

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

На правах рукописи



ШАШУРИН АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ
АКУСТИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОСНОВНЫМИ ТИПАМИ
ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ**

01.04.06 – Акустика

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор, заслуженный
деятель науки РФ
Иванов Николай Игоревич

Санкт-Петербург
2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	16
1.1 Описание объектов исследования	16
1.2 Характер акустического загрязнения в городах и населённых пунктах и нормы шума в РФ	22
1.3 Классификация шумозащитных экранов и их применение для снижения шума	26
1.4 Акустическая эффективность шумозащитных экранов на железных и автомобильных дорогах.....	33
1.5 Связь акустической эффективности экранов с различными факторами	38
<i>1.5.1 Перечень факторов, влияющих на эффективность шумозащитных экранов.....</i>	<i>38</i>
<i>1.5.2 Конструктивные факторы</i>	<i>39</i>
<i>1.5.3 Акустические характеристики экрана</i>	<i>41</i>
<i>1.5.4 Акустические свойства опорной поверхности.....</i>	<i>44</i>
<i>1.5.5 Влияние надстройки на свободном ребре.....</i>	<i>45</i>
<i>1.5.6 Расположение экрана и РТ в пространстве</i>	<i>49</i>
<i>1.5.7 Влияние материала, из которого изготовлены акустические панели экрана</i>	<i>49</i>
1.6 Акустическая долговечность шумозащитных экранов	50
1.7 Акустические измерения шумозащитных экранов	59
1.8 Природа дифракции, теория и расчёт шумозащитных экранов.....	60
1.9 Постановка задач исследования	69
ГЛАВА 2 КОМПЛЕКСНОЕ НАТУРНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ШУМА В ГОРОДАХ	

И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	71
2.1 Цели, задачи и масштабы обследования	71
2.2 Методика натурных измерений	72
2.2.1 Общие положения и средства измерений	72
2.2.2 Измерение уровней звука на селитебной территории	73
2.2.3 Измерения шумовых характеристик автомобильных и железных дорог	75
2.2.4 Измерения коэффициентов звукопоглощения	77
2.2.5 Измерения звукоизоляции	79
2.3 Характер акустического загрязнения в городах и населенных пунктах 	81
2.3.1 Общие положения	81
2.3.2 Автомобильный транспорт	82
2.3.3 Железнодорожный транспорт	89
2.3.4 Технологическое оборудование	93
2.4 Акустическая эффективность транспортных и технологических шумозащитных экранов	94
2.4.1 Общие положения	94
2.4.2 Транспортные шумозащитные экраны вдоль автомобильных дорог .	95
2.4.3 Транспортные шумозащитные экраны вдоль железных дорог	106
2.5 Акустические свойства шумозащитных экранов: звукоизоляция и звукопоглощение	115
2.5.1 Исследования звукоизолирующих свойств транспортных экранов...	115
2.5.2 Исследования звукопоглощающих свойств транспортных экранов. .	120
2.6 Акустическая долговечность шумозащитных экранов	123
2.7 Снижение шума шумозащитными экранами в жилой застройке	129
2.8 Выводы по главе	141
ГЛАВА 3 УТОЧНЁННАЯ ТЕОРИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ	144

3.1 Основные допущения и положения теории	144
3.2 Выбор и описание расчётных схем	152
3.3 Правило расчётов составления математических моделей шумозащитных экранов	157
3.4 Математические модели и теоретические исследования транспортных шумозащитных экранов	158
3.4.1 Прямой экран без надстройки на свободном ребре	158
3.4.2 Экран с Г-образной надстройкой на верхнем свободном ребре	165
3.4.3 Экран с Т-образной надстройкой на свободном ребре	167
3.4.4 Шумозащитный экран с антидифрактором на свободном ребре	170
3.4.5 Вертикальный экран, установленный на эстакаде	172
3.4.6 Экран, установленный в акустически необработанной галерее	178
3.4.7 Шумозащитный прямой экран с дифракцией звука на боковом ребре	181
3.5 Математические модели технологических экранов	184
3.5.1 П-образный (в плане) прямой экран	184
3.5.2 Замкнутый (в плане) прямой экран	188
3.6 Прямой транспортный или технологический экран со щелью или проёмом	189
3.7 Выводы по главе	199
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ НА СТЕНДАХ И В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ	202
4.1 Цели и задачи исследований	202
4.2 Основные положения методики экспериментальных исследований на стендах и в натурных условиях	202
4.2.1 Методика экспериментов для проверки основных допущений теории в натурных условиях	202
4.2.2 Измерение показателя дифракции	204
4.2.3 Стенд для испытаний транспортных экранов: описание, методики	

<i>проведения экспериментов</i>	205
<i>4.2.4 Стенд для испытаний технологических экранов: описание, методики проведения экспериментов</i>	211
<i>4.2.5 Условия измерений</i>	215
<i>4.2.6 Акустическая аппаратура</i>	216
<i>4.2.7 Методология измерений экранов расположенных в галерее</i>	217
<i>4.2.8 Определение погрешности измерений</i>	218
4.3 Исследования звуковых полей и показателя дифракции в натуральных условиях	220
<i>4.3.1 Исследование характера звуковых полей</i>	220
<i>4.3.2 Измерения показателя дифракции</i>	226
4.4 Проверка точности расчётов	228
4.5 Исследование транспортных экранов на открытом стенде	233
<i>4.5.1 Исходные данные</i>	233
<i>4.5.2 Исследование зависимости акустической эффективности экрана от высоты</i>	234
<i>4.5.3 Связь эффективности экрана с расстоянием до точки измерений ..</i>	238
<i>4.5.4 Влияние звукопоглощающих свойств экрана на его эффективность</i>	240
<i>4.5.5 Влияние звукоизоляции экранов на их эффективность</i>	242
4.6 Исследование технологических экранов на опытном стенде	247
<i>4.6.1 Проверка основных допущений теории</i>	247
<i>4.6.2 Исходные данные для определения акустической эффективности опытного экрана</i>	248
<i>4.6.3 Влияние расположения точки измерений на акустическую эффективность экрана</i>	249
<i>4.6.4 Влияние звукопоглощения на акустическую эффективность экрана.</i>	252
<i>4.6.5 Связь конструктивного исполнения экрана с эффективностью</i>	254
<i>4.6.6 Влияние высоты экрана на его акустическую эффективность</i>	257
<i>4.6.7 Влияние щелей на эффективность экрана.....</i>	260
<i>4.6.8 Исследование экранов с надстройкой на свободном ребре.....</i>	262

4.7 Экспериментальные исследования экранов, установленных в галерее	264
4.8 Выводы по главе	271
ГЛАВА 5 ШУМОЗАЩИТНЫЕ ЭКРАНЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ	275
5.1 Рекомендации и требования к шумозащитным экранам	275
5.1.1 Общие сведения	275
5.1.2 Нагрузки на экран	276
5.1.3 Нагрузки на фундаменты	276
5.1.4 Требования к стойкам экрана	277
5.1.5 Применение стоек различной конструкции при перепаде высот и поворотах	278
5.1.6 Требования к панелям шумозащитного экрана	279
5.1.7 Конструкционные особенности шумозащитных экранов	282
5.2 Шумозащитные экраны из импрегнированной древесины	284
5.3 Шумозащитные экраны из щепобетона	292
5.4 Шумозащитные экраны для высокоскоростных железнодорожных магистралей	295
5.4.1 Общие сведения	295
5.4.2 Нагрузки на конструкции экрана при высокоскоростном движении	296
5.4.3 Требования к панелям экрана для ВСМ	300
5.4.4 Испытание панелей	307
5.4.5 Стойки экрана для ВСМ	311
5.5 Выводы по главе	313
ГЛАВА 6 АПРОБАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ	315
6.1 Апробация предложенных решений панелей из импрегнированной древесины, щепобетона и панелей для ВСМ	315
6.1.1 Применение панелей из импрегнированной древесины на практике	315
6.1.2 Применение панелей из щепобетона на практике	324

6.1.3 Применение шумозащитных экранов на ВСМ.....	327
6.2 Техничко-экономический эффект от внедрения	329
6.3 Масштабы внедрения результатов исследований	333
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	337
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	344
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	345
ПРИЛОЖЕНИЯ	377
Приложение А Измерение звукоизоляции	378
Приложение Б Измерение звукопоглощения	390
Приложение В Патенты и нормативно-техническая документация, разработанная при участии автора, акты внедрения.....	404

ВВЕДЕНИЕ

Неблагоприятные факторы окружающей среды играют серьёзную роль в состоянии здоровья населения. В Государственном Докладе «О состоянии и об охране окружающей среды в Российской Федерации в 2016 году» [1] отмечается: «Наиболее существенным физическим фактором опасности является шум. Постоянное акустическое загрязнение в основном городских территорий является причиной заболеваний сердечно-сосудистой, нервной систем и органов слуха». ЮНЕСКО сформулировало эту проблему следующим образом: «Шум – бедствие современного мира и нежелательный продукт его технической цивилизации».

В Государственном Докладе указывается: «Шумовое загрязнение уже длительное время продолжает оставаться одной из приоритетных экологических проблем крупных городов. Так в Москве до 70% территории подвержены сверхнормативному шуму от различных источников. Проблема шума занимает первое место среди обращений жителей по состоянию окружающей среды» [1].

На защиту от шума тратятся серьёзные средства. Так в современном проекте транспортных систем (автодорожных, железнодорожных, ВСМ и других) расходы на шумозащиту могут достигать 5–10% стоимости инфраструктурных проектов. Расходы только на акустические экраны и шумозащитное остекление, например, в ЕС достигает 1% ВВП.

Акустические или шумозащитные экраны в настоящее время стали самым распространённым средством шумозащиты. Во всём мире насчитывается уже многие десятки тысяч километров вдоль автомобильных и железных дорог, в аэропортах и прочих. Производством шумозащитных экранов заняты десятки фирм, как, например: «Bongard», CIR «Ambiente», «DoorHan», «Durisol», «ОЗМК», «ЗАК», «АМД» и др.

Исследования шумозащитных экранов были начаты за рубежом в 60-х годах прошлого столетия, тогда же появились первые шумозащитные барьеры в США, Италии, Великобритании, Германии и других странах. В 70-х годах XX века

впервые исследования шумозащитных экранов были выполнены в СССР. В нашей стране исследованием экранов для снижения шума занимались В. А. Аистов, Н. И. Иванов, И. Л. Карагодина, Д. А. Куклин, П. В. Матвеев, Г. Л. Осипов, П. И. Поспелов, В. Г. Прутков, Е. П. Самойлюк, Н. Г. Семёнов, Н. В. Тюрина, И. А. Шишкин, И. Л. Шубин; за рубежом А. Андертон, Д. Арена, М. Джонассон, М. Крокер, Дж. Куртце, З. Маекава, Н. Николов, Г. Окубо, С. Редфери, М. Реттингер, К. Рунвара, С. Харрисон, К. Ямомото и другие.

В нашей стране шумозащитные экраны массово начали применяться только в конце 90-х годов, то есть значительно позже, чем за рубежом. Практика использования экранов выявила ряд их существенных недостатков. Экраны обладают малой долговечностью, так как используют устаревшие технологии (например, экраны из оцинкованной стали, давно не применяемые за рубежом). Нередко экраны не обеспечивают требуемых звукоизоляции и звукопоглощения, обладают низкой эффективностью из-за недостатков в проектировании и ошибок при монтаже. Экраны не только быстро разрушаются, но и имеют неприглядный вид из-за использования устаревших технологий. Массовые обследования экранов в нашей стране не проводятся, строгие правила по их приёмке и эксплуатации отсутствуют, за исключением практики ОАО «РЖД». Этот недостаток связан с отсутствием или недостатками нормативно-технической документации (НТД), посвящённой проектированию, монтажу, приёмке и эксплуатации шумозащитных экранов. Об отсутствии таких документов указывается и в упомянутом выше Государственном Докладе: «Кроме того из-за отсутствия соответствующих критериев оценки не представляется возможным проведение оценки воздействия объектов строительства на окружающую среду (ОВОС) по фактору шума на озеленённые территории и ООПТ, парков и других озеленённых территорий» [1]. Таким образом, актуальными задачами для практики является поиск новых технических решений, а также создание или обоснование новых технологий взамен устаревших, разработка новой НТД, в том числе методик расчетов шумозащитных экранов.

Современные методы расчёта экранов базируются на оптико-дифракционной теории и были созданы ещё во второй половине XX столетия. Они оперируют понятиями: угол дифракции, разность хода звуковых лучей, число Френеля и другими, подчерпнутыми из геометрической теории акустики. Эта теория акустических экранов и методы расчёта обладают рядом недостатков (не учитываются акустические свойства экранов и близрасположенных поверхностей; нет явной связи эффективности с высотой экрана и другие). В последнее время появились работы Н. В. Тюриной и И. Л. Шубина, где вместо понятия звуковых лучей предложено рассматривать образующиеся перед и за экранами звуковые поля. Используя такой подход, Н. В. Тюриной удалось получить расчётные формулы, свободные от недостатков оптико-геометрической теории. И в то же время отметим, что предложенные Н. В. Тюриной формулы дают несколько завышенные значения эффективности и решают в основном частные задачи. Базируясь на предложенном подходе необходимо уточнить теорию акустических экранов.

