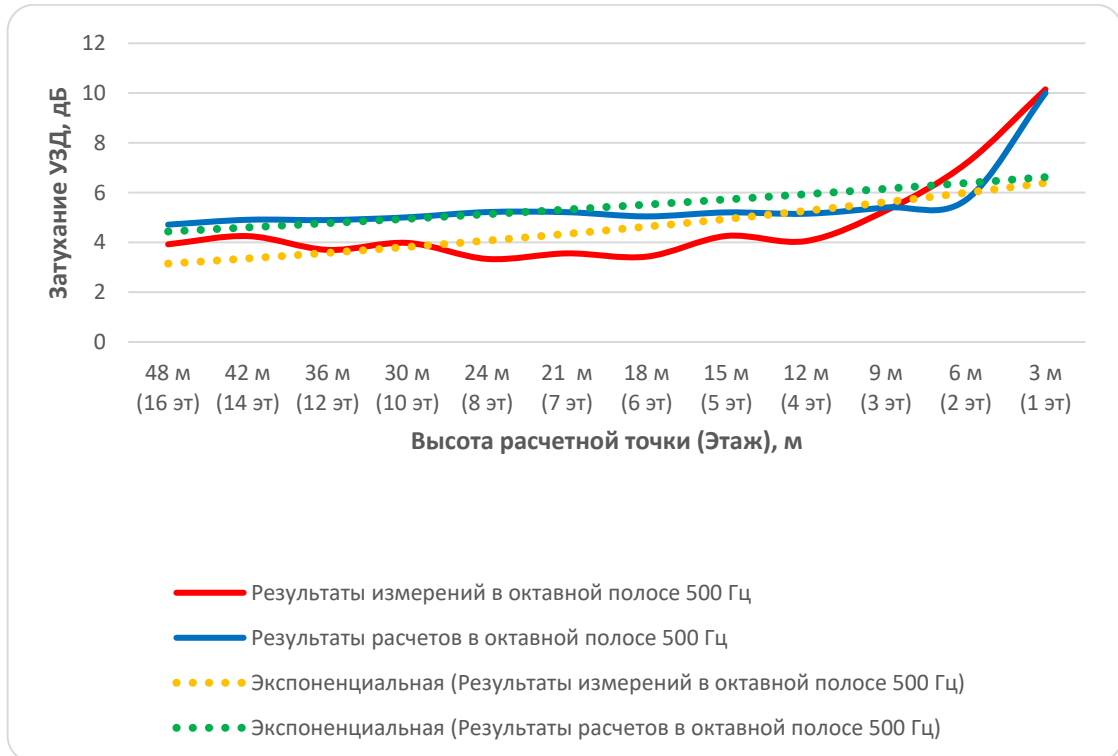


Рисунок 5.17– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 500 Гц

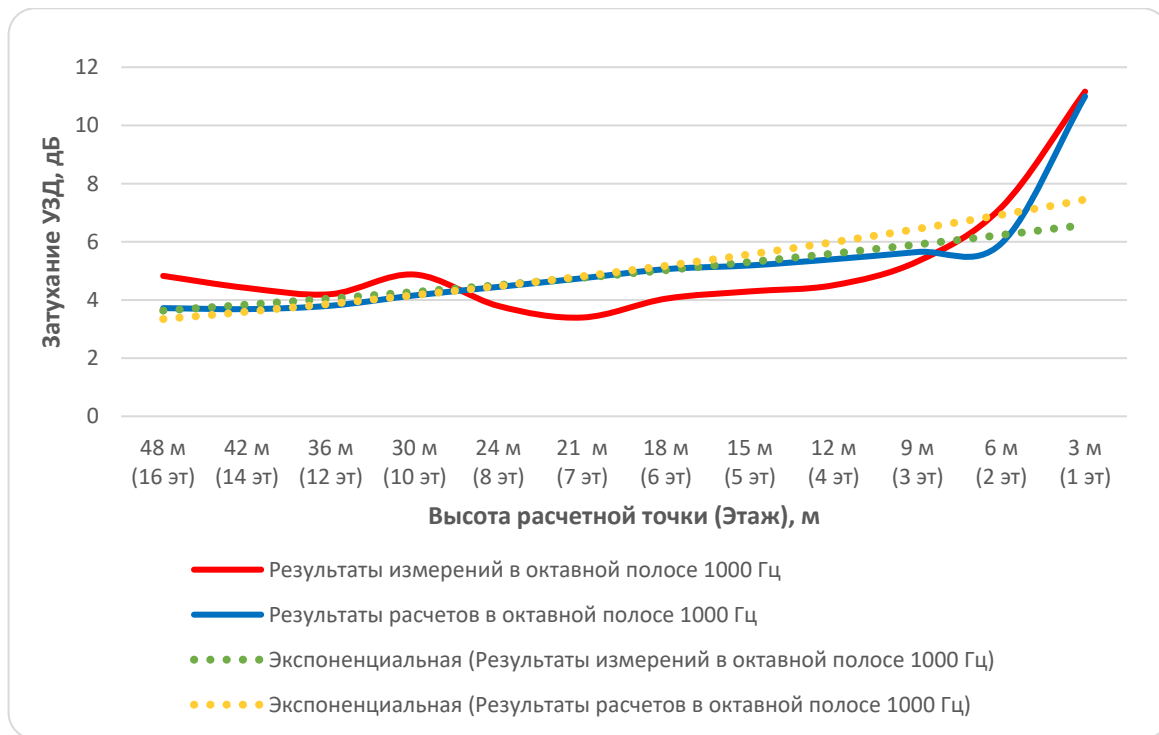


Рисунок 5.18– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 1000 Гц

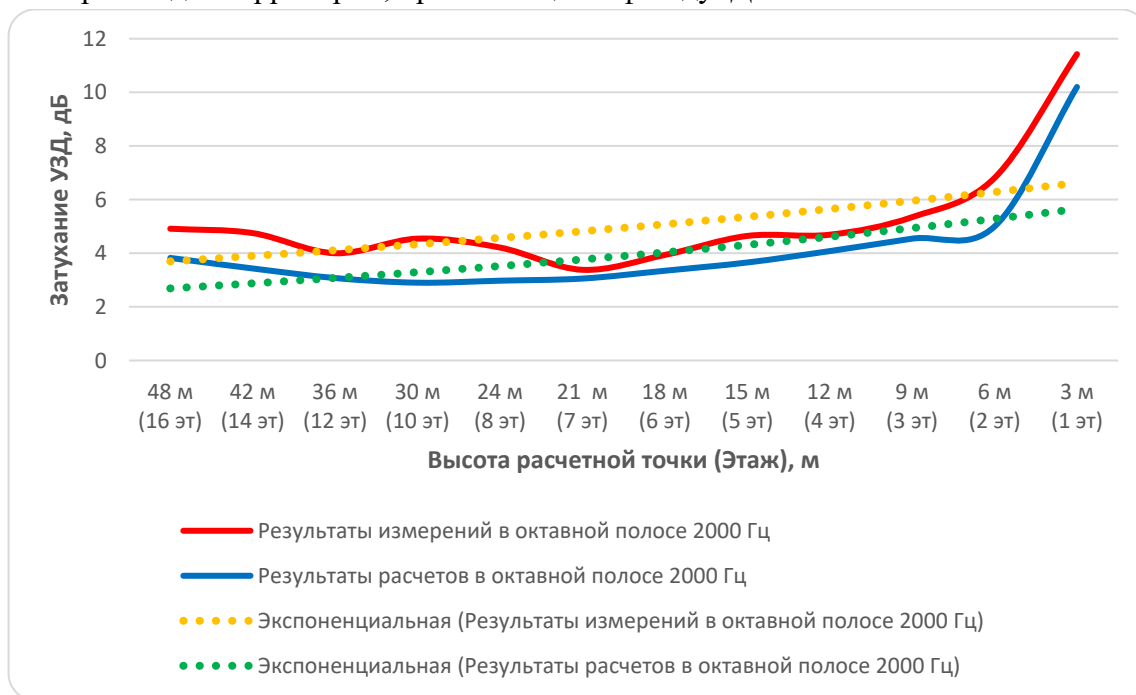


Рисунок 5.19– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 2000 Гц

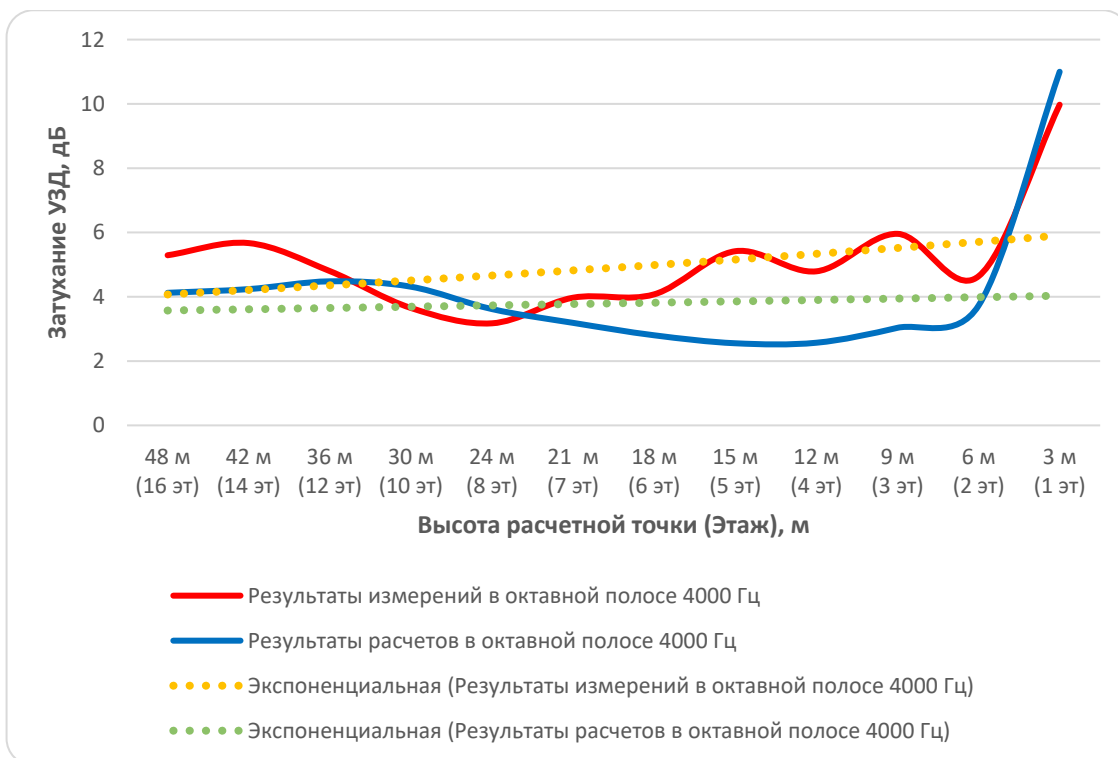


Рисунок 5.20– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 4000 Гц

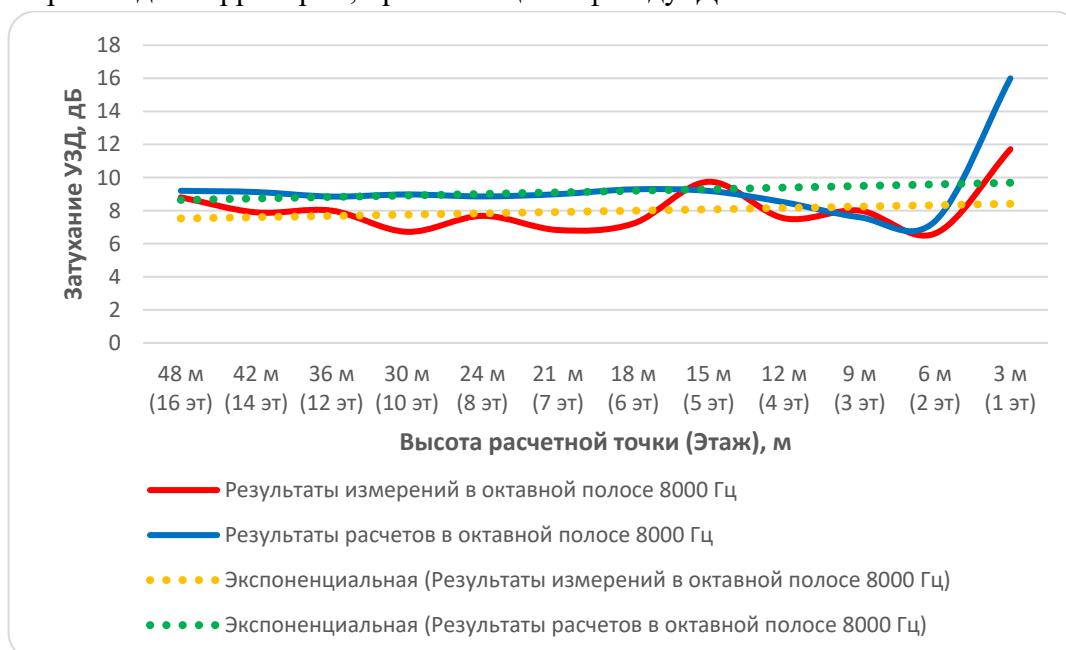


Рисунок 5.21– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике и результатов измерений для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 8000 Гц

Анализируя результаты расчетов и натуральных измерений, можно сделать вывод, о сходимости результатов, как в отношении экспоненциального тренда,

так и в отношении сходимости пиков интерференции. При этом результаты расчетов показали сходимость с результатами измерений $\pm 2-3$ дБ.