Цель работы: анализ практики применения шумозащитных экранов для снижения акустического загрязнения в городах и населённых пунктах, и научное обоснование новых технических решений и технологий для их изготовления, а также уточнение теории транспортных и технологических шумозащитных экранов.

Научная новизна:

- разработана уточнённая теория шумозащитных экранов, базирующаяся на допущении квазидиффузного звукового поля, образующегося множеством отражений звука в условном объёме между источниками шума, экраном и опорной поверхностью;
- предложено понятие условного объёма, который обладает свойствами квазидиффузности по признаку изотропности и равномерен в любой горизонтальной плоскости, и уровней звукового давления (УЗД) уровней звука (УЗ) в котором уменьшаются по высоте экрана в результате дивергенции;

- с использованием принятых допущений на основе статистической теории акустики разработаны уточнённые методы расчёта шумозащитных экранов: транспортных (прямых, без надстройки и с надстройкой на свободном ребре в виде Г-образной полки, антидифрактора; и Т-образной полки; экранов установленных на эстакаде и в галерее, экраны со щелью и другие) и технологических (П-образных и замкнутых в плане);
- введено понятие эффективной высоты шумозащитного экрана, учитывающей высоту источника шума и расчётной точки;
- исследовано влияние технических и конструктивных особенностей (боковые отгоны, щели, высота и длина экрана, надстройка на свободном ребре и другие), расположения экрана (эстакада, галерея) и его акустических свойств (звукоизоляция и звукопоглощение) на акустическую эффективность шумозащитных экранов;
- введено понятие акустическая долговечность, связанная с технологией шумозащитного экрана, показывающая свойство шумозащитного экрана длительно сохранять свою работоспособность и акустические характеристики до наступления предельного состояния при определенных условиях эксплуатации.

Практическая значимость (полезность):

- разработаны уточнённые рекомендации, а также требования по проектированию, монтажу и эксплуатации транспортных и технологических шумозащитных экранов;
- проанализированы результаты комплексного обследования шумозащитных транспортных и технологических экранов в натурных условиях, включавшего определение акустической эффективности и акустической долговечности, а также акустических свойств экранов, показавших направление улучшения их характеристик;

- предложены новые технические решения, на основе которых разработаны конструкции транспортных и технологических экранов, новизна и оригинальность которых подтверждена патентами;
- обосновано применение новых технологий для изготовления экранов (из импрегнированной древесины и щепобетона), применение которых обеспечивает акустическую долговечность и высокую акустическую эффективность экранов;
- результаты исследований использованы при разработке 10 нормативно-технических документах, (СП, СТУ, ТУ, ГОСТ, СТО и др.).

Внедрения:

Рекомендованные автором экраны установлены более чем на 30 объектах ЦКАД г. Москвы, Западно-скоростной диаметр г. Санкт-Петербург, г. Волгоград, шоссе Авиаторов, г. Псков, Ленинградское шоссе, дер. Заситино Псковской области, дер. Бурачки Псковской области, г. Санкт-Петербург, ул. Ольги Берггольц д. 34, г. Санкт-Петербург, Канонерский остров и др. Проектные решения по исследованиям автора заложены при проектировании первой в России высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань, где спроектировано свыше 300 км шумозащитных экранов.

Апробация работы:

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Российских и международных конференциях или конгрессах: II Международный экологический конгресс «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов» ELPIT 2009. г. Тольятти; III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, «Защита населения от повышенного шумового воздействия», 21–23 марта 2011 г. Санкт-Петербург; IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 26–28 марта 2013 г. Санкт-Петербург; Euronoise 2009, 26–28 октября 2009 г., Эдинбург, Шотландия; I Всероссийской акустической конференции, 6–10 октября 2014 г., г. Москва; V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 18–20 марта 2015 г.

Санкт-Петербург; IV Международной научно-практической конференции в университете ПГУПС им. Александра I, Санкт-Петербург, 22–24 октября 2014г; VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Санкт-Петербург, 21–23 марта 2017; Научно-практической конференции «Технические средства мониторинга гидротехнических сооружений и экологическая безопасность Среднеазиатского региона», г. Бишкек, Кыргызская Республика, 29 сентября 2017 г; Научно-практическом семинаре «Проектирование шумозащитных экранов» 15–16 сентября 2010г. г. Санкт-Петербург; Техническом совете ОАО «РЖД» 29 августа 2017г. «Защита от шума для высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства»; X ежегодной межрегиональной научно-практической конференции «Модернизация дорожного хозяйства: опыт и перспектива» 12–14 апреля 2017г, г. Екатеринбург и др.; а также на технических советах в РЖД (октябрь 2017г), ФДА «РОСАВТОДОР» и на заседании кафедры «Экология и Безопасность жизнедеятельности» Балтийского государственного технического университета им. Д. Ф. Устинова (24 апреля 2018г.).

Публикации:

По материалам диссертации опубликовано 42 работы, в том числе 15 в списке журналов рекомендованных ВАК, из них получено 7 патентов, а также написано две монография.

На защиту выносятся:

- Уточнённая теория шумозащитных экранов, базирующаяся на допущении о существовании квазидиффузного звукового поля множественных отражений звука перед экраном;
- Понятие условного объёма, ограниченного источниками шума (ИШ), шумозащитным экраном (ШЭ) и опорной поверхностью, в котором звуковое поле изотропно во всех точках и равномерно в любой горизонтальной плоскости, но уменьшается по высоте экрана в результате дивергенции;

- Понятие эффективной высоты ШЭ – перпендикуляр из вершины свободного ребра на условную линию, соединяющую ИШ и расчётную точку (РТ);
- Понятие акустической долговечности шумозащитного экрана, показывающей свойство шумозащитного экрана длительно сохранять свою работоспособность и акустические характеристики до наступления предельного состояния при определенных условиях эксплуатации;
- 7 расчётных схем транспортных экранов, 2 технологических экранов, и общая схема и разработанные для них математические модели, в которых получены зависимости акустической эффективности экранов от конструктивных особенностей (форма, высота, длина и другие); акустических свойств и геометрии условного объёма, включающих звукопоглощение ШЭ, ИШ и опорной поверхности, расстояние от ШЭ до РТ, показателя дифракции, определяемого экспериментально и другие;
- Результаты теоретических исследований зависимости акустической эффективности экрана от акустических свойств условного объёма и его геометрических параметров, высоты ШЭ; его акустических и геометрических свойств, наличия надстройки на свободном ребре экрана; высоты эстакады, на которой установлен ШЭ и другие;
- Результаты массового комплексного обследования ШЭ, установленных вдоль автомобильных и железных дорог в жилой застройке, включающего определение акустической эффективности экранов, их акустических свойств (звукоизоляция и звукопоглощение), акустической долговечности и соответствие экранов заявленным техническим требованиям;
- Методики измерений акустических характеристик и акустической эффективности транспортных и технологических экранов на опытных стендах и в натурных условиях;
- Результаты экспериментальных исследований, подтвердивших корректность основных допущений уточнённой теории экранов;
- Результаты измерений показателя дифракции в натурных условиях;

- Результаты экспериментальных исследований, установивших или подтвердивших связь акустической эффективности экранов с высотой, материалом, расстоянием от ШЭ до РТ, звукопоглощением и звукоизоляцией экрана, конструктивным исполнением экрана;
- Обоснование применения новых технологий шумозащитных экранов из импрегнированной древесины и щепобетона;
- Разработанные требования к транспортным и технологическим экранам и уточнённые рекомендации по их проектированию, монтажу и эксплуатации;
- Апробация результатов исследования при установке различных транспортных и технологических экранов в жилой застройке;
- Результаты внедрения отдельных положений настоящей работы на различных объектах и в нормативно-технической документации.

Структура и объём работы:

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 315 наименований, 3 приложений, изложена на 376 страницах машинописного текста, в том числе содержит 98 таблиц и 196 рисунков.

Автор приносит благодарность своим коллегам – сотрудникам кафедры «Экология и Безопасность жизнедеятельности» Балтийского государственного технического университета (далее БГТУ) им. Д. Ф. Устинова: научному консультанту, доктору технических наук, профессору Н. И. Иванову; кандидату технических наук Ю. С. Бойко, а также В. В. Светлову, К. В. Бужинскому, А. Е. Меньшакову за неоценимую помощь при подготовке и написании диссертации.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Описание объектов исследования

Защиту от акустического загрязнения в городах и населенных пунктах в основном обеспечивают шумозащитные (акустические) экраны и звукоизолирующее (специальное) остекление [2–5]. Основными источниками шума в городах являются [6–10]: автомобильный транспорт (свыше 70% акустического загрязнения), железнодорожный транспорт (около 10%), авиационный транспорт (от 5 до 25%), а также различные стационарные или передвижные источники (компрессорные станции, чиллеры, дизель-электрические установки и прочее).

В распоряжении проектировщиков транспортной инфраструктуры имеется довольно ограниченный набор средств защиты от шума: звукоизолирующее остекление (условная эффективность на территории с учетом поправки в нормы до 10 дБА), звукопоглощающий асфальт (не более 3 дБА), экранирующие земляные сооружения (до 10–12 дБА), шумозащитные экраны (до 15 дБА). Проектировщики стационарных установок и систем используют глушители шума (до 12 дБА) и звукоизолирующие капоты (до 10 дБА), специальное остекление и шумозащитные экраны. Основным, а зачастую, наиболее эффективным средством защиты от шума в городах и населённых пунктах являются шумозащитные экраны 2-х типов: транспортные, устанавливаемые вблизи автомобильных и железных дорог; и технологические, устанавливаемые вблизи стационарных источников шума (чиллеры, дизель-электростанции, градирни и т. д.). Принципиальное различие их в том, что первые имеют три свободных ребра и при проектировании одинаково важен как выбор высоты, так и длины экрана, а вторые защищены боковыми отгонами, имея П-образную или замкнутую форму, и при проектировании важен выбор только высоты экрана, что отражено на рисунке 1.1.

Транспортные экраны состоят в основном из элементов: стойки, фундамент, шумозащитные панели (рисунок 1.2). Акустические панели делятся по принципу действия на два типа: отражающе-поглощающие, содержащие в своём составе ЗПМ, и отражающие, в которых ЗПМ отсутствует.

Шумозащитные (акустические) панели изготавливаются из различных материалов: металл, дерево, бетон, пластполимеры и прочие. В нашей стране наибольшее распространение получили экраны металлические, панели которых изготавливаются из алюминия и оцинкованной стали, а также прозрачные (акриловое стекло, монолитный поликарбонат и другое). Вид экранов показан на рисунках 1.3 и 1.4.

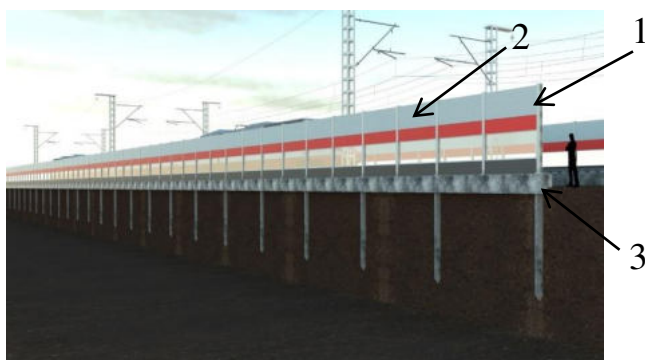


а – транспортные



б – технологические

Рисунок 1.1 – Транспортные и технологические экраны:



1– стойка экрана, 2– шумозащитное заполнение, 3– фундамент экрана

Рисунок 1.2 – Основные элементы транспортных экранов



Рисунок 1.3 – Металлические экраны



Рисунок 1.4 – Прозрачные экраны

Предметом исследования, помимо перечисленных экранов, являлись также экраны, изготовленные с применением новейших технологий: импрегнированной древесины и щепобетона (рисунок 1.5; 1.6), а также комбинированные экраны, где использовались как отражающие, так и отражающе-поглощающие панели (рисунок 1.7).



Рисунок 1.5 – Экран из импрегнированной древесины



Рисунок 1.6 – Экран с применением щепобетона



Рисунок 1.7 – Комбинированный экран

Согласно классификации акустических экранов [12] конструктивно они могут выполняться со свободным верхним ребром и с надстройкой на ребре (Г-образные, Т-образные, V-образные и прочие). В процессе исследования рассматривались шумозащитные экраны с тремя типом надстроек: Г- и Т-образные, и с антидифрактором (рисунок 1.8; 1.9).



Рисунок 1.8 – Шумозащитный экран с Г-образной надстройкой



Рисунок 1.9 – Шумозащитный экран с антидифрактором

Были исследованы как П-образные, так и □-образные (в плане) технологические экраны (рисунок 1.10), изготовленные как из металлических, так и деревянных (импрегнированная древесина) панелей.