При этом по результатам расчетов по ГОСТ 31295.05 с учётом фасада, с коэффициентом звукопоглощения 0, и влияние 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.

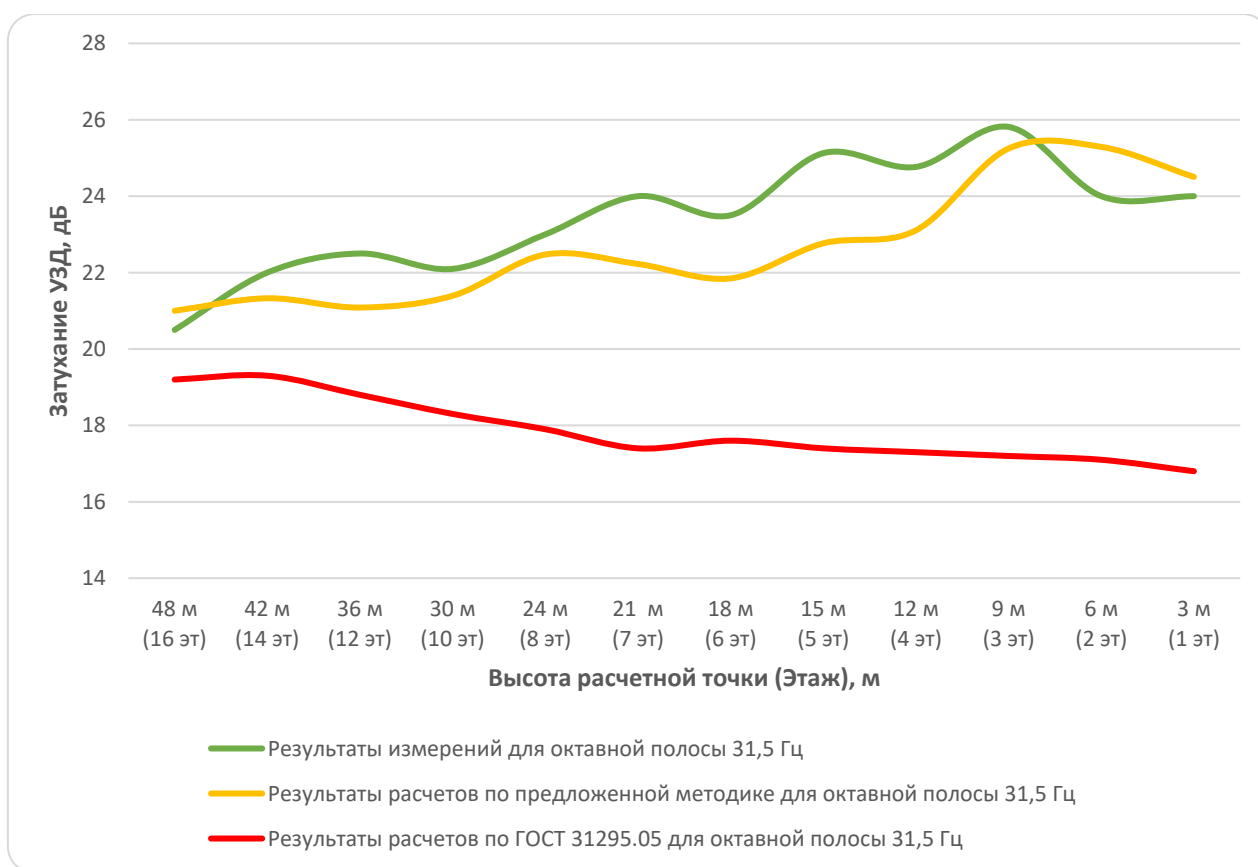


Рисунок 5.22– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике, результатов измерений и результатов расчета по ГОСТ 31295.05 для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 31,5 Гц

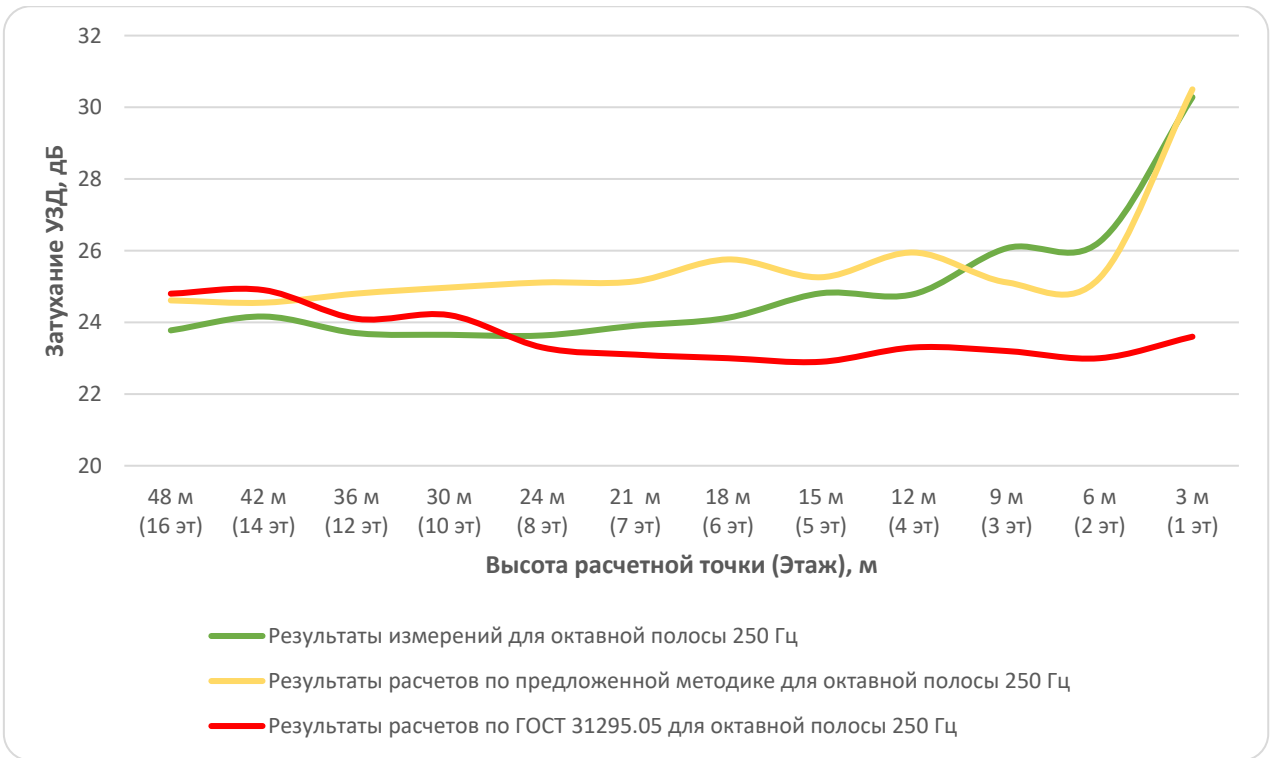


Рисунок 5.23– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике, результатов измерений и результатов расчета по ГОСТ 31295.05 для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 250 Гц

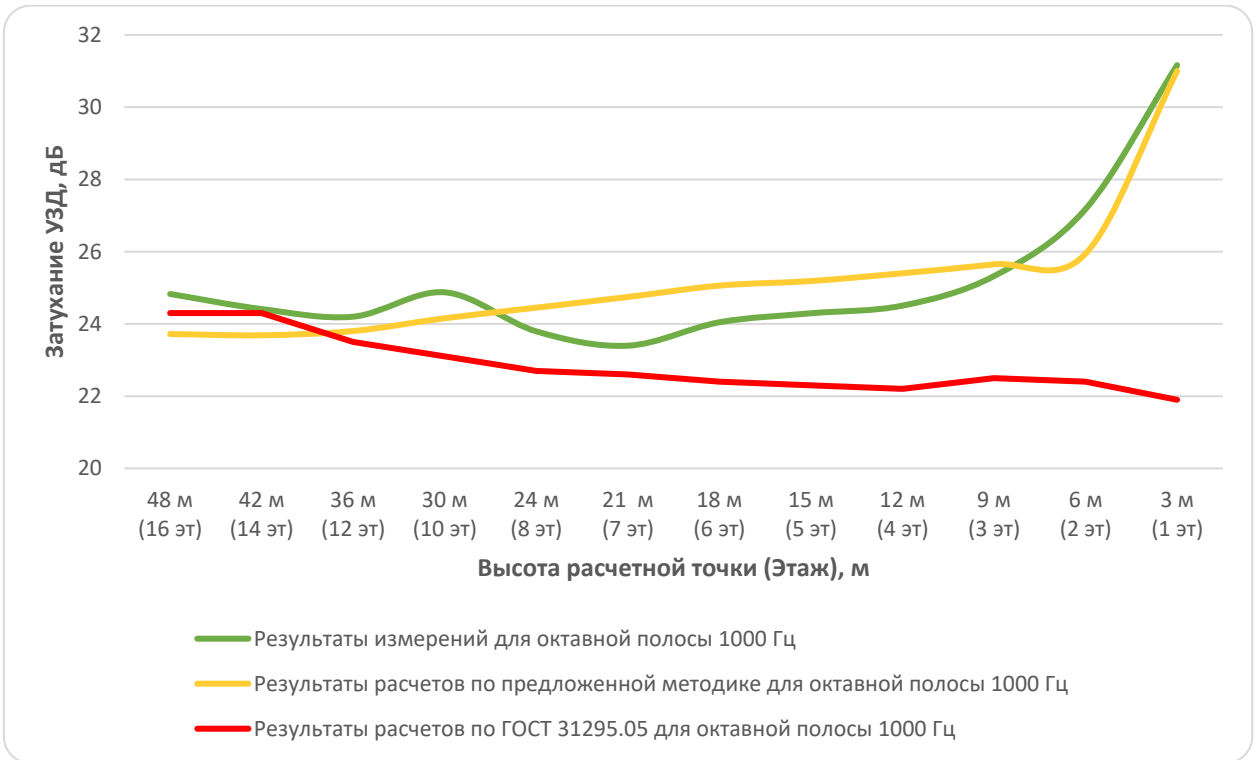


Рисунок 5.24– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике, результатов измерений и результатов расчета по ГОСТ 31295.05 для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 1000 Гц