Рисунок 1.10 – Замкнутый технологический экран

Перечень и состав исследованных шумозащитных экранов приведён в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Исследованные шумозащитные экраны

Тип экранов	Принцип действия	Материал	Форма экрана
Транспортные	отражающие	1. акриловое стекло (прозрачные) 2. металл 3. дерево (импрегнированная древесина)	прямые
	отражающе-поглощающие и комбинированные	1. металлические (оцинкованная сталь и алюминий) 2. импрегнированная древесина 3. щепобетон	1) прямые 2) Г-образные 3) с антидифрактором на свободном ребре
Технологические	отражающе-поглощающие	1. импрегнированная древесина 2. металл	1. П-образные и 2. □-образные (в плане) 3. Г-образные 4. с антидифрактором на свободном ребре

1.2 Характер акустического загрязнения в городах и населённых пунктах и нормы шума в РФ

Шумовое загрязнение на протяжении последних лет остаётся одной из наиболее серьёзных экологических проблем крупных городов. Согласно Государственному Докладу «О состоянии и об охране окружающей среды РФ в 2016 г.» [1] в Москве до 70% территории подвержены сверхнормативному шуму от различных источников.

Проблема шума занимает первое место среди обращений жителей по состоянию окружающей среды. Общая структура жалоб на физические факторы в 2016 г. по РФ представлена на рисунке 1.11.

Структура жалоб населения в 2016г
(по данным Роспотребнадзора), %

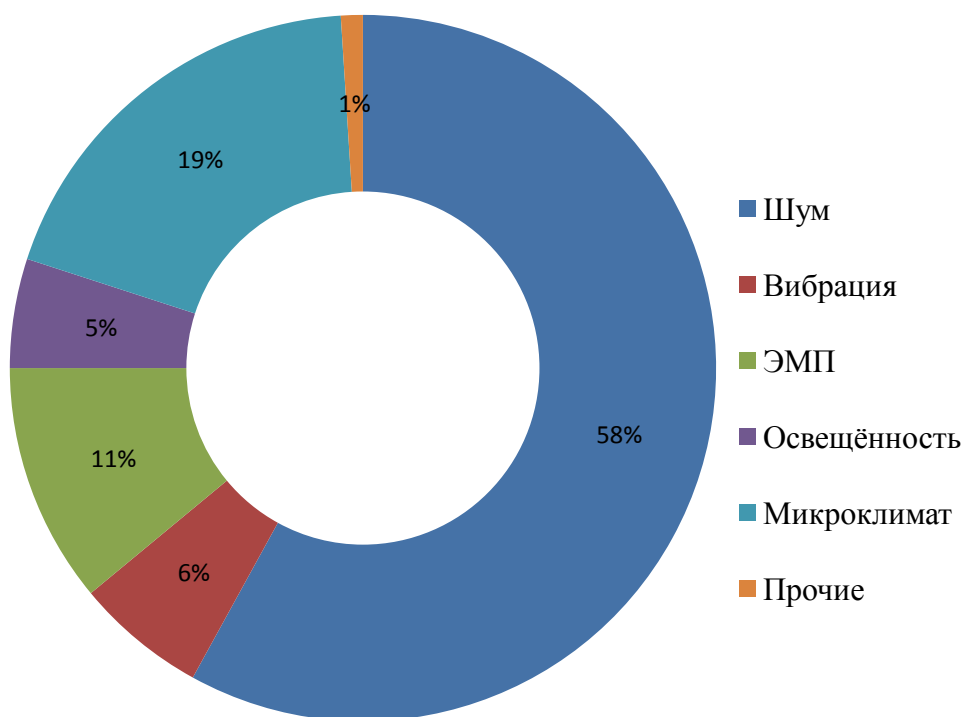


Рисунок 1.11 – Общая структура жалоб на физические факторы в 2016 г. по РФ [1]

Как видно из рисунка 1.11, в 2016 г. удельный вес жалоб на шум составил 58%, что выше на 1% по сравнению с 2015 г. в соответствии с данными Государственного Доклада [1].

Наибольшая площадь шумового загрязнения на территории городов (до 50%) обусловлена воздействием автотранспортных потоков и железнодорожных линий [1].

В 2016 г. отмечался наибольший удельный вес транспортных средств, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по уровням шума и вибрации (12,5 и 8,5% соответственно), при положительной динамике этих показателей относительно 2014 г. [1]. В таблице 1.2 приведены сведения о шуме и вибрации транспортных средств.

Таблица 1.2 – Удельный вес обследованных транспортных средств, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по физическим факторам (по данным Роспотребнадзора) [1]

Фактор	Удельный вес транспортных средств, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям, %			
	2013г	2014г	2015г	2016г
Шум	23,85	21,79	16,29	12,5
Вибрация	16,23	15,63	14,53	8,5

Наибольшее количество исследований на объектах, расположенных на территории жилой застройки, не соответствующих санитарным нормам, также приходится на акустический шум – 16,6 % (таблица 1.3), что выше на 3% по сравнению с 2015 г. в соответствии с данными Государственного Доклада [1].

Таблица 1.3 – Результаты исследований физических факторов на территории жилой застройки (по данным Роспотребнадзора) [1]

Результаты исследований физических факторов на территории жилой застройки, %			
Фактор	Количество исследований, абс.	Из них не соответствуют санитарным нормам, абс.	Удельный вес исследований, не соответствующих санитарным нормам, %
Шум	39615	6575	16,6
Инфразвук	1786	157	8,8
ЭМП	215129	1064	0,49

Основные источники акустического загрязнения окружающей среды – транспорт, строительство, промышленные предприятия. Удельный вклад этих источников варьируется в определённых пределах для различных городов и населённых пунктов, но основной вклад в акустическое загрязнение в городах вносит автомобильный транспорт (от 65 до 80% всех жалоб).

В связи с достижением по увеличению пропускной способности улично-дорожной сети, уровни шума в крупных городах в дневные часы в течение

последних лет стабилизировались, но растёт доля ночного времени с превышающими уровнями шума. В Москве в зоне превышения уровня звука 55 дБА в дневное время проживает порядка 37%; в Лондоне – 39%, в Барселоне – 92%, в Вене – 80,5% [1]. В Санкт–Петербурге, по данным карты шума города, более 65% населения подвергается воздействию повышенных уровней шума, источником которого в 80% случаев является автомобильный транспорт. Территория, на которой уровни шума автотранспорта существенно или заметно превышают допустимые нормы, может простираться вглубь застройки до 150–300 м от внутриквартальных улиц и до 500–700 м от автомагистралей.

Проблема сверхнормативного шумового воздействия ШЭропортов также приобрела большую актуальность в связи с развитием ночных чартерных рейсов. Так, расчетная санитарно-защитная зона ШЭропорта Внуково, целиком расположенного на территории Москвы, составляет 54 км². До 15% площади присоединённых территорий попадает в зону санитарного разрыва по фактору шумового воздействия ШЭропорта «Внуково» при условии эксплуатации взлетно-посадочной полосы (ВПП) только в дневное время суток [1].

По данным Управления Роспотребнадзора по Москве, повышенные уровни шума от пролёта самолётов зарегистрированы в 85% измерений. В 2016 г. по сравнению с 2015 г. увеличилось количество населения, попадающего в зону сверхнормативного воздействия авиационного шума в Хабаровском крае и Калининградской области. В связи с увеличением интенсивности полётов и открытием новых ШЭропортов, в ряде регионов в последние годы увеличились уровни авиационного шума. Так, в 2016 г. по данным Роспотребнадзора увеличились уровни авиационного шума в Ростовской и Калужской областях, и в Пермском крае [1].

Шум в нашей стране строго нормируется. Нормы шума в жилой застройке, принятые в РФ приведены в таблице 1.4. Проанализированные данные об акустическом загрязнении носят довольно общий характер: необходимо выполнить широкомасштабное исследование с целью установить конкретные

характеристики акустического загрязнения от основных видов транспорта и других ИШ.

Таблица 1.4 – Нормы шума в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жилой застройки

Место измерения шума и время суток, ч	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									УЗ или эквивалентные УЗ, дБА	Максимальные УЗ, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1. Палаты больниц и санаториев, 7.00–23.00	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
2. Классные помещения, аудитории	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55
3. Жилые комнаты квартир, 7.00–23.00	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55
4. Номера гостиниц и жилые комнаты общежитий, 7.00–23.00	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	60
5. Территории, непосредственно прилегающие к жилым домам и учебным заведениям, 7.00–23.00	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	70
* См. СН 2.2.4/2.1.8.562–96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»[315].											

1.3 Классификация шумозащитных экранов и их применение для снижения шума

Шумозащитные (акустические) экраны (барьеры) – самое распространённое средство защиты от акустического загрязнения в городах и населённых пунктах [13–25]. Кроме того, они находят применение для снижения шума в офисных и производственных помещениях [13; 26–29]. Н. В. Тюриной разработана классификация акустических экранов по назначению [11; 12].

Все экраны по назначению подразделяются на:

- офисно-производственные экраны, которые устанавливаются в помещениях, чаще всего, в офисах;
- транспортные экраны и экранирующие сооружения, которые устанавливаются вдоль автомобильных и железных дорог;
- технологические экраны, которые устанавливаются на стационарные отдельно стоящие источники (чиллеры, трансформаторы и др.);
- передвигаемые экраны устанавливаются в составе шумозащитного комплекса на транспортных машинах;
- встроенные экраны, которые являются вспомогательными элементами шумозащитных конструкций (например, звукоизолирующих капотов) [13].

Подразделение экранов по назначению более наглядно представлено в таблице 1.5.

Н. В. Тюриной также предложена классификация экранов по принципу действия и конструктивным особенностям (таблица 1.6).

По принципу действия экраны подразделяются на:

- отражающие (без ЗПМ);
- отражающе-поглощающие (с ЗПМ).

По характеру дифракции на свободном ребре:

- тонкие (одинарная дифракция);
- широкие (двойная дифракция).

В настоящей работе рассмотрены в основном шумозащитные экраны первого типа (за исключением Т-образных).

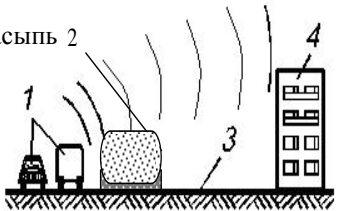
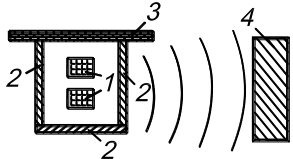
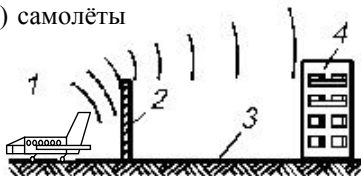
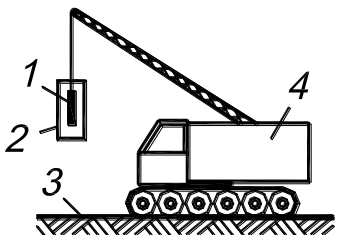
По материалам, из которых изготавливаются панели ШЭ, они подразделяются на металлические, деревянные, прозрачные и композитные.

.

Таблица 1.5 – Классификация акустических экранов и экранирующих сооружений по их назначению

Назначение (тип) ШЭ	Особенности установки и конструкции	Схема	Обозначения на схеме	Применение
1.Офисно– производственные ШЭ	малые, легкосъёмные		1 – источник шума (ИШ); 2 – акустический экран (ШЭ); 3 – рабочее место; 4 – помещение	устанавливаются в производственных помещениях и офисных для снижения прямого звука
2. Транспортные	стационарные, протяжённые, тонкие		1 – автотранспортный поток (ИШ); 2 – ШЭ; 3 – отражающая поверхность; 4 – жилая застройка	устанавливаются вдоль автомобильных и железных дорог напротив жилой застройки
	стационарные, протяжённые, тонкие, бликорасположенные к источнику звука, более низкие	ШЭ 	1 – подвижной состав ж.д. транспорта (ИШ); 2 – ШЭ; 3 – отражающая поверхность; 4 – жилая застройка	устанавливаются между ж. д. путями и жилой застройкой вблизи головки рельса
3. Транспортные экранирующие сооружения	стационарные, насыпные, протяжённые, широкие	а) Выемка 	1 – транспортный поток; 2 – здание; 3 – расчётная точка (РТ); 4 – склон выемки	применяются для заглубления автомобильных и железных дорог

Продолжение таблицы 1.5

Назначение (тип) ШЭ	Особенности установки и конструкции	Схема	Обозначения на схеме	Применение
		б) Насыпь 2 	1 – транспортный поток; 2 – насыпь; 3 – Опорная поверхность; 4 – здание	применяются в качестве экранирующих сооружений вдоль автомобильных и железных дорог
4. Технологические	составные, стационарные, ограждающие	а) чиллеры, вентустановки и пр. 	1 – источник шума; 2 – ШЭ; 3 – стена; 4 – здание	устанавливаются со всех сторон стационарного источника шума
	стационарные, протяжённые тонкие, очень высокие	б) самолёты 	1 – Самолёт 2 – ШЭ; 3 – опорная поверхность; 4 – жилая застройка	устанавливаются в ШЭропортах для снижения шума самолётов, располагаемых на земле для выполнения технологических операций
5. Передвигаемые	малые, тонкие, сложной формы, съёмные	а) 	1 – источник шума; 2 – ШЭ; 3 – опорная поверхность; 4 – транспортная машина; 5 – РТ;	устанавливаются на источники шума (например, рабочие органы), входящие в состав передвигающихся машин

Продолжение таблицы 1.5

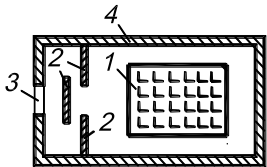
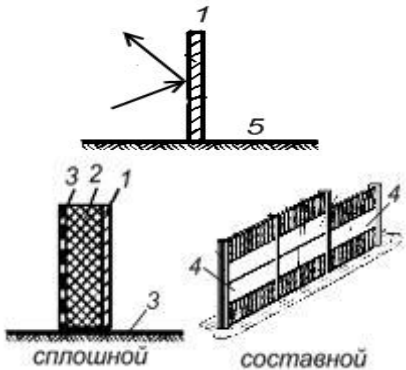
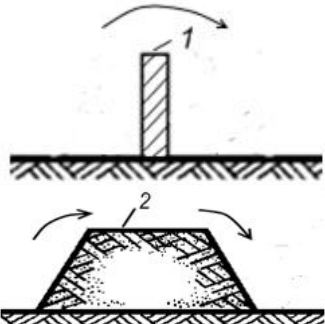
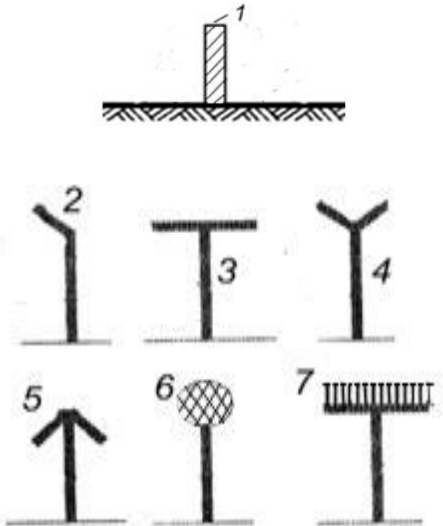
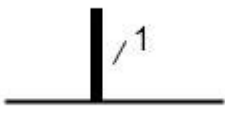
Назначение (тип) ШЭ	Назначение (тип) ШЭ	Назначение (тип) ШЭ	Назначение (тип) ШЭ	Назначение (тип) ШЭ
6. Встроенные ШЭ	малые, тонкие, съёмные		1 – встроенный источник шума; 2 – ШЭ; 3 – проем; 4 – звукоизолирующий капот	устанавливаются в качестве дополнительного средства в шумозащитных конструкциях

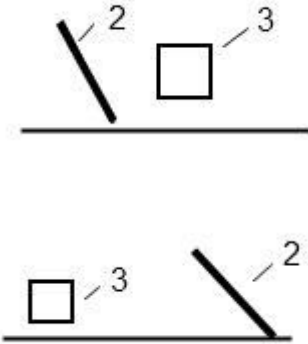
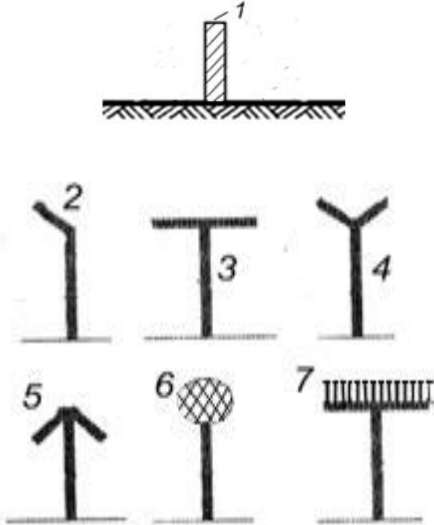
Таблица 1.6 – Классификация акустических экранов по принципу действия и конструктивных особенностях

№ п/п	Классификационный признак	Тип ШЭ	Схема	Обозначения на схеме	Применение и эффективность
1	Основной принцип действия	отражающие отражающе-поглощающие		1 – твердый отражающий, 2 – ЗПМ, 3 – перфорированный лист, 4 – стекло, 5 – опорная поверхность	большинство ШЭ, устанавливаемых на а/д и ж/д попадает под эти определения
2	Характер дифракции на свободном ребре	тонкий ШЭ широкий ШЭ		1 – тонкий ШЭ – барьер 2 – широкий экран-насыпь → – дифракция	наряду с ШЭ – барьерами, широко применяются насыпи

Продолжение таблицы 1.6

№ п/п	Классификационный признак	Тип ШЭ	Схема	Обозначения на схеме	Применение и эффективность
3	Материал акустических панелей	бетонные и из др. строительных материалов, металлические, деревянные, пластиковые и др.	—	—	широко используется бетон, асбоцемент, кирпич и др. строительные материалы; а также ШЭ, панели которых изготавливаются из металла, дерева и др.
4	Конструктивные решения и форма верхней части	без надстройки с надстройкой		1 – без надстройки, 2 – Г-образный, 3 – Т-образный, 4 – Y-образный, 5 – стреловидный, 6 – цилиндр с ЗПМ; 7 – резонаторные	широко распространены ШЭ с различными видами и формой надстройки (в основном Г-образные)
5	Расположение в пространстве	прямые		1 – прямой ШЭ,	—

Продолжение таблицы 1.6

№ п/п	№ п/п	№ п/п	№ п/п	№ п/п	№ п/п
5	Расположение в пространстве	наклонные		2 – наклонный ШЭ, 3 – ИШ.	наклонные ШЭ применяются, если они выполнены как отражающие конструкции
4	Конструктивные решения и форма верхней части	без надстройки с надстройкой		1 – без надстройки, 2 – Г-образный, 3 – Т-образный, 4 – У-образный, 5 – стреловидный, 6 – цилиндр с ЗПМ; 7 – резонаторные	широко распространены ШЭ с различными видами и формой надстройки (в основном Г-образные)

Тяжелые с весом свыше 50кг на кв.м.:

- щепобетон, керамзитобетон и др.

Легкие с весом до 50 кг на 1 кв.м.

По характеру свободного ребра ШЭ подразделяются на:

- экраны без надстройки;
- экраны с надстройкой на свободном ребре.

По вопросам применения экранов, требованиям к их использованию и прочему создана очень полезная литература: справочники, монографии и методические указания [2; 5; 6; 19; 20; 21; 22; 33–35], подробные обзоры [36–38].

Довольно обширна литература и нормативно–техническая документация, посвящённая снижению шума железнодорожного [39–56], автотранспортного [57–75], авиационного [76–78] транспорта экранами. Описано применение экранов для снижения шума строительства [18; 79], стационарных установок [80–84], а также экранов как вспомогательных устройств [30; 85].

Выполненный анализ литературы позволил получить ряд характеристик применяемых шумозащитных экранов: акустическая эффективность, акустическая долговечность, ремонтпригодность и другие, изучению которых для автомобильных и железных дорог и других источников шума в РФ посвящена основная часть настоящей диссертационной работы.

1.4 Акустическая эффективность шумозащитных экранов на железных и автомобильных дорогах

Акустической эффективностью экрана, согласно НТД [86; 87], называется разница $УЗ$ и (или) $УЗД$ в расчётной точке или точке наблюдения, расположенной вблизи защищаемого от шума объекта, при наличии экрана и без него.

Сведения об акустической эффективности шумозащитных экранов содержатся едва ли не в каждой из многих тысяч публикаций, посвящённых проектированию, расчётам, испытаниям и пр. шумозащитных экранов. Тем не

менее, проанализируем наиболее характерные данные, с целью понять, какими акустическими характеристиками обладают современные экраны, установленные как в нашей стране, так и за рубежом.

Вначале остановимся на самых общих численных характеристиках. В обзоре [36], в котором обобщены практические данные для экранов, установленных вдоль автомобильных и железных дорог, указывается, что шумозащитные барьеры снижают шум на 5–12 дБА. Эффективность экранов, в первую очередь, зависит от места установки экрана: на каком расстоянии экран расположен от ИШ и как далеко расположены защищаемые объекты от экрана. Эффективность экрана зависит от его конструктивных (длина, высота, материал и другие) и акустических свойств (звукоизоляция и звукопоглощение). Эти вопросы в настоящем обзоре будут проанализированы отдельно, и поэтому остановимся на анализе эффективности экранов в связи с важнейшим фактором – высотой экрана применительно к различным источникам шума.

Снижение шума автотранспорта. В работе [11] сделано обобщение снижения автодорожного и другого шума экранами. Шум автотранспорта имеет низкочастотный характер, для составляющих звука на низких частотах (63 и 125 Гц) размеры (высота) могут быть сравнимы с длиной звуковой волны (5,4 и 2,7 м) где экраны не всегда эффективны. Отметим, что требования санитарных норм на этих частотах существенно (на 17-27 дБ ниже, чем для высоких частот, например, 1000Гц). Наибольшее число экранов в мире установлено вдоль автодорог. Высота экрана на автодорогах находится в пределах 3–6 м [88], но встречаются экраны, высота которых достигает 10–12 м. Эффективность экранов составляет 5–12 дБА [88]. Усреднённые значения эффективности экранов в разных странах имеют отличия. В таблице 1.7 [11] приведены обобщённые результаты исследования экранов в Италии [89], и в среднем снижение шума экранами составило до 12–14 дБА.

Таблица 1.7 – Обобщённые результаты исследования акустических экранов в Италии

Время суток	Измеренные значения УЗ, дБА	
	До установки ШЭ	После установки ШЭ
Ночь	65	50,8
День	71,9	60,4

Измеренные значения эффективности экранов в Нидерландах от 5 до 11 дБА. Испытания эффективности экранов, установленных на МКАД, по данным автора [90] показали от 3 до 10 дБА, на КАД вокруг СПб от 6 до 13 дБА [79]. На рисунке 1.12 [11] приведены спектры шума до и после установки экрана на автодороге [11].

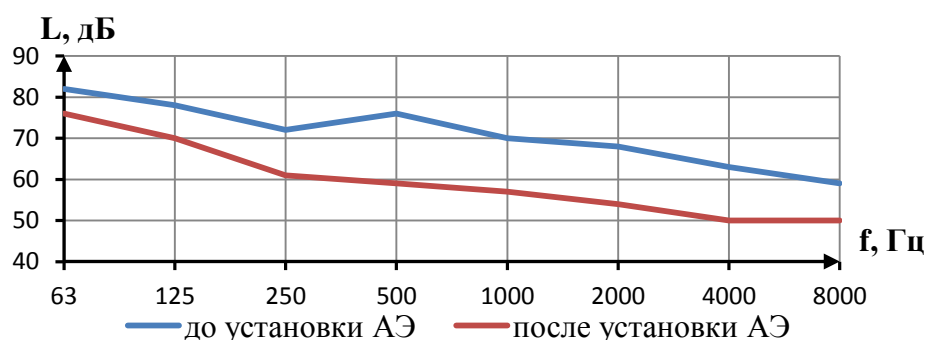


Рисунок 1.12 – Спектры шума до и после установки экрана на автодороге

Снижение УЗД в низкочастотном диапазоне составило до 4–11 дБ, а в высокочастотном всего до 5–15 дБ, что говорит о невысоком качестве монтажа. Понятие акустической эффективности экрана в натурных условиях достаточно условно. Один и тот же экран показывает разную эффективность для разных точек измерений. Это хорошо проиллюстрировано данными измерений на автодороге Венеция–Триест, где точки измерения расположены в различных местах (таблица 1.8 [11]). Эффективность экранов составила от 3 до 16 дБА. Целесообразно измерять эффективность экрана на заданном расстоянии [86].

Таблица 1.8 – Измерения на автодороге Венеция–Триест
в различных контрольных точках*

Номер контрольной точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
УЗ до установки ШЭ, дБА	75,3	67,1	76,4	78,5	74,3	77,3	64,7	59,4	59,1	60,4	61,9	63,1	68,1	60,4	53,9	62,2
УЗ после установки ШЭ, дБА	59,3	55,3	63,3	57,7	60,7	59,3	59,0	55,9	54,9	54,6	47,6	51,7	52,2	51,5	50,8	51,0
Примечание – * УЗ даны на разных расстояниях для понимания вопроса об изменениях эффективности экрана на разных расстояниях до РТ																

Эффективность экранов зависит не только от расположения точки наблюдения, но также от расположения ИШ. Наименее эффективны экраны на автодорогах со многими полосами движения (8–10) и защищающие здания с числом этажей более 3–4 [19].

Снижение шума железнодорожного транспорта. Спектр шума железнодорожного транспорта заметно отличается от спектра шум автодорог. Для шума качения характерно превалирующее излучение на высоких частотах, что позволяет предполагать, что при прочих равных условий экраны на железных дорогах более эффективны, чем на автодорогах. Высота шумозащитных экранов на железных дорогах 2–5 м, хотя, например, в Италии устанавливаются экраны высотой 6–8 м [11]. Акустическая эффективность, например, на железных дорогах РФ, составляет от 4–8 до 11–12 дБА [91; 92] и зависит от расстояния до защищаемого объекта, и по какому пути проходит поезд (таблица 1.9).

Таблица 1.9 – Акустическая эффективность в зависимости от расстояния до защищаемого объекта

Тип ШЭ	Расстояние, м	Номер пути	Эффективность, дБА
Бетонный	25	I	14
	25	II	10
	50	I	11
	50	II	8

Продолжение таблицы 1.9

Тип ШЭ	Расстояние, м	Номер пути	Эффективность, дБА
Металлический	25	I	12
	25	II	8
	50	I	8
	50	II	6

Экраны на железной дороге изготавливаются как отражающие (например, из закаленного стекла, бетона), так и отражающе-поглощающие (оцинкованное железо, алюминий с ЗПМ). Последние заметно (до 4–5 дБА) эффективнее отражающих экранов (таблица 1.10) [11]. В таблице 1.11 [11] приведена спектральная характеристика УЗД до и после установки экрана вдоль железной дороги.