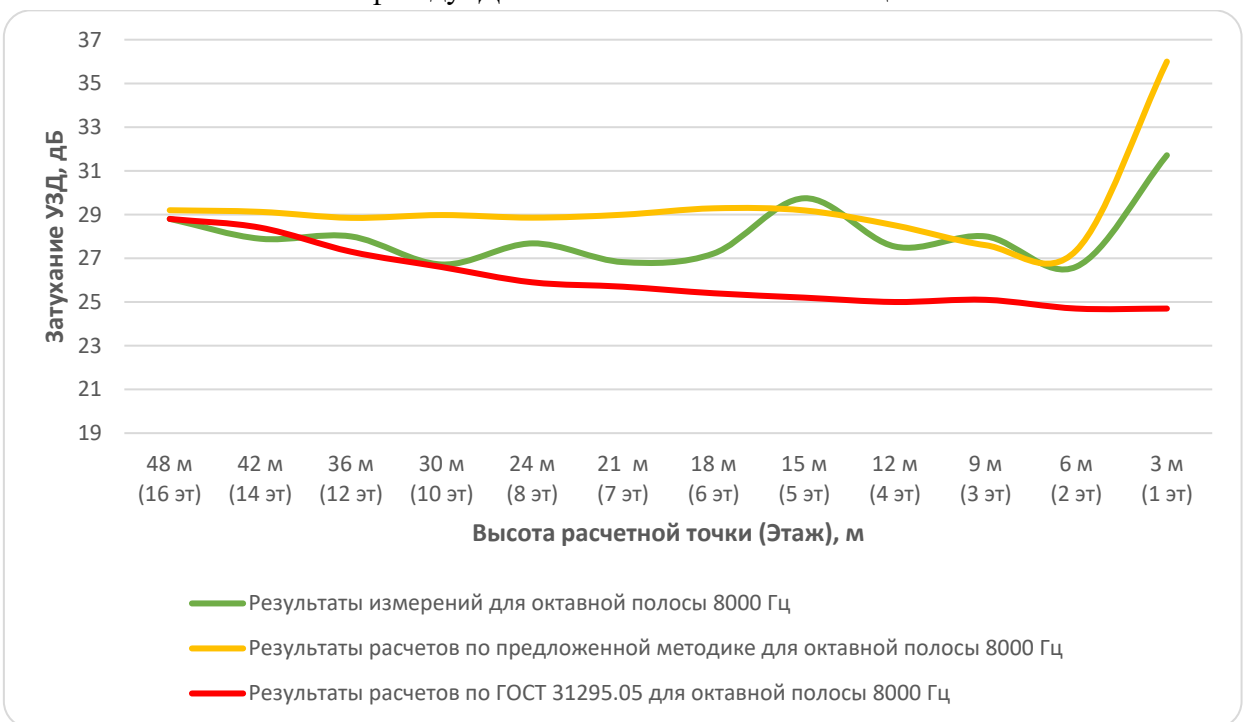


Рисунок 5.25– Сравнение результатов расчетов по предложенной методике, результатов измерений и результатов расчета по ГОСТ 31295.05 для территории, прилегающей к фасаду. Для октавной полосы 8000 Гц

Можно сделать, вывод, что предложенная в работе методика позволяет с большей точностью учесть влияние подстилающей поверхности и отраженной акустической энергии от фасада на ожидаемые уровни звука на территории, прилегающей к фасаду.

5.3 Рекомендации для дополнения нормативно-технической документации

5.3.1 Дополнение нормативно-технической документации методикой определения акустического центра автотранспортного потока

Согласно действующей нормативно-технической документации, акустический центр автотранспортного потока вне зависимости от количества проезжих частей принимается на оси ближайшей к краю дороги полосе движения. [38,39]

В работе было рассмотрено предположение, что автомобильный поток не распределен равномерно по всем полосам движения (при наличии более 1 полосы на проезжую часть), большая доля грузового автотранспорта движется ближе к крайним правым полосам по ходу движения и средняя скорость движения по полосам различна.

С целью решения задачи определения акустического центра автотранспортного потока, учитывающая распределение звуковой энергии над проезжей частью, использовалась методика по определению точки сосредоточения силы, используемой в аксиомах и теоремах статики. Для этого рассмотрен способ перехода от распределённой нагрузки, в нашем случае звуковой энергии, к сосредоточенной силе, в нашем случае акустическому центру. По результатам ряда преобразований была получена следующая зависимость:

$$X_{\text{АЦ}} = \frac{\sum_{i=1}^n ((P_i(x_o^i + d_{\text{пол}})^2 - x_o^{i2})/2)}{d_{\text{пол}} \sum_{i=1}^n P_i} \quad (5-1)$$

где: $P_i = P_0 10^{\frac{L_i}{20}}$

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

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

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. О чем свидетельствует то что, с учётом влияния снижения шумности транспортных средств, подтверждённой согласно отличиям к требованиям допустимых уровней шумности базовых моделей автотранспорта, приведенных в ГОСТ 27436-87 [66] и ГОСТ Р 41.51-04 [68], и влияния положения акустического центра автотранспортного потока, учитывающего распределения транспорта по полосам на многополосных магистралях, совокупное влияние составит в среднем до 10 дБА, что соответствует расхождениям результатов расчетов и натуральных измерений.

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 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.

5.3.2 Дополнение нормативно-технической документации методикой определения акустического поля на территории прилегающей к фасаду

Наиболее распространенной методикой для оценки затухания звука в России является ГОСТ 31295, основными проблемами которого являются:

– оценка экранирования (дифракции шума) – данный вопрос рассматривался многими авторами, наиболее актуальное исследование было проведено Шашуриным А.Е. в работе «Научное обоснование и применение новых технических и технологических решений для снижения акустического загрязнения основными типами шумозащитных экранов» [162], рекомендуется учесть результаты данной работы при дополнении действующей методики;

– оценка влияния подстилающей поверхности и отражения от поверхности фасада – в данной работе представлена методика позволяющая с большей точностью учесть характеристику подстилающей поверхности, не только в зоне приёмника и источника, но и на пути распространения, при этом учитывается, как акустическая характеристика поверхности, так и угол падения звуковой волны.

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

Для оценки показателя снижения звука на приагистральной территории:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{e^{ik_1r_1}}{r_1} + R_p \frac{e^{ik_1r_2}}{r_2} \quad (5-2)$$

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 (5-2) сформирована формула, рекомендуемую для инженерных расчетов при оценке распространения звука от автотранспортных потоков на примыкающей территории:

$$L_{dec} = 20 \log(A_{div} + A_{grd}) \quad (5-3)$$

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

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

Для оценки показателя снижения звука от точечного источника над импедансной поверхностью у фасада:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{e^{ik_1r_1}}{r_1} + R_p \frac{e^{ik_1r_2}}{r_2} + R_{pbld_S} \frac{e^{ik_1r_3}}{r_3} + R_p R_{pbld_I} \frac{e^{ik_1r_4}}{r_4} \quad (5-4)$$

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’;

$R_{pbld_I} = \frac{\sin \phi_2 - Z_1/Z_3}{\sin \phi_2 + Z_1/Z_3}$ – 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 Γ' до приемника.

В итоге получим следующую формулу в логарифмическом виде для оценки акустического поля у фасада многоэтажного здания:

$$L_{dec} = 20 \log(A_{div} + A_{grd} + A_{div_{bld}} + A_{grd_{bld}}) \quad (5-5)$$

где

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

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

Выводы по главе

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

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

2. Результаты измерений подтвердили выводы, о равномерном распределении потока и доли грузового автотранспорта по полосам движения городских дорог и неравномерности для дорог федерального уровня, с отклонением от методики определения акустического центра автотранспортного потока не более чем на 0,2 м.

3. Результаты, полученные предложенной методике и методу конечных элементов показали хорошую сходимость, с максимальным расхождением ± 3 дБ на треть октавную полосу частот, а в среднем расхождение составило ± 1 дБ, при этом предложенная методика менее трудоёмкая и ресурсозатратная.

4. По результатам анализа результатов расчета и натурных измерений влияния подстилающей поверхности, на расстоянии 15, 30, 60 м от источника шума, можно сделать вывод, о сходимости результатов до 2 дБ по уровням

звукового давления. При этом существенное влияние подстилающей поверхности проявляется до 2,0, 2,5 и 3,0 м от поверхности земли, соответственно на расстоянии 15, 30 и 60 м от источника шума.

При этом по результатам расчетов по ГОСТ 31295.05 влияние подстилающей поверхности, с коэффициентом звукопоглощения равном 1, при остальных аналогичных условиях, показывает влияние не более 2 дБ по УЗД и менее 1 дБА по УЗ, для перехода от 0,5 м к 1,0 м, для переходов от 1,0 до 3,0 м влияние подстилающей поверхности составляет не более 0,2 дБ, что не соответствует результатам натурных измерений.

Предложенная в работе методика позволяет с большей точностью учесть влияние подстилающей поверхности на ожидаемые уровни звука на примагистральной территории.

5. По результатам анализа результатов расчета и натурных измерений, можно сделать вывод, о сходимости результатов, как в отношении экспоненциального тренда, так и в отношении сходимости пиков интерференции. При этом результаты расчетов показали сходимость с результатами измерений $\pm 2-3$ дБ.

При этом по результатам расчетов по ГОСТ 31295.05 с учётом фасада, 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.

Соответственно, предложенная методика позволят увеличить точность расчетов относительной действующей НТД на частотах от 31,5 до 1000 Гц на 4-5 дБ, выше 2000 Гц на 2-3 дБ.

6. С учётом подтверждения увеличения точности акустических расчетов, были разработаны рекомендации по актуализации нормативно-технической документации по расчету шума автотранспортных потоков, включая методику определения акустического центра автотранспортного

потока и расчета ожидаемого звукового поля на примагистральной территории и территории, прилегающей к фасаду.

Заключение

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 новая теоретическая модель определения акустического центра автотранспортного потока, с использованием аксиом и теорем статики, учитывающая распределение звукового поля по каждой из полос движения, а также их ширину.

3. Предложенный подход, 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.

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

4. 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 показатели из классификатора.

5. 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. Подтверждено, что с учётом влияния снижения шумности автотранспортных средств, 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 распределения транспорта по полосам на многополосных магистралях, совокупное влияние составит в среднем до 10 дБА, что соответствует расхождениям результатов расчетов и натурных измерений.

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

7. 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 примагистральной территории и на территории, прилегающей к фасадам,

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

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

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

10. Результаты измерений подтвердили выводы, о равномерном распределении потока и доли грузового автотранспорта по полосам движения городских дорог и неравномерности для дорог федерального уровня, с

отклонением от методики определения акустического центра автотранспортного потока не более чем на 0,2 м.