Таблица 1.10 – Эффективность отражающих и отражающе-поглощающих экранов

Тип ШЭ	Высота ШЭ, м	Эффективность ШЭ, дБА, на различных расстояниях, м, при прохождении поезда					
		по ближнему пути			по дальнему пути		
		20	40	80	20	40	80
Отражающий	1,5	9,9	9,4	8,7	6,4	5,9	5,3
Отражающе-поглощающий	1,5	14,3	13,8	13,1	9,6	9,2	8,5
	2,0	16,3	15,7	14,9	11,9	11,2	10,4

Таблица 1.11 – Спектральные характеристики УЗД и УЗ до и после установки экрана

вдоль железной дороги

Наличие ШЭ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
До установки ШЭ	70	63	55	53	62	61	56	47	32	67
После установки ШЭ	68	63	54	50	49	48	42	40	30	53
Допустимые уровни шума в дневное время	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55

Отметим, что в диапазоне частот 31,5–250 Гц снижение УЗД всего 0–3 дБ, что подтверждает отмеченную выше закономерность связи длины звуковой волны и высоты экрана. Эффективность такого экрана составила 14 дБА [33], что подтверждает вывод о несколько большей эффективности экрана на железной дороге, чем на автодороге.

Очень интересен опыт Японии по установке экранов вдоль железной дороги. На линии «Токио – Осака» были установлены экраны небольшой высоты до 2–3 м, но они позволили добиться снижения УЗ для малоэтажной застройки на 10 дБА [11]. На многих железных дорогах (например, Англии, Финляндии, Швеции и других) испытывались экраны высотой до 0,8 м (максимально 1 м) приближённые к головке рельса. Эффективность таких экранов составила от 3 до 6 дБА [11], что делает их перспективным средством шумозащиты на железной дороге.

Проведённый анализ показал: в самом общем виде эффективность шумозащитных экранов в натурных условиях: автодорожные экраны снижают шум на 5–12 дБА, железнодорожные на 6–14 дБА. для более полного понимания этого вопроса необходимо подробно проанализировать влияние на акустическую эффективность различных факторов и, в первую очередь, высоты.

1.5 Связь акустической эффективности экранов с техническими решениями

1.5.1 Перечень факторов, влияющих на эффективность шумозащитных экранов

Основными факторами, влияющими на акустическую эффективность шумозащитных (акустических) экранов являются [6; 11; 13; 40]:

- конструктивные (длина, высота, форма экрана);
- акустические (звукоизоляция и звукопоглощение экрана);
- расположение экрана в пространстве (расстояние от источника шума до экрана и расстояние от экрана до расчётной точки, высота расположения расчётной точки) и угол дифракции экрана;

- материал, из которого изготовлены акустические панели экрана;
- наличие и вид настройки на свободном ребре экрана;
- спектр и тип источника шума;
- акустические свойства (звукопоглощение) опорной поверхности.

1.5.2 Конструктивные факторы

Влияние высоты, длины и формы экрана на его эффективность рассмотрены в следующей литературе [6, 11, 13].

Высота. Высота шумозащитного экрана – важнейший конструктивный параметр, определяющий его акустическую эффективность. В литературе приводятся крайне противоречивые сведения о связи эффективности с высотой: увеличение на 1 м увеличивает эффективность экрана на величину от 0,5 до 5 дБА по разным литературным источникам. В работах Н. В. Тюриной, Иванова Н. И. и Н. Г. Семёнова [11; 13] установлена причина этих противоречий и получена теоретическая и экспериментальная зависимости. Взаимосвязь между высотой экрана и эффективностью имеет вид кривой (рисунок 1.13). Это очень важная зависимость, которую, на наш взгляд, необходимо еще раз подтвердить и внести в новую нормативно техническую документацию.

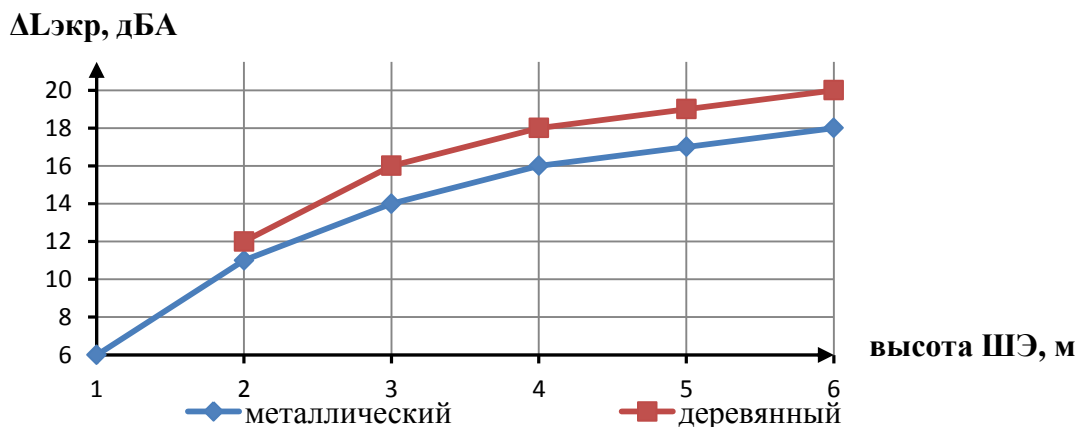
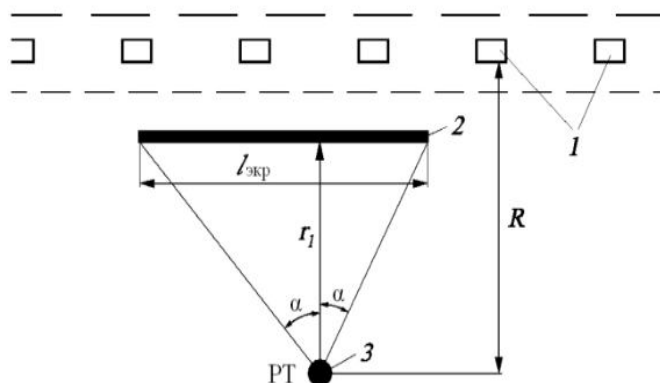


Рисунок 1.13 – Связь акустической эффективности отражающе-поглощающих ШЭ с изменением его высоты (измерения на расстоянии 25 м)

Длина. Длина экрана – не менее важный конструктивный фактор, так как даже при достижении требуемой высоты при неправильно выбранной длине экрана дифракция через свободные боковые рёбра превысит дифракцию через верхнее ребро, и экран окажется неэффективным. По поводу выбора длины в нормативной литературе [6] существуют ясные указания, которые сводятся к следующим правилам (рисунок 1.14):

- длина ШЭ должна в 20 раз превышать расстояние между ИШ и защищаемым объектом ($l_{\text{эк}} \geq 20R$);
- длина ШЭ должна быть в 8 раз больше расстояния от защищаемого объекта до ШЭ ($l_{\text{эк}} \geq 8r_1$);
- угол между перпендикуляром от защищаемого объекта на ось ШЭ и краем ШЭ не должна быть меньше 80° ($\alpha \geq 80^\circ$).



1– ИШ (движущийся транспортный поток); 2 – ШЭ; 3 – защищаемый от шума объект

Рисунок 1.14 – Расположение ШЭ относительно ИШ (автотранспорт) и защищаемого объекта

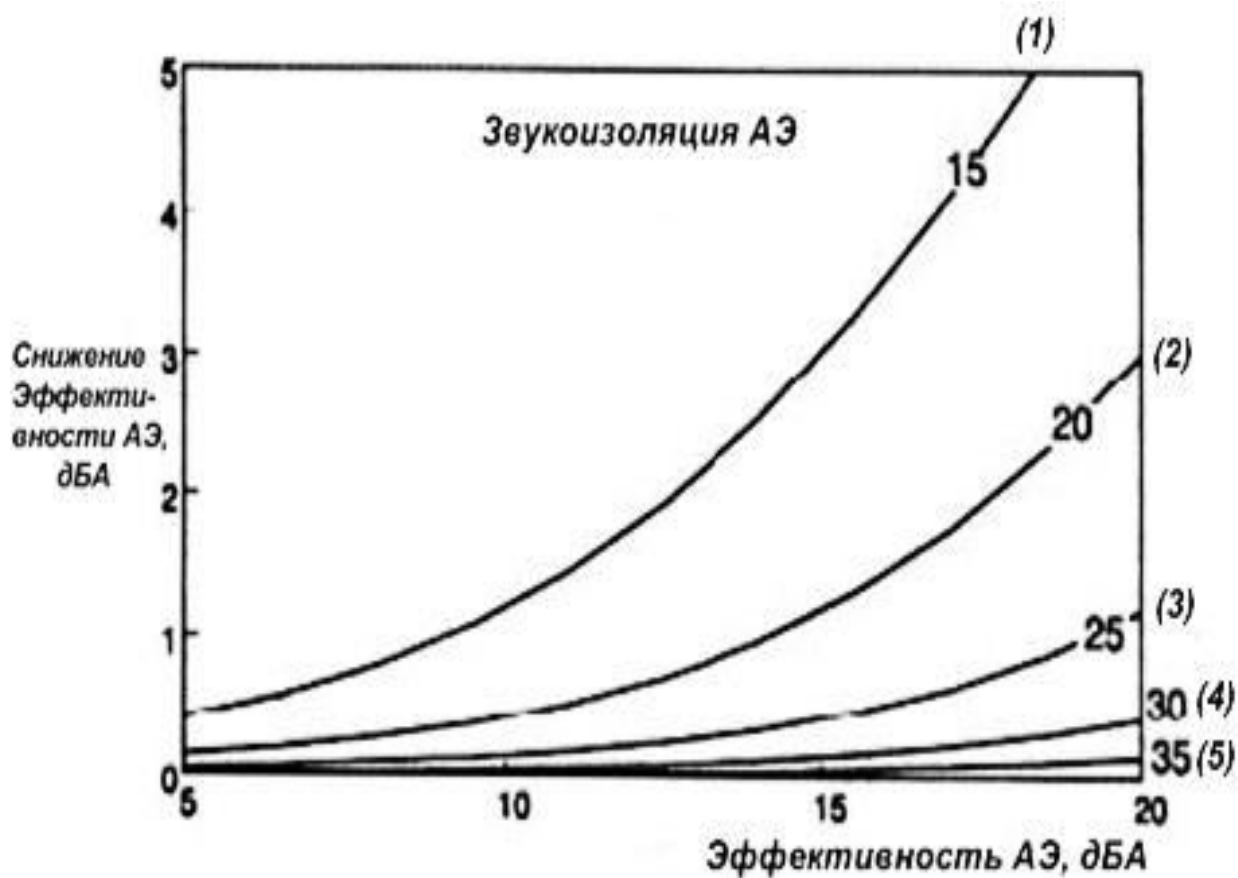
Этот вопрос, вероятно, специального изучения не требует, но очень важно проверить в реальных условиях на автодорогах Российской Федерации, достаточно ли выбранное значение высоты и длины установленных экранов, чтобы обеспечить их требуемую эффективность.

Форма экранов (в плане) существенно влияет на эффективность экрана [96; 107]. Эта особенность отмечается для технологических экранов, которые могут

иметь форму: Г-образные, П-образные и □-образные, то есть замкнутые (в плане). Этот вопрос, как нам представляется, требует дополнительного изучения.

1.5.3 Акустические характеристики экрана

Общие положения. К акустическим характеристикам экрана относят их звукоизоляцию и звукопоглощение. Эти характеристики в немалой степени сказываются на эффективности экранов. Степень влияния звукоизоляции на эффективность экрана можно увидеть на рисунке 1.15, опубликованном в [6]. При звукоизоляции, сравнимой с эффективностью, последняя может снижаться на 3 и более дБА. Влияние звукопоглощения может ещё в большей мере сказываться на его эффективности[6].



(1)–(5) звукоизоляция ШЭ

Рисунок 1.15 – Снижение эффективности ШЭ при уменьшении его звукоизоляции

Звукоизоляции экрана. Этой проблеме посвящены работы [6; 108–111]. Авторами отмечается, что звукоизоляция экранов, измеренная в натурных условиях, заметно ниже звукоизоляции акустических панелей этих экранов, измеренной в акустических камерах. В нормативной литературе прописаны требования к звукоизоляции (таблица 1.12), определяемой поверхностной плотностью панелей кг/м^2 [6].

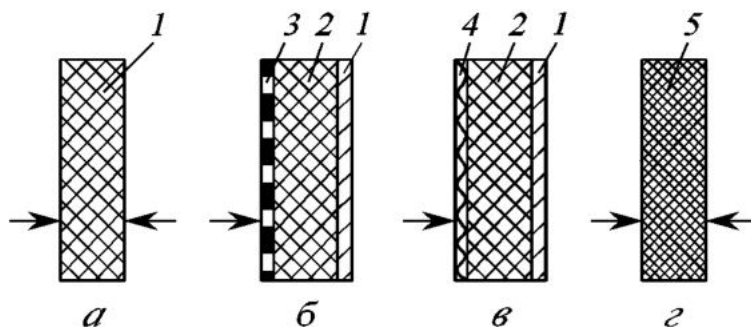
Таблица 1.12 – Соотношение между акустической эффективностью ШЭ и требуемой звукоизоляцией, связанной с поверхностной плотностью

Показатель	Значение показателя					
Требуемая акустическая эффективность ШЭ, дБА	5	10	14	16	18	20
Минимально допустимая поверхностная плотность панели ШЭ, кг/м^2	14,5	16	17	19,5	22	24,5

Отметим, измерение звукоизоляции экранов производится в основном на опытных образцах. Вследствие важности этого параметра для установления причины недостаточной звукоизоляции экрана необходимо выполнить массовые исследования экранов с целью определить их звукоизолирующие свойства.

Звукопоглощение экранов. Изучению влияния звукопоглощения на эффективность экранов посвящена литература [6; 11; 111–124], в том числе с применением резонаторов Гельмгольца [125–126]. В основном звукопоглощение в экранах обеспечивается применением в акустической панели ЗПМ, защищённого или перфорированным листом или звукопрозрачной сеткой (рисунок 1.16).

В проанализированной литературе приводятся противоречивые данные по эффективности звукопоглощения, от 2 до 5–6 дБА. Отмечается очень важная, на наш взгляд, мысль, что звукопоглощение экрана в меньшей степени влияет на дифрагированный через свободное ребро экрана звук, а в большей мере снижается переотражение звука от экрана к ИШ и обратно. Здесь содержится интересная мысль о существовании сложного звукового поля между источником шума и экраном.



1 – твердый звукоизолирующий слой; 2 – мягкий звукопоглощающий материал (ЗПМ);
 3 – перфорированный лист; 4 – звукопроницаемая сетка; 5 – материал щепобетон;
 → – направление движения звука к ШЭ

Рисунок 1.16 – Схемы панелей отражающего (а) и отражающе-поглощающего (б, в, г) ШЭ

В НТД [231] существуют требования к звукопоглощению шумозащитных экранов, определяемые значением коэффициента звукопоглощения (таблица 1.13).

Таблица 1.13 – Требуемые значения коэффициентов звукопоглощения панелей

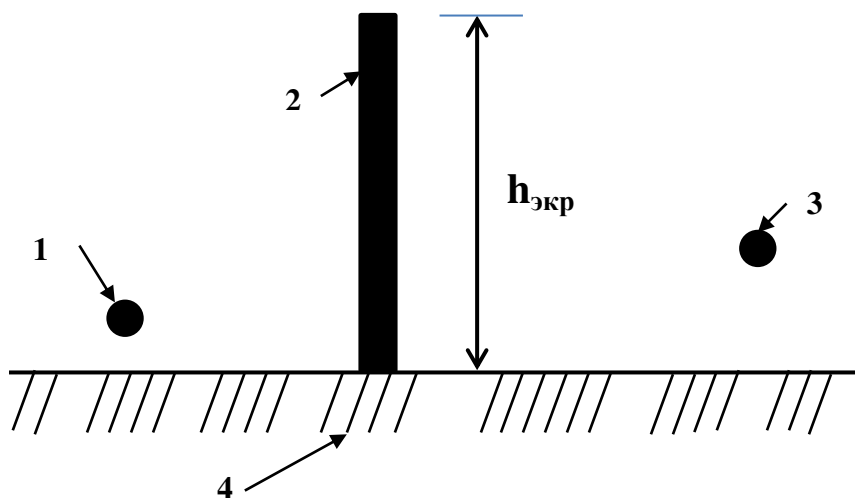
Показатель	Значение показателя						
Среднегеометрические значения частот, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Коэффициенты звукопоглощения	0,3	0,5	0,8	0,9	0,9	0,8	0,7

Принимаемые значения коэффициентов звукопоглощения берутся из данных, получено в акустических камерах. Представляет практический интерес определить значение этого показателя в натурных условиях.

В заключение отметим, что в некоторых конструкциях звукопоглощение создается не за счёт ЗПМ, а применением резонаторов Гельмгольца, представляющих полости в акустических панелях с отверстиями. Такие конструкции обеспечивают за счёт резонансного поглощения на низких частотах дополнительное снижение УЗД до 5–6 дБ. На наш взгляд, для массового применения эти конструкции неудобны.

1.5.4 Акустические свойства опорной поверхности

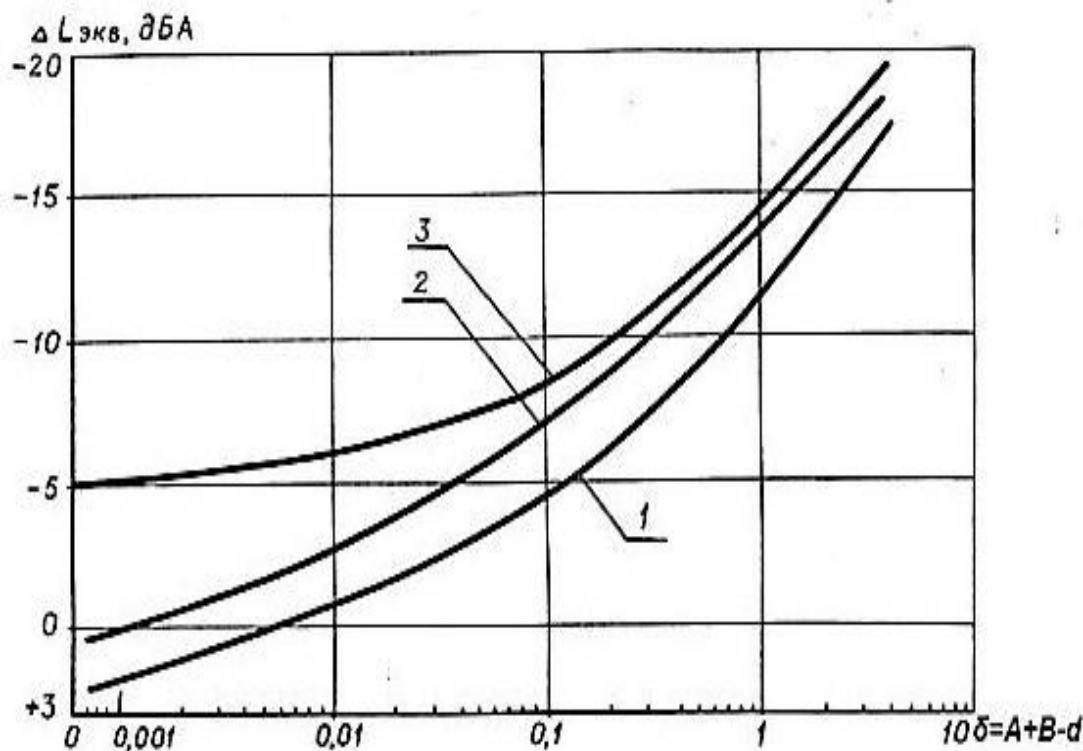
Опорной поверхностью называется поверхность, главным образом, между источником и экраном, а в отдельных случаях, и за экраном (рисунок 1.17). Звукоотражающие или звукопоглощающие свойства опорной поверхности могут оказывать влияние на эффективность шумозащитного экрана [6; 11; 127–138]. В самом общем случае, если рассматривать процесс отражения (поглощения) с использованием метода мнимых источников, звуковое поле вблизи экрана может изменяться от плюс 3 дБ (идеальное отражение) до минус 3 дБ, звукопоглощение с коэффициентом звукопоглощения опорной поверхности до 0,5). На рисунке 1.18 приведён график с жёсткой и мягкой поверхностями вблизи экрана, а рисунок 1.17 схематично отражает суть опорной поверхности.



1 – источник шума, 2 – экран, 3 – РТ, 4 – опорная поверхность

Рисунок 1.17 – Расположение опорной поверхности

Из анализа следует, что звукопоглощающие или отражающие свойства опорной поверхности в определенной мере влияют на акустическую эффективность ШЭ, и поэтому должны учитываться при расчетах.



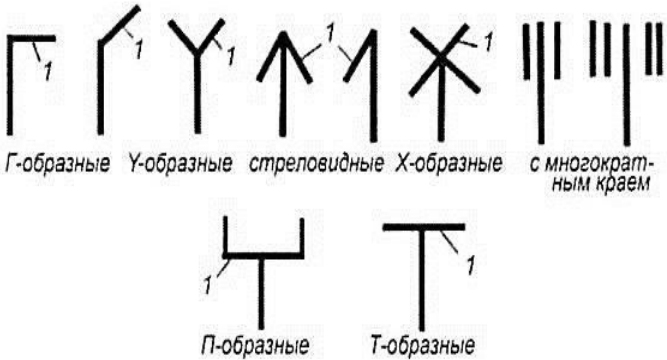
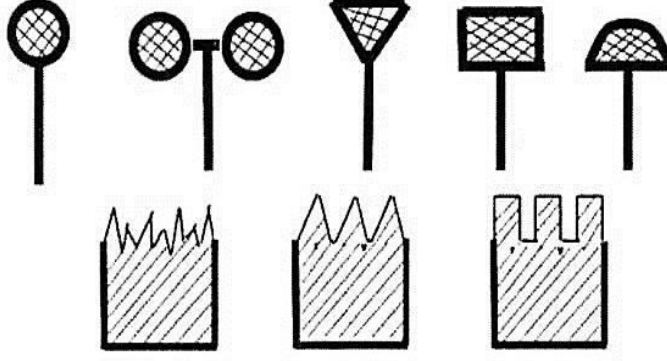
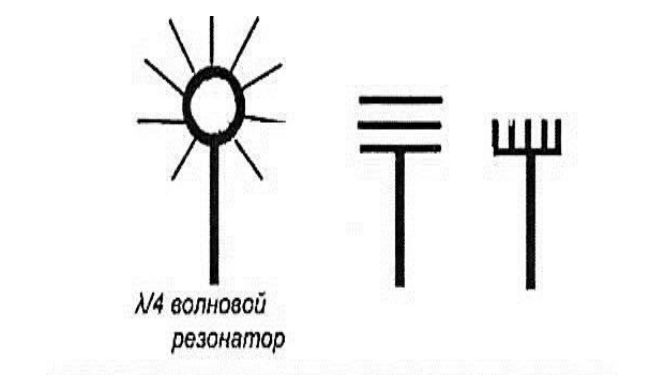
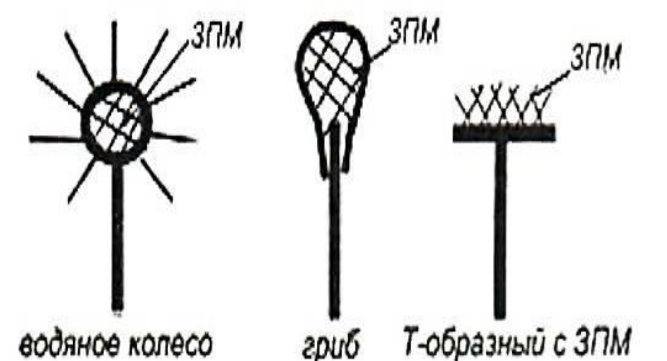
1 – жёсткая поверхность земли по обе стороны от барьера; 2 – мягкая поверхность земли;
3 – без учёта свойств поверхности по методике НИИСФ

Рисунок 1.18 – Снижение эквивалентного уровня звука от потока автомобилей интенсивностью 1000 авт / ч отражающим барьером в зависимости от величины δ

1.5.5 Влияние надстройки на свободном ребре

Свободное ребро – «слабое» место шумозащитного экрана, поэтому логичны попытки затруднить, снизить дифракцию звука на свободном ребре. Решению этого вопроса посвящена обширная литература [139–180]. Надстройки на ребре разнообразны как по конструктивному исполнению, так и по принципу действия. Авторами работы [11] предложена классификация надстроек (таблица 1.14).

Таблица 1.14 – Классификация надстроек

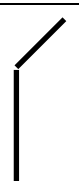
Основные принципы действия	Конструктивные схемы	Примечание
Увеличение угла дифракции	 Г-образные У-образные стреловидные Х-образные с многократным краем П-образные Т-образные	за счет различного расположения полок 1 в разном сочетании
Увеличение импеданса свободного ребра Звукопоглощением изменением профиля свободного	 а) неправильный (случайный) б) правильный	расположение устройств с ЗПМ на свободном ребре или с использованием сложного профиля (случайного или правильного) на свободном ребре
Использование интерференции в резонаторах	 λ/4 волновой резонатор	резонаторы Гельмгольца и др.
Комбинированный	 ЗПМ водяное колесо ЗПМ гриб ЗПМ Т-образный с ЗПМ	используются устройства, которые обеспечивают: звукопоглощение, увеличение угла дифракции, резонансное поглощение

Все надстройки могут быть сведены к четырем типам по принципу действия:

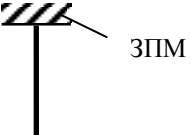
- увеличивающие угол дифракции (Г-, Х-, V-, Т-образные и др.) путем применения полок различного сочетания и расположения в пространстве;
- увеличивающие импеданс свободного ребра (ухудшающие прохождение дифрагированного звука) путем применения звукопоглощающих устройств и изменением профиля свободного ребра;
- использующие интерференцию звука в резонансных устройствах различных типов;
- комбинированные устройства, в которых сочетается два и более из приведенных выше принципов (увеличение угла дифракции, звукопоглощение на ребре, резонансное устройство) [11].