11. Результаты, полученные по предложенной методике и методу конечных элементов, используемом для апробации результатов, показали хорошую сходимость, с максимальным расхождением ± 3 дБ на треть октавную полосу частот, а в среднем расхождение составило ± 1 дБ, при этом предложенная методика менее трудоёмкая и ресурсозатратная.

12. По результатам анализа результатов расчета и натурных измерений влияния подстилающей поверхности, на расстоянии 15, 30, 60 м от источника шума, можно сделать вывод, о сходимости результатов расчетов на примагистральной территории до 2 дБ по уровням звукового давления.

При этом по результатам расчетов по ГОСТ 31295.05 влияние подстилающей поверхности, не соответствует результатам натурных измерений и показывает заниженные значения. Предложенная в работе методика позволила увеличить точность расчетов влияния подстилающей поверхности на высоте до 3 м. на 2 дБ.

13. По результатам анализа результатов расчета звукового поля на территории, прилегающей к фасаду, и натурных измерений, можно сделать вывод, о сходимости результатов, как в отношении экспоненциального тренда, так и в отношении сходимости пиков интерференции. При этом результаты расчетов показали сходимость с результатами измерений $\pm 2-3$ дБ.

При этом по результатам расчетов по ГОСТ 31295.05 с учётом фасад, 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.

Соответственно, предложенная методика позволят увеличить точность расчетов относительной действующей НТД на частотах от 31,5 до 1000 Гц на 4-5 дБ, выше 2000 Гц на 2-3 дБ.

14. Разработаны рекомендации по актуализации нормативно-технической документации по расчету шума автотранспортных потоков, включая методику определения акустического центра автотранспортного потока и расчета ожидаемого звукового поля на примагистральной территории и территории, прилегающей к фасаду.

15. Результаты работы показали, что предложенные методики позволяют увеличить точность оценки ожидаемого акустического воздействия от автотранспортного потока, на примагистральной территории и территории, прилегающей к фасаду. Тем самым позволив производить подбор наиболее оптимальных шумозащитных мероприятий и сократить затраты на их реализацию.

Список литературы

1. Otto Hänninen, Anne Barbara Knol, Matti Jantunen, Tek-Ang Lim Environmental Burden of Disease in Europe: Assessing Nine Risk Factors in Six Countries // Environmental Health Perspectives. - 2014. - №Vol. 122, No. 5. - С. 439-446.
2. Centre for Environment & Health (BON), Environment & Health Impact Assessment (EHI) Environmental noise guidelines for the European Region. - Europe: World Health Organization, 2018. - 181 с.
3. Shannon, G., McKenna, M.F., Angeloni, L.M., Crooks, K.R., Fristrup, K.M., Brown, E., Warner, K.A., Nelson, M.D., White, C., Briggs, J., McFarland, S. and Wittemyer, G. A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife // Biological Reviews. - 2016. - №91. - С. 982-1005.
4. European Environment Agency Environmental noise in Europe — 2020. - Copenhagen K Denmar: European Environment Agency, 2020. - 104 с.
5. Direction of the European Parliament, Council of the European Union "Environmental Noise Directive (DSN) 2002/49/EC" dated 25.06.2002 No. 2002/49/EC // <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:189:0012:0025:EN:PDF>. - 2002
6. Joana Soares, Jan Horalek, Alberto González Ortiz, Cristina Guerreiro, Artur Gsella Health Risk Assessment of Air Pollution in Europe. Methodology description and 2017 results. - ETC/ATNI Report 13/2019 Ed. - Kjeller, Norway: Norwegian Institute for Air Research, 2020. - 24
7. RVS 4:02:11 2006 "Protection from noise" from 03.2006 // Austria
8. Dutilleux, Guillaume; Defrance, Jérôme; Ecotière, David; Gauvreau, Benoit; Bérengier, Michel; Besnard, Francis; Duc, Emmanuel Le NMPB-Routes-2008: The Revision of the French Method for Road Traffic Noise Prediction. - Volume 96,

Number 3 изд. - S. Hirzel Verlag: Acta Acustica united with Acustica, 2010. - 452-462 с.

9. Calculation and Measurement Regulations for Rail Traffic Noise 2002, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, March 28, 2002

10. European Commission. Commission Directive (EU) 2015/996 selected noise assessment methods in accordance with Directive 2002/49/EC of the European Parliament and the Council. - Volume 96, number 3 ed. - Brussels, Belgium: European Commission, May 19, 2015 - 823 p.

11. Acoustics/Noise Reduction Department Road noise calculation model. - sonROAD18 ed. - Dübendorf, Switzerland: On behalf of the Federal Office for the Environment, 2018-07-09. - 195 p.

12. Jørgen Kragh Traffic Noise prediction with Nord2000. - Report 195-2011 изд. - København, Denmark: Danish Road Directorate, 2011. - 28 с.

13. ASJ RTN-Model 2013 Road Traffic Noise Prediction Model, Japan, 2013.

14. HAR11TR-041210-SP10 Source modelling of road vehicles / Deliverable 9 of the Harmonoise project Technical Report, 2010. – 52 p.

15. HJ2.4 - 2009 Road Technical guidelines for noise impact assessment, China, 2009.

16. Calculation of Road Traffic Noise . - Great Britain: Department of Transport, 1988. - 100 с.

17. Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning: Technical Report HAR32TR-040922-DGMR20.

18. ASJ RTN-Model 2008. - Japan: 2010. - 100 с.

19. Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection, Anfosso-Lédée, F., Paviotti, M., Kephelopoulos, S., Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU) : to be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise

Directive 2002/49/EC, Publications Office, 2012,
<https://data.europa.eu/doi/10.2788/32029>

20. Night noise guidelines for Europe. - Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 2009. - 184 c.

21. Rainer Guski Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance // Noise and Health . - 1999. - №1(3). - C. 45-56.

22. Peter Preisendörfer, Ulf Liebe, Heidi Bruderer Enzler, Andreas Diekmann Annoyance due to residential road traffic and aircraft noise: Empirical evidence from two European cities // Environmental Research. - 2022. - Vol.206

23. Biological mechanisms related to cardiovascular and metabolic effects by environmental noise. - Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 2018. - 18 c.

24. Basner, M., Babisch, W., Davis, A., et al. (2014) Auditory and Non-Auditory Effects of Noise and Health. The Lancet, 383, 1325-1332.

25. Thacher, Jesse D.; Poulsen, Aslak H.; Hvidtfeldt, Ulla A.; Raaschou-Nielsen, Ole; Ketznel, Matthias; Jensen, Steen S.; Brandt, Jørgen; Valencia, Victor H.; Münzel, Thomas; Sørensen, Mette Long-term exposure to transportation noise and risk for atrial fibrillation: A Danish nationwide cohort study // Environmental Research. - 2022. - №Vol.207. - C. 112-167.

26. Janice Hegewald, Melanie Schubert, Alice Freiberg, Karla Romero Starke International Journal of Environmental Research and Public Health // Environmental Research. - 2020. - №17. - C. 61-75.

27. Iain M Careye, H Ross Anderson, Richard W Atkinson Are noise and air pollution related to the incidence of dementia? A cohort study in London, England // BMJ Open . - 2018. - №8. - C. 1-11.

28. Alberto Recio, Cristina Linares, José Ramón Banegas, Julio Díaz Road traffic noise effects on cardiovascular, respiratory, and metabolic health: An integrative model of biological mechanisms // Environmental Research. – 2016
29. Manfred Beutel, Claus Jünger, Eva M. Klein Noise Annoyance is Associated With Depression and Anxiety in the General Population- the Contribution of Aircraft Noise // Journal of Psychosomatic Research. – 2016
30. Ester Orban, Kelsey McDonald, Robynne Sutcliffe Residential Road Traffic Noise and High Depressive Symptoms after Five Years of Follow-up: Results from the Heinz Nixdorf Recall Study // Environmental Health Perspectives. - 2015. - №124. - С. 578-585.
31. Aurélie Bocquier, S Cortaredona, C Boutin s exposure to night-time traffic noise a risk factor for purchase of anxiolytic-hypnotic medication? A cohort study // The European Journal of Public Health. - 2013. - №24
32. A report informed by: the Interdepartmental Group on Costs and Benefits Noise Subject Group. Environmental Noise: Valuing impacts on: sleep disturbance, annoyance, hypertension, productivity and quiet. // Department for Environment Food and Rueil Affair. – 2014
33. Vehicles in use Europe 2022 // European Automobile Manufacturers' Association. – 2022
34. Статистика: Автомобилизация России // Руксперт URL: https://ruxpert.ru/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0:%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8 (дата обращения: 20.06.2022).
35. EPA Network Interest Group on Noise Abatement (IGNA) Overview of critical noise values in the European Region. - M+P.BAFU.18.01.1 изд. - Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 2019

36. Буторина, М.В. Составление карты шума автомобильных дорог и ее использование для снижения шума в жилой застройке (на примере транспортного обхода вокруг Санкт-Петербурга): диссертация канд. техн. наук: 01.04.06/ Буторина Марина Вадимовна. – Санкт-Петербург, 2002. – 286 с.
37. A.L. Brown, Irene van Kamp Transport noise interventions and health // Hear to listen. - Adelaide, Australia: ACOUSTICS 2018, 2018. - С. 1-6.
38. СП 276.1325800.2016. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков. – Введ. 2017-04-06. - Официальный сайт Минстроя РФ <http://www.minstroyrf.ru/> (по состоянию на 21.03.2017);
39. ОДМ 218.2.013-2011 Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам. – Введ. 2012-12-26, 2012;
40. Осипов Г.Л. Защита от шума в градостроительстве. Справочник проектировщика / Г.Л. Осипов, В.Е. Коробков, А.А. Климухин и др.– М.: Стройиздат, 1993.;
41. Пospelов П.И. Борьба с шумом автомобильных дорог. / П.И.Пospelов. – Издательство «Транспорт», 1981;
42. Хекл М. Справочник по технической акустике / М. Хекл, Х.А. Мюллер. – Л.: Судостроение, 1980;
43. Углов Е.В., Саенко С.С. Распределение транспортных потоков по полосам движения на автомагистралях./ Е.В. Углов, С.С. Саенко // Вестник московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017
44. Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог // Министерство автомобильных дорог РСФСР// М. Транспорт – 1982;

45. ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. // Росавтодор (Федеральное дорожное агентство). - 2012
46. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. // Федеральная дорожная служба России. - 2001
47. НИР «Переработка существующих нормативных документов на методы проектирования дорожных одежд для выполнения инженерных расчетов»
48. Критерий Граббса // Аккредитация в Росаккредитации URL: <https://rosakkreditatsiya-forum.ru/viewtopic.php?t=1304> (дата обращения: 20.06.2022)
49. Култышева-Ситникова Е. В. Оценка транспортного шума в крупных городах / Е. В. Култышева-Ситникова, Я. И. Вайсман // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации фундаментов, мостов и автомобильных дорог. Механизация строительства. Охрана окружающей среды : Материалы Российской научно-технической конференции / Пермь 17-19 нояб., 2004. - Пермь, 2004. — с. 267-271
50. Никифоров А.С. Основы виброакустики: учебное пособие / А.С. Никифоров, Н.И. Иванов. – СПб: Политехника, 2000. – 485 с.
51. Мутовкин, С.А. Уточнение методов расчета эквивалентных уровней звука транспортных потоков на многополосных автомагистралях / С.А. Мутовкин., Пшенин В.Н., Марков С.Б. // II Защита населения от повышенного шумового воздействия. – 2009. – С. 477- 481.
52. Noise Climate Assessment: Review of National and European Practices. Report for the Department of the Environment, Transport and the Regions by Environmental Resources Management. November 1997.
53. Makarewicz R. Representative spectrum of road traffic noise/ Makarewicz R., Sato Y. // J. Acoust. Soc. Jap. E. – 1996. – 17 (5). – p. 249-254.