Примеры дополнительной эффективности за счёт различных надстроек на свободном ребре приведены в таблице 1.15 [181–182].

Таблица 1.15 – Эффективность экрана за счёт различных надстроек на свободном ребре

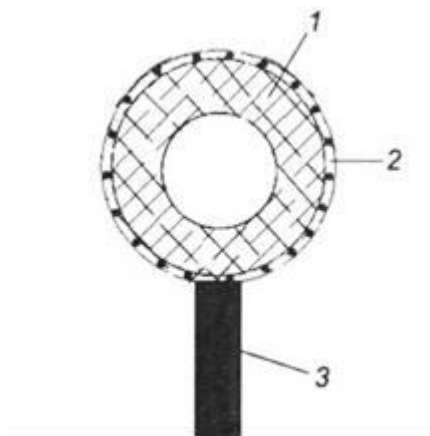
Название	Условная схема	Дополнительная эффективность, дБА
Г-образный		1,5–2
		2,0–2,5
Стреловидный		0–0,5

Продолжение таблицы 1.15

Название	Условная схема	Дополнительная эффективность, дБА
Т-образный		3–4
		4,5–5,5
У-образный		4–5
Х-образный		4,5–5,5
П-образный		3,5–4,5
Ломанный		1–2

Как видно, эффективность рассмотренных надстроек лежит в диапазоне от 0–0,5 до 4,5–5,5 дБА. Представляется необходимым исследовать эффективность надстроек, остановившись только на самых простых и распространённых: Г-образной, Т-образной и с антидифрактором (рисунок 1.19).

Последняя конструкция, на наш взгляд, представляет особый интерес, так как некоторые учёные утверждают, что это простое приспособление обеспечивает дополнительную эффективность экрана до 3 дБА [180].



1 – 3ПМ; 2 – перфорация; 3 – ШЭ

Рисунок 1.19 – Схема антидифрактора

1.5.6 Расположение экрана и РТ в пространстве

Эффективность экрана связана с углом дифракции: чем меньше угол дифракции тем меньше акустическая эффективность экрана. В связи с этим расстояние от ИШ до экрана и от экрана до РТ, а также высота РТ сказываются на эффективности экрана [6; 11; 41]. В литературе описаны закономерности: каждое увеличение угла дифракции на 10° увеличивает эффективность экрана на 0,5 дБА [6]. Тем не менее, до сих пор считается неясным, на какую величину снижается эффективность экрана при удвоении расстояния от экрана до точки наблюдения, насколько снижается при увеличении её высоты. Уточнение этих зависимостей необходимо для внесения поправок в данные этих эффективностей ШЭ.

1.5.7 Влияние материала, из которого изготовлены акустические панели экрана

Изучению этого вопросы посвящена литература [183–191]. Панели экрана могут изготавливаться из самых различных материалов: бетона, щепобетона, оцинкованной стали, пластмассы, закалённого стекла, импрегнированной древесины, алюминия, нержавеющей стали и других. Материал или конструкция

панели (с ЗПМ или без) определяют акустические свойства (звукоизоляцию и звукопоглощение), а также акустическую долговечность экрана. Нам представляется, что необходимо рассматривать новейшие технологии, обеспечивающие акустическую долговечность и высокие акустические свойства экранов. Акустическая долговечность экранов водится нами в отечественную практику впервые, хотя широко используются за рубежом [192]. Подробному обоснованию этого термина и его содержанию посвящена следующая часть настоящего обзора. Акустическая долговечность – способность шумозащитного экрана сохранять установленные шумозащитные свойства на заданный гарантийный срок службы (например, 15 лет).

1.6 Акустическая долговечность шумозащитных экранов и ее связь с технологиями

Ключевым требованием для шумозащитных экранов является поддержание соответствующего уровня акустической долговечности экранов на протяжении срока службы для обеспечения сохранения уровней шума на приемлемом уровне. Поэтому важно, чтобы конструкции экранов были способны, насколько это возможно, противостоять воздействию факторов, которые могут оказать негативное влияние на их акустические характеристики. Потеря эксплуатационных качеств может также проявиться в виде повреждения вследствие механического воздействия, вандализма и т. д.

Чтобы обеспечить акустическую эффективность материалов на весь заявляемый производителем срок эксплуатации необходимо, чтобы применяемые материалы были долговечны в отношении условий, которые могут возникать в окружающей среде, например, повышенная влажность; соль, используемая в зимний период для обслуживания дороги; низкие температуры; дождь; ультрафиолетовый свет и т.д. Конструкции ШЭ должны быть защищенными и

оставаться неповреждёнными, т.е. не разрушаться под собственным весом или из-за дополнительного веса, влаги или пыли, полученных за время эксплуатации.

Использование качественного сырья, хорошее качество дизайна и производства, включая принятие соответствующих защитных мер в рамках этого процесса, выбор соответствующего типа экрана для нужного расположения и установки/обслуживания, являются ключевыми факторами в обеспечении долгой и надёжной службы. Несоблюдение этих принципов может привести к возможному ускорению физической деградации экрана. Деградация чаще всего проявляется в изменениях в структурной целостности экрана и его физическом состоянии/эстетике.

В Европейских странах предъявляются жёсткие требования к шумозащитным экранам. Так, все материалы экрана должны оставаться работоспособными в течение 40 лет и не требовать технического обслуживания в течение 20 лет.

Деградация звукопоглощающих материалов может привести к некоторому увеличению количества отраженного звука, величина которого зависит от степени деградации материалов следующим образом:

- в тех случаях, когда ШЭ установлен только на одной стороне дороги, может повыситься уровень шума на противоположной от ШЭ стороне дороги;
- в тех случаях, когда ШЭ установлены, например, по обе стороны от автомобильной дороги, могут увеличиться уровни шума за одним или обоими ШЭ за счет снижения поглощения звука, отраженного между двумя экранами.

В обоих случаях уровни шума за экранами могут увеличиться из-за увеличенных эффектов отражения между экраном и высокими бортами автомобилей.

В случае использования систем вставного типа, например, металлических экранов, где звукопоглощающие материалы устанавливаются за перфорированной стороной вставки, признаки расслаивания не сразу заметны. В таких случаях,

необходимо обеспечить дренажный путь для звукопоглощающего материала; это может быть достигнуто за счёт размещения материалов на расстоянии от стенок кассеты (рисунок 1.20).

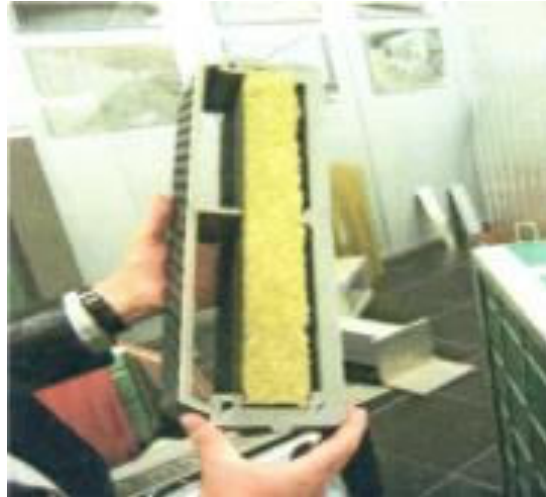


Рисунок 1.20 – Секция сложного алюминиевого экрана с проницаемым передним фасадом, внутренним пространством, минерально-шерстяным материалом и непроницаемым фасадом со стороны жилой застройки [193]

Для сравнения, алюминий менее подвержен коррозии, и исследования, проведенные в Европе, показывают, что спустя 20 лет, уровень звукопоглощения акустических элементов меняется всего на 1 дБ, что связывают с пылью и детритом, собирающимися в волокнах звукопоглощающего материала. Исследование алюминиевых экранов с ЗПМ проводились с использованием полевого метода испытания по стандарту ЕМ 1793–6 [57]. Были испытаны два экрана одинаковой конструкции, один из которых был построен в 1994 г., а другой в 2005 г. Результаты показали, что характеристики поглощения звука нового экрана были на 0,3–0,8 дБ больше, чем у старого экрана.

В дополнение к воздействию условий окружающей среды и любому естественному ухудшению свойств, связанному с типом используемых материалов, существует ряд других проблем, которые могут повлиять на акустическую долговечность и срок службы экрана.

Установка экрана. Некачественная установка, связанная с несоблюдением инструкции по установке от производителя, сразу повышает риск ухудшения характеристик. Плохое качество установки часто проявляется в виде чётко видимых дефектов, таких как неровные или невертикальные опоры, некачественный монтаж изоляции между акустическими элементами или между акустическими элементами и опорами, а также зазоры между панелями или между нижним элементом экрана и землёй. Привлечение опытных монтажников, которые знакомы с изделиями, в сочетании с визуальными проверками только что установленного экрана, либо по завершении, либо вовремя установки, являются наиболее важными факторами в обеспечении правильной установки шумозащитного экрана.

Пропускные проходы. Дополнительный фактор, влияющий на характеристики шумозащитного экрана – это включение пропускных проходов в шумозащитные экраны, которые необходимы для того, чтобы обеспечить аварийную эвакуацию/доступ к проезжей части или обеспечить обслуживающему персоналу доступ к другим дорожным или не дорожным объектам.

Важно, чтобы проходы обладали такими же акустическими качествами, как и экран, и были построены таким образом, чтобы устранить или, по крайней мере, минимизировать прохождение звука через зазоры вокруг рамы прохода. Было замечено, что во многих случаях пропускные проходы спроектированы ненадлежащим образом или устанавливаются в качестве запоздалого решения и поэтому плохого качества и плохо оснащены; таким образом, это может сказаться не только на целостности прохода и самого экрана.

Альтернативное решение состоит в создании звукопоглощающего перекрытия в экране в точке доступа, так, что проход не потребуются там, где внутренние грани перехода будут звукопоглощающими.

Можно выделить две основные группы параметров, обеспечивающих акустическую долговечность ШЭ:

- внешние характеристики ШЭ (связанные с его установкой);
- внутренние характеристики ШЭ (характеристики отдельных материалов или компонентов).

Выбор материалов для экрана зависит от целого ряда факторов, в том числе физических размеров экрана, расположения экрана и местных условий окружающей среды, эстетических требований к качеству, включая местные архитектурные взгляды, восприятие и принятие конструкции широкой общественностью.

При выборе материала и конструкции шумозащитных экранов следует учитывать, что металлические и прозрачные экраны под определённым углом падения могут создавать эффекты бликов, а чтобы избежать воздействия атмосферных условий, воздействия ультрафиолета и последующей потери прозрачности, должна быть подобрана надлежащая обработка поверхности поликарбоната. Непрозрачные материалы, такие как сталь, алюминий требуют производить обработку поверхностей для уменьшения коррозии.

В отчетах по программе исследования транснациональных дорог [57] в 2014 г. были приведены сведения о применимости материалов для шумозащитных экранов в 19 Администрациях национальных европейских дорог (далее – НДА), в которые входят Администрации Бельгии, Эстонии, Ирландии, Дании, Англии, Уэльса, Италии, Германии, Нидерландов, Литвы, Норвегии, Финляндии, Франции, Швейцарии и других европейских стран. Результаты проведенного исследования представлены на рисунках 1.21 и 1.22.