54. Silas G. Noises and vibrations due to vehicles / Silas G., Brindeu L., Toader M., Bacria V., Herisanu N., Chiriac A. // Proceedings of the 6th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies VSDIA'98 (Budapest, 9-11 Nov., 1998). – Budapest: Techn. Univ. Budapest., 1998. – p. 513-518.
55. Gaulin D. Characterisation des sources sonores d'ongine rontiere pour le milieu urbain / Gaulin D., Berengier M. // Bull. lab. Fonts et Chaussees. – 1999. - №222. – P. 71-84
56. Arenas Jorge P. Use of Barriers: A Handbook for Noise and Vibration Control / Ed. Malcolm J. Crocker. – J. Willy & Sons Inc., 2007. pp. 714-724.
57. Possibilities of noise reduction on types of coatings made of dense mixtures. (Larmmindernde dichte Fahrbahnbelage.) Nies, V., Forsch. Strassenbau und Strassenverkehrstechn., 1994, (648), 1-147, (RJ "Shum", No. 4, 1995, 4.98.0525).
58. Wolfgang. HLH: Hei-zung. Luftung Klima, Hautechn. 2001. 52, No. 9, p. 22. 107 Anti-noise fencing of the site for ground testing of aircraft gas turbine engines at the airport. (Stable flow enhancements for ground runup enclosure). U.S. Patent 6,016,888. MPK7 V 64 F 1/26. Lynn Christopher No. 08/963214; Appl. 11/03/1997: Published. 01/25/2000; NPK 181/218.
59. Маекава З. Акустические экраны: в кн. «Снижение шума в зданиях и жилых районах» / под ред. Г.Л. Осипова и Е.Я. Юдина, М.: Стройиздат, 1987. -с 426-447.
60. Минина Н.Н. Снижение шума при строительстве автомобильных дорог [Текст]: дис. на соиск. учен. степ. док. тех. наук (01.04.06) / Наталия Николаевна Минина. – Санкт-Петербург, 2006.;
61. Минина, Н.Н. Проблема снижения акустического воздействия на жилую застройку при проектировании, строительстве и функционировании транспортных сооружений: диссертация докт. техн. наук: 01.04.06 / Минина Наталия Николаевна. – Санкт-Петербург, 2012. – 286 с.

62. Butorina M. Noise control measures applied at the construction of new road infrastructure in Sochi/ Butorina M., Minina N. // Proceedings of 16th International Congress on Sound and Vibration 2009. - ICSV 2009.
63. Васильев В.А. Сравнение шумовых характеристик автотранспортных потоков, полученных расчётным путем и в результате натурных измерений / В.А. Васильев // Сборник трудов Третьей Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. Акустика среды обитания. – 2018. – с. 54 -59.;
64. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 "Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений" от 23 апреля 2002 № ИСО 5725-2-2002 // Сб. ГОСТов. - М.: Стандартинформ, 2009
65. ОДМ 218.2.101-2019. Методические рекомендации по проектированию элементов плана, продольного и поперечного профиля автомобильных дорог. - 2019
66. ГОСТ 27436-87 Внешний шум автотранспортных средств. Допустимые уровни и методы измерений. – Введ. 1989-01-01. - М.: Издательство стандартов, 1988.;
67. ГОСТ Р 41.51-99 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения автотранспортных средств, имеющих не менее четырех колес, в связи с производимым ими шумом. – Введ. 2000-01-07. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2000.;
68. ГОСТ Р 41.51-04 Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств, имеющих не менее четырех колес, в связи с производимым ими шумом. – Введ. 2005-01-01. - М.: Издательство стандартов, 2004.;
69. ГОСТ 20444-2014 Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики. – Введ. 2015-07-01.- Стандартинформ, 2015.;

70. ГОСТ 23337-2014 Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий.- Введ. 2014-11-18.- Росстандарт, 2014 г.;
71. Марков, С.Б. Оценка максимальных уровней звука, создаваемых транспортными потоками, на основе экспериментальных исследований / С.Б. Марков, Пшенин В.Н., Пименов И.К. // II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Защита населения от повышенного шумового воздействия. – 2009. – С. 467 – 476.;
72. Мутовкин, С.А. Уточнение методов расчета эквивалентных уровней звука транспортных потоков на многополосных автомагистралях / С.А. Мутовкин., Пшенин В.Н., Марков С.Б. // II Защита населения от повышенного шумового воздействия. – 2009. – С. 477- 481.;
73. Иванов, Н.И. Проблема защиты населения от повышенного шума / Н.И. Иванов, М.В. Буторина, Н.Н. Минина // III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Защита населения от повышенного шумового воздействия. – 2011. – С. 12 – 22.;
74. Malcolm J. Crocker. Introduction to community noise and vibration prediction and control / Malcolm J. Crocker // Handbook. – 2007;
75. Марков С.Б. Влияние местных условий на определение эффективности шумозащитных экранов на месте их установки / С.Б. Марков // III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Защита населения от повышенного шумового воздействия. – 2011. – С. 345 – 352.;
76. Асминин В.Ф. Использование экранирующего эффекта сооружений остановочных пунктов общественного транспорта для снижения шума в жилой застройке городов / В.Ф. Асминин, У.Ф. Корда // III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Защита населения от повышенного шумового воздействия. – 2011. – С. 613 – 620.;

77. Волкодаева М.В. Химическое и шумовое воздействия автотранспорта на окружающую среду на примере автомагистралей г. Санкт-Петербурга / М.В. Волкодаева, А.В. Левкин // III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Защита населения от повышенного шумового воздействия. – 2011. – С. 687 – 691.;
78. Жигаев Д.С. Гигиеническая характеристика шума в условиях г. Владивостока / Д.С. Жигаев, В.Ю. Ананьев, П.Ф. Кику // III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Защита населения от повышенного шумового воздействия. – 2011. – С. 709 - 711.;
79. Иванов Н.И. Проблема шума в Российской Федерации: «кто виноват?» и «что делать?» / Н.И. Иванов // IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – 2013. – С. 14-35.;
80. Запорожец А.И. Социальные и санитарно-гигиенические аспекты шума окружающей среды и их значимость для экологического нормирования / А.И. Запорожец, О.А. Картышев // Научный вестник МГТУ ГА. – 2010. - № 160. С. 132-140.
81. Картышев О.А. Работы по установлению границ зон ограничения жилой застройки вблизи аэропортов по неблагоприятному фактору «авиационный шум» // Научный вестник МГТУ ГА. – 2010. - № 160. – С. 141-147.
82. Руководство по проектированию аэропортов. Использование земельных участков и контроль над окружающей средой. - Монреаль: ИКАО, Дос. 9184 AN/902/2. - изд.3-е. - 2005. - Ч.2.
83. Цукерников И.Е. Современные методы расчёта шума транспортных потоков / И.Е. Цукерников // IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – 2013. – С. 36 - 51.;
84. Поспелов П.И. Методическое обеспечение проектирования / П.И. Поспелов, В.И. Пуркин, Б.А. Щит, Д.С. Пасулько, И.Л. Шубин, И.Е.

Цукерников // IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – 2013. – С. 105 - 115.;

85. Luzzi Sergio. Noise Mapping and Action Plans for transport noise reduction and control in cities / Sergio Luzzi // IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – 2013. – С. 146 - 162.;

86. Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. 2008.

87. Hartog van Banda E. Implementing prediction standards in calculation software - the various sources of uncertainty / E. Hartog van Banda, H. Stapelfeldt // Proceedings of INCE Europe Symposium / Le Mans (France) 27-29 June 2005.

88. Research Project NANR 93: WG-AEN's Good Practice Guide And The Implications For Acoustic Accuracy HAL 3188.3/10/2 DGMR V.2004.1300.00.R005.1

89. Probst W. Uncertainties in the prediction of environmental noise and in noise mapping / W. Probst // Proceedings of INCE Europe Symposium / Le Mans (France) 27-29 June 2005.

90. Бенов Д.М. Детальное моделирование характеристики шума транспортного потока на автомагистралях / Д.М. Бенов, М.Г. Маждраков, Н.Д. Николов, Й.Л. Тошков // IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – 2013. – С. 477 - 482.;

91. Лёвкин А.В. Об учете воздействия автотранспортных потоков при планировании размещения жилых зданий и территорий жилой застройки / А.В. Лёвкин, М.В. Волкодаев, К.В. Демина // IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – 2013. – С. 572 - 577.;

92. Смирнов Ю.Ю. Обоснование управленческих решений по снижению акустической нагрузки на население от автотранспорта / Ю.Ю. Смирнов, Е.И.

Дроздова // IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – 2013. – С. 639 - 647.;

93. Князев Д.А. Акустическое воздействие в закрытых надземных пешеходных переходах / Д.А. Князев, Ю.И. Элькин // IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – 2013. – С. 698 - 703.;

94. ГОСТ 31295.2-2005 "Затухание звука при распространении на местности. Часть 2" от 20 июля 2006 // Официальное издание. М.: Стандартиформ, 2006 год. – 2006

95. ГОСТ 31295.1-2005 "Затухание звука при распространении на местности. Часть 1. Расчет поглощения звука атмосферой (с Поправкой)" от 20 июля 2006 // Официальное издание. М.: Стандартиформ, 2006 год. – 2006

96. СП 51.13330.2011 "Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменениями N 1, 2)" от 28 декабря 2010 // официальное издание Минрегион России. - М.: ОАО "ЦПП", 2010 год

97. Цукерников И.Е. Сравнение результатов расчета автодорожного шума жилого района г. Москвы, полученных при использовании трех программных средств / И.Е. Цукерников, Л.А. Тихомиров // Защита от повышенного шума и вибрации: Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / под ред. Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 453-463.

98. ГОСТ Р 52399-2005 "Геометрические элементы автомобильных дорог" от 22 ноября 2005 // официальное издание М.: Стандартиформ, 2006 год

99. СП 396.1325800.2018 "Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования" от 01 августа 2018 // Официальное издание. М.: Стандартиформ, 2019 год

100. СНиП 23-03-2003 "Защита от шума" от 30 июня 2003 // официальное издание М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004 год
101. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. - 20-е изд. - Москва : "Высшая шокла", 2010. – 416 с.
102. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом.. - Москва : Логос, 2008. - 424 с.
103. Parrondo J. Prediction of noise indices in urban streets with fluctuating vehicle traffic, based on the acoustic ray method/ J. Parrondo, F. Fernández, J. Fernández, J. González and S. Velarde // Proceedings of International Congress on Sound and Vibration (Lyngby, Denmark). – Lyngby, 1999.
104. Государственному докладу "О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 г"// Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022.-340 с.
105. Осипов Г.Л. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Г.Л. Осипов, Е.Я. Юдин, Г. Хюбнер и др.– М.: Стройиздат, 1987.-558 с.;
106. What you should know about noise reducing asphalt pavements // Asphalt. — 2004 .— 19; № 2 .— с. 18-20.
107. Wayne J. Quiet pavement - coming to a highway near you / J. Wayne // Asphalt. — 2005 .— 20; № 2 .— с. 24-25 .— ISSN 1088-1697.
108. Watts G. Reducing traffic noise disturbance / G. Watts // Acoust. Bull. — 2005 .— 30; № 5 .— с. 10-18 .— ISSN 0308-437X.
109. Reuter C. Regionale Larmaktionsplanung fur den Straßenverkehr in Sudhessen / C. Reuter // Wasser und Abfall. — 2011 .— 12; № 7-8 .— с. 39-43 .— ISSN 1436-9095 .— Библиограф.: 3.

110. Туренко Ф. П. Автомобильные дороги и защита от шума уличного движения / Ф. П. Туренко, А. В. Тюкин // Омск. науч. вестн. — 2004 .— № 4 .— с. 80-81 .— Библиограф.: 3.
111. Шадрин Н. В. Выбор и оценка эффективности мероприятий по снижению уровня транспортного шума / Н. В. Шадрин // Трансп. средства Сибири. — 2002 .— № 8 .— с. 418-422.
112. Скучик Е. Основы акустики / Е. Скучик/ Под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Л. М. Лямшева. - Москва// Москва : Мир, 1976.
113. Комкин А. И. Внешний шум автомобиля. Методы определения и снижения / А. И. Комкин // Автомоб. пром-сть. — 2000 .— № 10 .— с. 34-37 .— ISSN 0005-2337.
114. Tanczos K. Noise annoyance and willingness to pay of inhabitants exposed to transport noise / K. Tanczos, R. Markovits-Somogyi, A. Torok // Period. polytechn. Transp. Eng. — 2007 .— 35; № 1-2 .— с. 75-84 .— ISSN 0303-7800.
115. Delany M.E. Acoustical properties of fibrous absorbent materials/ M.E. Delany, E.N. Bazley // Applied Acoustics. Vol.3. Issue 2 – 1970. – pp. 105 – 116;
116. Miki Y., Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany-Bazley models/ J. Acoust. Soc. Jpn (E). 11(1), 1990, pp. 19-24;
117. Embleton T.F.W. Sound Propagation Outdoors Improved Prediction Schemes for the 80's/ T.F.W. Embleton // Noise Control Engineering, Vol. 18, Jan.-Feb. 1982, pp. 30-39;
118. Embleton T.F.W. Effective flow resistivity of ground surfaces determined by acoustical measurements/ Embleton, T. F. W., Piercy, J. E., Daigle, G. A. // The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 74, Issue 4, Oct. 1983, pp.1239-1244

120. Nicolas J. Precise model measurements versus theoretical prediction of barrier insertion loss in presence of the ground/ J. Nicolas, T. Embleton, J. E. Piercy // The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 73, Issue 1, Jan. 1983, pp.44-54
121. Bolen L. N. Effects of ground cover on the propagation of sound through the atmosphere/ L. N. Bolen and H. E. Bass // The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 69, Issue 4, Apr. 1981, pp.950-954
122. Attenborough K. Predicted ground effect for highway noise / K. Attenborough // Journal of Sound and Vibration Vol. 81, Issue 3, Apr. 1982, pp. 413-424;
123. Heap, N. W. Sound propagation over mixed impedances. PhD thesis The Open University/ Heap, N. W // The Open University's repository of research publications and other research outputs 1982
124. Habault D. Identification of the acoustical properties of a ground surface/ D. Habault, G. Corsain // Journal of Sound and Vibration. Vol. 100, Issue 2, May 1985, pp. 169-180
125. de Jong, B. A. Propagation of sound over grassland and over an earth barrier/ de Jong, B. A., Moerkerken, A., van der Toorn, J. D. // Journal of Sound and Vibration, Vol. 86, Issue 1, pp. 23-46.
126. Attenborough K. Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces/ K. Attenborough // Journal of Sound and Vibration Vol. 99, Issue 4, Apr. 1985, pp. 521-544;
127. Ingard U. On the Reflection of a Spherical Sound Wave from an Infinite Plane/ Uno Ingard // The Journal of the Acoustical Society of America Vol. 23, N 3, May, 1951, pp. 329-335.
128. Rudnick I. The Propagation of an Acoustic Wave along a Boundary/ Isadore Rudnick // The Journal of the Acoustical Society of America Vol. 19, N 2, Mar, 1947, pp. 348-356.

129. Chessell C. I. Propagation of noise along a finite impedance boundary/ C. I. Chessell // The Journal of the Acoustical Society of America Vol. 62 N4, Oct, 1977, pp. 825-834.
130. Piercy J. E. Review of noise propagation in the atmosphere/ J. E. Piercy and T. F. W. Embleton, L. C. Sutherland // The Journal of the Acoustical Society of America Vol.61, N6, Jun, 1977, pp. 1403-1418.
131. Wenzel A.R. Propagation of waves along an impedance boundary/ Alan R. Wenzel // The Journal of the Acoustical Society of America Vol.55, N5, May, 1974, pp. 956-963.
132. Donato R. J. Propagation of a spherical wave near a plane boundary with a complex impedance/ R. J. Donato// The Journal of the Acoustical Society of America Vol.60, N1, Jul, 1976, pp. 34-39.
133. Attenborough K. Propagation of sound above a porous half-space/ Keith Attenborough, Sabih I. Hayek and James M. Lawther // The Journal of the Acoustical Society of America Vol.68, N5, Nov, 1980, pp. 1493-1501.
134. Wescott J.W. Propagation of sound in air, a bibliography with abstracts/ John W. Wescott, S. Steven Kushner // Engineering, College of - Technical Reports, 1965;
135. Pielemeier W. H. The Pierce Acoustic Interferometer as an Instrument for the Determination of Velocity and Absorption/ W. H. Pielemeier // Physical review journals, 34, 1929, pp. 1184-1203
136. Harris C.M. Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature/ Cyril M. Harris // The Journal of the Acoustical Society of America 40, Feb, 1966, pp. 148-159.
137. Harris C.M. On the Absorption of Sound in Humid Air at Reduced Pressures/ Cyril M. Harris // The Journal of the Acoustical Society of America 43, Nov, 1968, pp. 531-532.

138. Harris C.M. Effects of Humidity on the Velocity of Sound in Air/ Cyril M. Harris // The Journal of the Acoustical Society of America 49, Dec, 1969, pp. 890-893.
139. Monk R.G. Thermal Relaxation in Humid Air/ Robin G. Monk// The Journal of the Acoustical Society of America 46, Jan, 1969, pp. 580-586.
140. Evans L.B. Absorption of Sound in Air/ L. B. Evans and L. C. Sutherland// The Journal of the Acoustical Society of America 49, Aug, 1971, pp. 110.
141. Evans L.B. Atmospheric Absorption of Sound: Theoretical Predictions/ L. B. Evans, H.E. Bass, L. C. Sutherland// The Journal of the Acoustical Society of America 51, Sep, 1971, pp. 1565.
142. Bass H.E. Atmospheric absorption of sound: Update/ H. E. Bass, L. C. Sutherland, A. J. Zuckerwar// The Journal of the Acoustical Society of America 88(4), Oct, 1990, pp. 2019-2021.
143. Bass H.E. Atmospheric absorption of sound: Update/ H. E. Bass, L. C. Sutherland, A. J. Zuckerwar, D. T. Blackstock and D. M. Hester// The Journal of the Acoustical Society of America 97, Jun, 1995, pp. 680-683.
144. Rossing T.D. Springer Handbook of Acoustics// Springer Science & Business Media, 21 Jun. 2007, pp. 1182
145. Crocker M.J. Handbook for Noise and Vibration Control// Wiley; 1st edition, pp. 1600
146. ГОСТ Р 53188.1-2019 "Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Шумомеры. Часть 1. Технические требования" от 1 декабря 2019// Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019 год
147. ГОСТ Р 70024.2-2022 "Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Фильтры полосовые октавные и на долю октавы. Часть 2. Испытания в целях утверждения типа" // Официальное издание. М.: ФГБУ "РСТ", 2022

148. Государственная поверочная схема для средств измерений звукового давления в воздушной среде и аудиометрических шкал от 30.11.2018 // Официальный сайт Росстандарта www.gost.ru (по состоянию на 11.03.2019)
149. ГОСТ 31296.2-2006 "Шум. Описание, измерение и оценка шума на местности. Часть 2. Определение уровней звукового давления (с Поправкой)" от 1 июля 2008 // официальное издание М.: Стандартинформ, 2008 год
150. Zhu W. Scattering from impedance gratings and surface wave formation/ W. Zhu, M. R. Stinson, and G. A. Daigl// *The Journal of the Acoustical Society of America* 111(5), 2002 pp. 1996–2012
151. Enflo B. O. Sound wave propagation from a point source over a homogeneous surface and over a surface with an impedance discontinuity/ B. O. Enflo and P. H. Enflo// *The Journal of the Acoustical Society of America* 82, 1987 pp. 2123–2135
152. Rasmussen K. B. A note on the calculation of sound propagation over impedance jumps and screens/ K. B. Rasmussen// *Journal of Sound and Vibration* 84, 1982 pp. 598–602
153. Gilbert K.E. Application of the parabolic equation to sound propagation in a refracting atmosphere/ K. E. Gilbert and M. J. White // *The Journal of the Acoustical Society of America* 85, 1989 pp. 630-637
154. Chandler-Wilde S.N. Sound propagation above an inhomogeneous impedance plane/ S. N. Chandler-Wilde and D. C. Hothersall// *Journal of Sound and Vibration* 98, 1985 pp. 475-491
155. Koers P. Diffraction by an absorbing barrier or by an impedance transition/ P. Koers// *Proceedings of Internoise* 83, 1983 pp. 311-314
156. Hothersall D.C. Approximate models for sound propagation above multi-impedance plane boundaries/ D. C. Hothersall and J. N. B. Harriott// *The Journal of the Acoustical Society of America* 97(2), 1995 pp. 918-926

157. Boulanger P. Models and measurements of sound propagation from a point source over mixed impedance ground/ P. Boulanger, T. Waters-Fuller, K. Attenborough, and K. M. Li// The Journal of the Acoustical Society of America 102(3), 1997 pp. 1432-1442
158. Bassiouni M.R. Prediction and experimental verification of far-field sound propagation over varying ground surface/ M. R. Bassiouni, C. R. Minassian, and B. Chang // Proceedings of Internoise'83, 1983 pp. 287-290
159. Lam Y.W. On the modeling of sound propagation over multi-impedance discontinuities using a semiempirical diffraction formulation/ Y.W. Lam and M.R. Monazzam// The Journal of the Acoustical Society of America 120(20), Aug. 2006 pp. 686-698
160. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 03.02.2021, N0001202102030022.
161. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997 год
162. Шашурин А.Е. Научное обоснование и применение новых технических и технологических решений для снижения акустического загрязнения основными типами шумозащитных экранов: диссертация докт. техн. наук: 01.04.06 / Шашурин Александр Евгеньевич. – Санкт-Петербург, 2018. – 417 с.
163. Осипов Г.Л. Защита зданий от шума/ Г.Л. Осипов – М.: Стройиздат, 1972.

Приложение А. Сравнение шумовых характеристик автотранспортного потока

Марков С.Б. Оценка максимальных уровней звука, создаваемых транспортным потоками, на основе экспериментальных исследований[1]			
Интенсивность, авт/ч	Скорость	Лэв, дБА	Лмакс, дБА
100	-	32	45
150	-	33	48
250	-	34	48
400	-	36	53
800	-	38	53
1000	-	38	53
Жигаев Д.С. Гигиеническая характеристика шума в условиях г. Владивостока [8]			
10	-	52	53
20	-	53	54
60	-	50	52
60	-	57	58
180	-	55	57
600	-	65	66
2220	-	72	73
2300	-	75	76
2300	-	57	58
2300	-	58	59
3000	-	68	70
3200	-	77	80
3700	-	74	76
3800	-	73	76
Цукерников И.Е. Современные методы расчёта шума транспортных потоков [10]			
3390	70	72	
3390	70	80	
463	50	71	
452	50	66	
372	50	64	
72	30	60	
Бенов Д.М. Детальное моделирование характеристики шума транспортного потока на автомагистралях [13]			
510	100	81	
540	110	83	
820	110	83	
990	120	85	
2230	130	89	
2440	125	89	
3940	135	89	
Смирнов Ю.Ю. Обоснование управленческих решений по снижению акустической нагрузки на население от автотранспорта [15]			
1308		66	
1384		69	
1452		74	
2152		68	
2528		74	
2676		74	
Князев Д.А. Акустическое воздействие в закрытых надземных пешеходных переходах [16]			
12000		80	83
15900		82	83

**Приложение Б. Оценка расположения акустического центра в зависимости от общей характеристики
автотранспортного потока**

Таблица Б.1 – Разности уровней между полосами движения и акустический центр для 2 полос движения

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Лэкв Инт.: до 100				Лэкв Инт.: 101-200				Лэкв Инт.: 201-300				Лэкв Инт.: 301-400				Лэкв Инт.: 401-500			
		d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ				
более 50 %	1	69	23	2,1	66	20	2,2	68	22	2,2	68	12	2,6	69	12	2,7					
	2	46			46			46			56			58							
49-35 %	1	66	12	2,6	63	12	2,6	67	14	2,5	68	12	2,6	69	12	2,7					
	2	54			51			53			56			58							
20-34 %	1	66	7	3,0	59	4	3,3	63	6	3,1	66	8	2,9	68	10	2,8					
	2	60			55			57			58			58							
5-19 %	1	63	4	3,3	59	6	3,1	59	-1	3,9	63	3	3,4	64	5	3,3					
	2	59			53			60			59			60							
до 5 %	1	61	0	3,7	56	-2	3,9	57	-2	4,0	59	-2	4,0	61	0	3,8					
	2	61			57			60			61			61							

Таблица Б.2 – Разности уровней между полосами движения и акустический центр для 2 полос движения (продолжение)

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Лэкв Инт.: 501-750				Лэкв Инт.: 751-1000				Лэкв Инт.: 1001-1500				Лэкв Инт.: более 1501			
		d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ	d1	АЦ		
49-35 %	1	-	-	-	-	-	-	80	12	2,6	79	2	3,5	-	-	-	
	2	-			-			68			77						
20-34 %	1	71	11	2,7	70	5	3,2	80	4	3,3	80	12	2,6	-	-	-	
	2	59			65			76			68						
5-19 %	1	65	3	3,4	67	3	3,4	77	3	3,4	76	-1	3,8	-	-	-	
	2	62			64			74			77						
до 5 %	1	62	-1	3,8	64	-1	3,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Лэкв Инт.: 501-750	d1	АЦ	Лэкв Инт.: 751-1000	d1	АЦ	Лэкв Инт.: 1001-1500	d1	АЦ	Лэкв Инт.: более 1501	d1	АЦ
	2	63			65						-		

Таблица Б.3 – Разности уровней между полосами движения и акустический центр для 3 полос движения

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Лэкв Инт.: до 100	d1	d2	АЦ	Лэкв Инт.: 101-200	d1	d2	АЦ	Лэкв Инт.: 201-300	d1	d2	АЦ	Лэкв Инт.: 301-400	d1	d2	АЦ
20-34 %	1	63	1	10	4,69	66	0	9	4,55	69	2	4	4,82	68	-2	7	5,03
	2	64				66				67				71			
	3	55				57				63				63			
5-19 %	1	62	2	10	4,77	65	-1	8	4,82	68	0	8	4,68	68	-2	7	4,99
	2	64				66				68				70			
	3	54				58				60				63			

Таблица Б.4 – Разности уровней между полосами движения и акустический центр для 3 полос движения (продолжение)

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Лэкв Инт.: 401-500	d1	d2	АЦ	Лэкв Инт.: 501-750	d1	d2	АЦ	Лэкв Инт.: 751-1000	d1	d2	АЦ	Лэкв Инт.: 1001-1500	d1	d2	АЦ
20-34 %	1	69	2	6	5,25	70	3	4	5,47	75	0	6	4,78	78	2	6	4,61
	2	72				73				75				76			
	3	66				69				69				70			
5-19 %	1	69	2	7	5,07	71	2	6	5,15	72	2	5	5,25	74	2	4	5,34
	2	71				73				74				76			
	3	64				67				69				72			

Таблица Б.5 – Разности уровней между полосами движения и акустический центр для 3 полос движения (продолжение)

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Лэкв Инт.: 1501-2000	d1	d2	АЦ	Лэкв Инт.: 2001-2500	d1	d2	АЦ	Лэкв Инт.: более 2501	d1	d2	АЦ
20-34 %	1	64	15	2	7,36	-	-	-	-	-	-	-	-

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Лэкв Инт.: 1501-2000	d1	d2	АЦ	Лэкв Инт.: 2001-2500	d1	d2	АЦ	Лэкв Инт.: более 2501	d1	d2	АЦ
	2	80				-				-			
	3	82				-				-			
5-19 %	1	76	2	4	5,29	76	3	4	5,45	75	-4	3	5,67
	2	77				79				79			
	3	73				75				76			

Таблица Б.6 – Разности уровней между полосами движения и акустический центр для 4 полос движения

Доля грузовых автомобиле й в составе потока	Полос а	Лэкв Инт.: до 400	Лэкв Инт.: 401- 500				Лэкв Инт.: 501- 750	Лэкв Инт.: 751- 1000				Лэкв Инт.: до 400	Лэкв Инт.: 401- 500				Лэкв Инт.: 501- 750	Лэкв Инт.: 751- 1000			
			d 1	d 2	d 3	А Ц		d 1	d 2	d 3	А Ц		d 1	d 2	d 3	А Ц		d 1	d 2	d 3	А Ц
20-34 %	1	66	-5	2	5	7,0	67	-3	1	4	7,1	69	-3	2	4	7,0	70	-3	2	6	6,8
	2	71					70					73									
	3	68					69					71									
	4	63					64					66									
5-19 %	1	66	-3	1	7	6,8	67	-2	0	6	7,0	67	-3	1	6	7,0	68	-3	1	6	7,1
	2	69					69					72									
	3	68					69					71									
	4	61					63					65									

Таблица Б.7 – Разности уровней между полосами движения и акустический центр для 4 полос движения (продолжение)

Доля грузовых автомобиле й в составе потока	Полос а	Лэкв Инт.: 1001- 1500	Лэкв Инт.: 1501- 2000				Лэкв Инт.: 2001- 2500	Лэкв Инт.: 2501- 3000				Лэкв Инт.: 1001- 1500	Лэкв Инт.: 1501- 2000				Лэкв Инт.: 2001- 2500	Лэкв Инт.: 2501- 3000			
			d 1	d 2	d 3	А Ц		d 1	d 2	d 3	А Ц		d 1	d 2	d 3	А Ц		d 1	d 2	d 3	А Ц
20-34 %	1	72	-4	2	6	6,8	73	-4	1	4	7,4	72	-4	-3	2	8,3	-	-	-	-	-
	2	75					77					77									
	3	74					77					79									
	4	67					73					77									
5-19 %	1	70	-4	1	3	7,5	72	-3	0	2	7,6	72	-4	1	2	7,7	73	-4	1	2	7,7

2	74				75				76				77			
3	73				75				75				76			
4	70				72				74				75			

Таблица Б.8 – Разности уровней между полосами движения и акустический центр для 4 полос движения (продолжение)

Доля грузовых автомобилей в составе потока	Полоса	Лэкв Инт.: 3001-4000	d1	d2	d3	АЦ	Лэкв Инт.: 4001-5000				Лэкв Инт.: более 5001					
							d1	d2	d3	АЦ	d1	d2	d3	АЦ		
20-34 %	1	75	-7	0	2	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	81					-					-				
	3	81					-					-				
	4	79					-					-				
5-19 %	1	75	-4	1	1	7,7	76	-4	2	1	7,7	77	-3	2	0	7,6
	2	79					80					80				
	3	78					78					78				
	4	77					78					78				

Приложение В Оценка расположения акустического центра по результатам натуральных измерений

Таблица В.1 – Результаты серий измерений акустического центра для городских дорог

Адрес	Полоса	ЛА, а/ч	ГА, а/ч	% ГА	Измеренный уровень звука, дБА	Доля в общем потоке	Измеренный фон в точке измерений от воздействия других полос, дБА	Воздействие непосредственно от полосы движения с коррекцией на фоновое воздействие, дБА	Хац
Кантемировский пр	1	1060	100	9	81	0,54	78	78	3,50
	2	900	40	4	81	0,46	78	78	
Кантемировский мост	1	680	20	3	78	0,31	75	75	5,25
	2	640	60	9	77	0,29	75	74	
	3	660	40	6	78	0,30	74	75	
Суздальский пр.	1	476	20	4	75	0,21	72	72	5,38
	2	448	13	3	76	0,20	73	73	
	3	462	2	0	76	0,21	73	73	
Проспект Испытателей	4	440	0	0	76	0,01	73	73	6,85
	3	560	40	7	76	0,02	72	73	
	2	680	20	3	76	0,02	72	73	
	1	460	20	4	75	0,01	73	72	

Таблица В.2 – Результаты серий измерений акустического центра для федеральных дорог

Адрес	Полоса	ЛА, а/ч	ГА, а/ч	% ГА	Измеренный уровень звука, дБА	Доля в общем потоке	Измеренный фон в точке измерений от воздействия других полос, дБА	Воздействие непосредственно от полосы движения с коррекцией на фоновое воздействие, дБА	Хац
Участок КАД от ЗСД до Приморское ш.	1 период движения								
	1	580	200	26	75	0,76	71	73	2,78

Адрес	Полоса	ЛА, а/ч	ГА, а/ч	% ГА	Измеренный уровень звука, дБА	Доля в общем потоке	Измеренный фон в точке измерений от воздействия других полос, дБА	Воздействие непосредственно от полосы движения с коррекцией на фоновое воздействие, дБА	Хац	
	2	180	40	18	72	0,24	71	63		
	2 период движения									
	1	560	120	18	77	0,74	73	75		3,33
	2	200	40	17	74	0,26	71	71		
	3 период движения									
	1	660	240	27	77	0,72	73	75		2,70
	2	260	40	13	73	0,28	72	64		
	4 период движения									
	1	880	100	10	81	0,67	77	79		3,22
	2	440	20	4	78	0,33	76	74		
Участок КАД от Парашютной ул. до Приморского ш.	1 период движения									
	1	1220	680	36	85	0,55	78	84	2,78	
	2	1040	60	5	80	0,47	79	74		
	2 период движения									
	1	460	240	34	79	0,21	75	77	3,22	
	2	340	0	0	73	0,15	66	72		
Участок КАД от Энгельса к Выборгскому ш.	1 период движения									
	1	960	720	43	85	0,43	82	82	4,41	
	2	820	60	7	86	0,37	85	78		
	3	440	0	0	87	0,20	86	73		
	2 период движения									
	1	900	440	33	85	0,29	81	83	5,08	
	2	1300	40	3	86	0,42	84	82		
3	900	0	0	86	0,29	85	79			
1 период движения										
1	680	260	28	85	0,31	80	83	5,05		

Адрес	Полоса	ЛА, а/ч	ГА, а/ч	% ГА	Измеренный уровень звука, дБА	Доля в общем потоке	Измеренный фон в точке измерений от воздействия других полос, дБА	Воздействие непосредственно от полосы движения с коррекцией на фоновое воздействие, дБА	Хац	
Участок КАД. В районе посёлка Петергоф Сити	2	1060	20	2	86	0,49	84	81		
	3	420	40	9	87	0,19	87	79		
	2 период движения									
	1	440	60	12	85	0,20	80	84	4,97	
	2	1080	40	4	86	0,50	82	83,5		
	3	640	0	0	86	0,30	85	79		
	3 период движения									
	1	740	80	10	85	0,30	81	83	5,08	
	2	960	20	2	86	0,39	84	82		
3	740	0	0	87	0,30	86	79			
Участок КАД. Под ул. Челябинская	1 период движения									
	1	6680	5660	46	83	0,21	80	80	6,47	
	2	10860	5480	34	85	0,35	78	84		
	3	10220	100	1	84	0,32	82	79		
	4	3700	0	0	83	0,12	82	74		
	2 период движения									
	1	6840	6240	48	84	0,22	82	80	6,53	
	2	11020	6020	35	85	0,35	82	82		
3	10520	240	2	84	0,33	82	80			
4	3440	0	0	84	0,11	84	73			
Участок ЗСД. Васильевский остров	1 период движения									
	1	9500	5200	35	87	0,30	85	82	7,53	
	2	14900	8200	35	90	0,47	88	85		
	3	20300	240	1	89	0,65	88	83		
	4	16520	0	0	90	0,53	89	83		

Адрес	Полоса	ЛА, а/ч	ГА, а/ч	% ГА	Измеренный уровень звука, дБА	Доля в общем потоке	Измеренный фон в точке измерений от воздействия других полос, дБА	Воздействие непосредственно от полосы движения с коррекцией на фоновое воздействие, дБА	Хац
	2 период движения								
	1	10420	4840	32	88	0,33	86	83	7,46
	2	14620	7640	34	89	0,46	85	87	
	3	19740	200	1	88	0,63	86	84	
	4	15940	0	0	89	0,51	87	84	

Приложение Г. Оценка затухания звукового поля по результатам расчетов и натуральных измерений

Таблица Г.1 – Оценка затухания с высотой за счет подстилающей поверхности

н.п.	Высота	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
15 метров										
Расчет по предложенной методике	0,5/1,0	0,1	0,1	0,6	1,6	2,6	3,2	3,5	3,6	3,6
	1,5/2,0	0,1	0,1	0,1	0,5	0,9	1,1	1,2	1,2	1,2
	2,5/3,0	0,1	0,1	0,2	0,5	0,9	1,1	1,3	1,3	1,4
Результаты измерений	0,5/1,0	0,1	0,1	0,9	0,7	2,4	3,6	4,1	3,6	3,0
	1,5/2,0	0,1	0,1	0,1	0,8	1,0	0,8	1,4	1,3	1,4
	2,5/3,0	0,1	0,1	0,1	0,6	0,4	1,2	1,1	1,3	1,4
30 метров										
Расчет по предложенной методике	0,5/1,0	0,0	0,0	0,3	1,2	1,9	2,4	2,7	2,8	2,8
	1,5/2,0	0,0	0,0	0,2	0,8	1,2	1,5	1,6	1,7	1,7
	2,5/3,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,7	1,0	1,1	1,2	1,2
Результаты измерений	0,5/1,0	0,0	0,0	0,6	2,0	1,9	2,2	2,4	3,1	2,9
	1,5/2,0	0,0	0,0	0,0	0,6	2,0	1,1	2,5	2,4	2,3
	2,5/3,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	1,4	1,3	1,5	1,6
60 метров										
Расчет по предложенной методике	0,5/1,0	0,0	0,0	0,3	1,0	1,6	1,9	2,0	2,0	2,1
	1,5/2,0	0,0	0,0	0,3	0,8	1,4	1,9	2,0	2,0	2,0
	2,5/3,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,6	0,8	1,0	1,0	1,1
Результаты измерений	0,5/1,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,8	2,3	1,7	2,4	2,0
	1,5/2,0	0,0	0,0	0,2	1,3	1,5	2,3	1,7	2,1	2,3
	2,5/3,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,5	0,6	0,8	0,8	1,2

Таблица Г.2 – Оценка затухания звука по фасаду здания

н.п.	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц																	
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	Осредненные результаты натурных измерений									Результаты расчетов по предложенной методике								
48 м (16 эт)	0,5	3,4	1,9	3,8	3,9	4,8	4,9	5,3	8,8	1,0	3,8	2,7	4,6	4,7	3,7	3,8	4,1	9,2
42 м (14 эт)	2,0	4,3	2,9	4,2	4,3	4,4	4,8	5,7	7,9	1,3	4,8	3,5	4,5	4,9	3,7	3,4	4,2	9,1
36 м (12 эт)	2,5	3,5	2,2	3,7	3,7	4,2	4,0	4,8	8,0	1,1	3,5	3,3	4,8	4,9	3,8	3,1	4,5	8,8
30 м (10 эт)	2,1	2,8	2,9	3,7	4,0	4,9	4,5	3,7	6,7	1,4	4,4	4,3	5,0	5,0	4,2	2,9	4,3	9,0
24 м (8 эт)	3,0	2,8	4,4	3,6	3,3	3,8	4,2	3,2	7,7	2,5	3,5	5,1	5,1	5,2	4,4	3,0	3,6	8,9
21 м (7 эт)	4,0	4,5	4,0	3,9	3,6	3,4	3,4	4,0	6,8	2,2	4,2	4,8	5,1	5,2	4,7	3,1	3,2	9,0
18 м (6 эт)	3,5	4,2	4,0	4,1	3,4	4,0	3,9	4,1	7,2	1,8	5,6	4,8	5,8	5,0	5,1	3,3	2,8	9,3
15 м (5 эт)	5,1	4,9	5,4	4,8	4,3	4,3	4,6	5,4	9,7	2,8	4,8	5,5	5,3	5,2	5,2	3,7	2,6	9,2
12 м (4 эт)	4,8	3,2	3,7	4,8	4,1	4,5	4,7	4,8	7,5	3,1	4,0	5,1	5,9	5,2	5,4	4,1	2,6	8,5
9 м (3 эт)	5,8	5,9	4,2	6,1	5,3	5,3	5,3	6,0	8,0	5,2	5,5	5,2	5,1	5,4	5,6	4,5	3,0	7,6
6 м (2 эт)	4,0	4,2	4,5	6,2	7,2	7,2	6,8	4,6	6,6	5,3	5,0	6,3	5,2	5,7	5,9	5,0	3,7	7,4
3 м (1 эт)	4,0	5,2	6,7	10,3	10,1	11,2	11,4	10,0	11,7	4,5	6,0	7,0	10,5	10,0	11,0	10,2	11,0	16,0

Приложение Д. Акты внедрения

Общество с ограниченной ответственностью «ТЕХНОПРОЕКТ»

197374, г. Санкт-Петербург, ул. Оптиков, д. 4, корп. 3, стр.1, пом. 9-Н, ком. 22; ОГРН 1077847477685, ИНН 7842362082, КПП 781401001
p/c 40702810132470000242, ФИЛИАЛ "САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ" АО "АЛЬФА-БАНК", к/с 30101810800000000786, БИК 044030786
телефон (812) 3271113, e-mail: info@tpview.ru, сайт: www.tpview.ru

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
В.А. Васильева на тему «Научное обоснование и рекомендации по актуализации методик
расчета шума автотранспортных потоков»

Комиссия в составе Иванова А.В., Никифорова А.В и Кузьмицкого А.М. (авторский коллектив АРМ «Акустика»), составила настоящий Акт о том, что результаты диссертационной работы «Научное обоснование и рекомендации по актуализации методик расчета шума автотранспортных потоков» соискателя научной степени кандидата технических наук Васильева В.А., использованы при разработке перспективного модуля для программного комплекса АРМ «Акустика» 3 в части методики определения акустического центра автотранспортного потока, которая позволила учитывать неравномерность распределения автотранспорта по полосам движения и оценки влияния подстилающей поверхности на затухания звукового поля от автотранспортного потока.

Использование результатов диссертационной работы позволило конкретизировать методологию выбора акустического центра, с учетом состава автотранспортного потока и его характеристик по каждой из полос движения, а также оценку влияния подстилающей поверхности на затухание звуковой энергии, при автоматизации расчетов, что позволило с большей точностью производить оценку воздействия и эффективности шумозащитных мероприятий от шума автотранспортного потока.


Технический директор ООО «Технопроект», к.т.н.

 Иванов А.В.

Ведущий программист ООО «Технопроект»

 Никифоров А.В.

Генеральный директор ООО «Технопроект»

 Кузьмицкий А.М.

Генеральный директор



А.М. Кузьмицкий

Исполнитель: 8 (812) 327-11-13

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

АО «Институт «Трансэкопроект»



Щуцкий А.В.



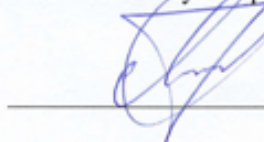
АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
В.А. Васильева на тему «Научное обоснование и рекомендации по актуализации методик
расчета шума автотранспортных потоков»

Комиссия в составе заместителя генерального директора АО «Институт «Трансэкопроект» Лебедева П.О. и доктора технических наук, главного специалиста АО «Институт «Трансэкопроект» Тюриной Н.В. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Научное обоснование и рекомендации по актуализации методик расчета шума автотранспортных потоков» соискателя научной степени кандидата технических наук Васильева В.А., использованы при разработке проектной документации в части оценки акустического воздействия от автотранспортного потока.

Использование результатов диссертационной работы позволяет произвести оценку акустического центра автотранспортного потока с учётом неравномерности распределения автотранспорта по полосам движения, а также оценку влияния подстилающей поверхности на затухания звукового поля, что позволило с большей эффективностью производить оценку воздействия и эффективности шумозащитных мероприятий.

Заместитель генерального директора
АО «Институт «Трансэкопроект»



П.О. Лебедев

Д.т.н., главный специалист
АО «Институт «Трансэкопроект»



Н.В. Тюрина



НОРНИКЕЛЬ

ИНСТИТУТ
ГИПРОНИКЕЛЬ

АКТ

о внедрении научных результатов диссертационной работы
Васильева В.А.
«Научное обоснование и рекомендации по актуализации методик расчета шума автотранспортных потоков»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Васильева Вадима Александровича на тему «Научное обоснование и рекомендации по актуализации методик расчета шума автотранспортных потоков», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.7 Акустика, внедрены на предприятии.

Результаты диссертационной работы используются ООО «Институт Гипроникель» для оценки акустического воздействия от автотранспортных потоков при проведении оценки воздействия на окружающую среду в рамках разработки документации для крупных промышленных объектов.

Новизна подхода и методик, приведенных в диссертационной работе, позволяет сократить время и увеличить точность расчета при оценке воздействия на окружающую среду от проездов расположенных на территории промышленных предприятий, при этом позволяет оценивать влияния различных типов подстилающей поверхности и фасадов зданий.

Генеральный директор



А.А. Вартомо

ООО "Институт Гипроникель"

ОКПО 00201365
ОГРН 5067847542967
ИНН/КПП 7804349796/780401001

Гражданский пр., 11
Санкт-Петербург,
Россия, 195220

тел.: +7 812 335-31-24
gn@nornik.ru