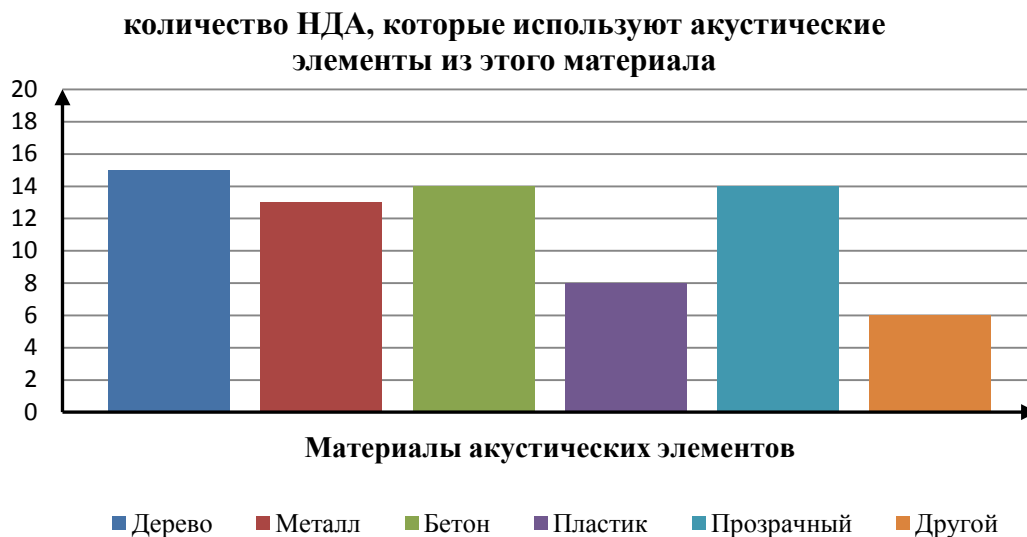


Рисунок 1.21 – Типы акустических элементов, используемых НДА [192]

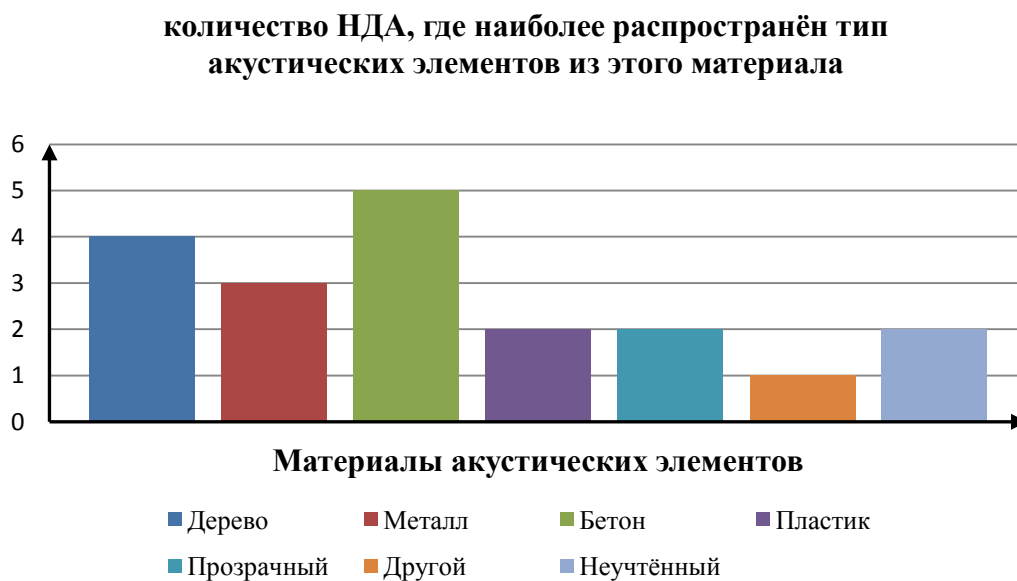


Рисунок 1.22 – Наиболее распространенный тип акустических элементов, используемых НДА [192]

Процентное соотношение использования материалов для строительства шумозащитных экранов в США приведено в таблице 1.16. На конец XX столетия на автомобильных дорогах было построено более 2 тыс. км ШЭ из бетона, кирпича, дерева, грунта, металла вдоль автодорог [6, 194, 195].

Таблица 1.16 – Процентное соотношение использования материалов
для ШЭ в США

Материал	% применения ШЭ из материалов
Бетон	47
Кирпич	25
Дерево	10
Комбинация материалов	12
Металл, грунт	6

Таким образом, в США было отдано предпочтение отражающим ШЭ, и при этом практически отказались от использования металлических ШЭ. В Японии, Южной Корее, в основном, устанавливаются отражающе-поглощающие ШЭ, изготовленные из стали и алюминия. В странах Скандинавии, особенно в Финляндии, находят большое применение деревянные ШЭ. Они могут хорошо вписаться в сельский пейзаж, а в некоторых случаях они могут также оказаться самостоятельной дизайнерской конструкцией в пригородных или городских районах. В Италии применяются отражающе-поглощающие металлические ШЭ, панели которых изготовлены из алюминия и дерева; для высокоскоростных железных дорог применяются ШЭ из бетона.

В России в основном применяются экраны с металлическими панелями из оцинкованной стали. Нередко панели изготавливаются из тонкого металла (оцинкованная сталь от 0,5 мм), вследствие чего они приходят в негодность после 5–7 лет эксплуатации. Для сравнения, на мировом рынке металлические экраны применяются в большей степени из алюминия и нержавеющей стали, а не оцинкованной стали, так как срок их службы значительные выше (более 15 лет).

Процентное соотношение использования материалов в ШЭ в России представлено в таблице 1.17.

Таблица 1.17 – Процентное соотношение использования материала в России

Материал	% применения ШЭ из материалов
Оцинкованная сталь	85
Алюминий и нержавеющая сталь	10
Бетон, щепобетон	3
Дерево	1
Другие материалы	1

В настоящее время в России разработана нормативно–техническая документация, регламентирующая требования к конструкциям и расположению шумозащитных экранов. Основными документами являются:

- ГОСТ 33329–2015 «Экраны акустические для железнодорожного транспорта. Технические требования» [231];
- Специальные технические условия. Шумозащитные мероприятия для участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству – Санкт-Петербург: ФГБОУ ПГУПС, утверждены Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации в 2016 г. [197];
- ГОСТ 32957–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Экраны акустические. Технические требования» [198];
- ГОСТ 52766–2007 «Дороги автомобильные общего пользования. Элементы обустройства. Общие требования» (п.4.4.2) [199];
- ВСН 25–86 «Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» (п. 16.2) [200];
- СТО Автодор 2.9–2014 «Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации акустических экранов на автомобильных дорогах Государственной компании «Автодор» [201];

- ОДМ 218.2.013–2011 «Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам» [7].

Изучая и анализируя эти нормативные документы видно, как эволюционируют подходы к проектированию подобных сооружений, ставятся всё новые задачи для решения выявленных во время эксплуатации проблем. Однако, несмотря на такое обилие нормативно-технической документации, добиться соответствия между теоретической и практической эффективностью шумозащитных экранов крайне сложно. Необходима корректировка нормативно-технической документации с учётом встречающихся на практике основных проблем и ошибок.

При сравнении требований к шумозащитным панелям, предъявляемым в России и в Европе можно отметить следующее:

1. Толщина металлического оцинкованного листа в России допускается 0,8 мм, в Европе – 1,2 мм. При таких требованиях уже на первом этапе изготовления стоимость качественной оцинкованной панели становится выше, чем панелей из других материалов. Таким образом, из-за высокой стоимости и низкой долговечности оцинкованных панелей, в Европе их изготовление становится крайне невыгодным и исключается из практического применения.

2. В России обработка материала практически не регламентирована, в Европейском Союзе – предъявляются требования ко всем этапам механической обработки, а антикоррозионная обработка применяется после этих этапов.

3. В Европе минимальная плотность звукопоглощающего материала – 120 кг/м^3 , в России – минимум 90 кг/м^3 , но изготовители зачастую применяют 60 кг/м^3 , и даже меньше.

4. Требования к звукоизоляции в РФ определяются только сертификатами и протоколами испытаний, в то время, как в Европе есть ограничения по поверхностной плотности панели. Это условие позволяет недобросовестным изготовителям в РФ делать легкие панели с низкой звукоизоляцией, подтверждая значения сертификатами по измерениям в акустической камере. Так, на панели

одной и той же конструкции (одинаковая толщина, плотность материала, величина воздушной прослойки и прочее) у изготовителей индекс изоляции воздушного шума отличается на 7–9 дБ и достигает у оцинкованной панели с толщиной листа 0,7 мм 36 дБ.

Таким образом, необходимо провести масштабное исследование шумозащитных экранов, установленных в РФ, с целью определить их состояние и найти причины малой акустической долговечности шумозащитных экранов в нашей стране. Также необходимо обосновать использование более передовых технологий для обеспечения требуемой акустической долговечности шумозащитных экранов.

1.7 Акустические измерения шумозащитных экранов

Анализируя методы измерений, следует разделить измерение в акустических камерах и измерения в натурных условиях. Описанию этих методов и результатам оценки этими методами посвящена литература [202–230].

В акустических камерах на моделях во второй половине прошлого столетия японский ученый З. Маекава проводил испытания шумозащитных барьеров. Им было установлено связь акустической эффективности экрана с числом Френеля и положено начало акустики шумозащитных экранов. В настоящее время нередко проводится оценка экранов на моделях, но наибольшее распространение получили методы оценки в акустических камерах таких акустических свойств панелей акустических экранов, как звукоизоляция и звукопоглощение. Во многих НТД [87] такая процедура является обязательной и включается в техническую документацию на шумозащитные экраны.

Оценка акустической эффективности экрана в натурных условиях также является стандартной процедурой и определяется требованиями НТД [87].

В последнее время многие учёные обращали внимание на большую разницу в результатах при определении акустических свойств экранов в камерах и *in situ*. Появился метод Adzienne, в котором прописаны процедуры при определении звукоизоляции и звукопоглощения экранов в натурных условиях. Учеными БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова были доработаны некоторые положения этого метода, которые сделали его выполнение более простым [109]. Нами были выполнены дальнейшие уточнения упомянутых методик, что широко использовано в настоящей работе.

1.8 Природа дифракции, теория и расчёт шумозащитных экранов

Вопросом, описывающим физические принципы работы шумозащитных экранов, теории и расчётам экранов посвящена обширная литература [2; 5; 6; 7; 11; 13; 17; 19; 30; 242–292]. Необходимо, в первую очередь, отметить, что все теории экранов базировались на оптико-дифракционной теории [293]. В своём известном труде учёный Е. Скучик пишет, что в акустике при рассмотрении экранов используются терминологией из оптики, говорят о границах тени, освещенном пространстве, источниках света и экране – препятствии. Никаких отличий между расчётами световых и звуковых волн нет, эти расчёты применимы для электромагнитных волн вообще.

«Принцип Гюйгенса» – пишет Е. Скучик – «представляет собой одну из самых замечательных теорем в акустике, согласно которому каждую точку на плоской колеблющейся поверхности, например, экране, можно считать центром расходящейся волны. Это представление позволяет понять качественную природу явления дифракции».

На рисунке 1.23 показана форма звуковой волны за полубесконечным плоским экраном. Протяженное свободное верхнее ребро экрана является вторичным (по принципу Гюйгенса) излучателем звука, поэтому за экраном

наблюдается цилиндрическая волна. Чтобы получить звуковое давление в РТ в зоне тени за экраном, необходимо проинтегрировать интенсивности каждого из точечных вторичных излучателей, расположенных на свободном ребре. Рассмотрим наиболее простую теорию дифракции Френеля–Кирхгофа. На рисунке 1.24 звуковая волна от точечного источника шума распространяется через окно в бесконечной не пропускающий звук стене в точку Р. Размеры окна x_1 – x_2 и y_1 – y_2 .

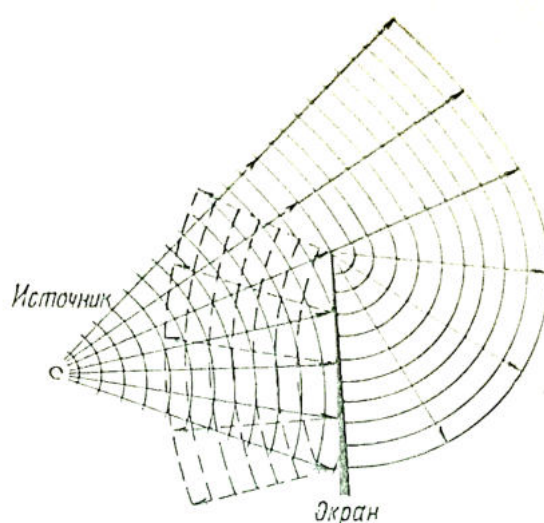
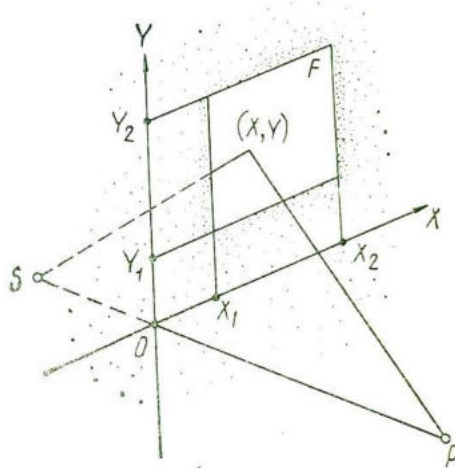


Рисунок 1.23 – Форма звуковой волны за полубесконечным плоским экраном



бесконечная плоскость X – Y с окном S –точечный источник, P – расчетная точка

Рисунок 1.24 – Звуковая волна от точечного источника шума

Звуковое поле в точке Р выражается:

$$U_{(P)} = B \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{y_2} dy \exp[ikf(x, y)], \quad (1.1)$$

где B – функция геометрии точек S и P и окна, а также длины волны λ ; однако здесь она рассматривается как константа в предположении, что размеры окна очень малы по сравнению с удалением точек S и P от стены: $k = 2\pi/\lambda$, что представляет собой, так называемое «волновое число»;

$f(x, y)$ – функция координат окна и расположения точек S и P.

Примем, что координаты x и y стремятся соответственно $x \rightarrow u, y \rightarrow v$, выражение (1.1) преобразуется в следующий вид:

$$U_{(P)} = iA \int_{u_1}^{u_2} \exp\left(i\frac{\pi}{2}u^2\right) du \int_{v_1}^{v_2} \exp\left(i\frac{\pi}{2}v^2\right) dv, \quad (1.2)$$

где A – константа, полученная из B .

$$\int_0^{u_1} \exp\left(i\frac{\pi}{2}u^2\right) du = C(u_1) + iS(u_1), \quad (1.3)$$

$$\begin{cases} C(u_1) = \int_0^{u_1} \cos\left(i\frac{\pi}{2}u^2\right) du \\ S(u_1) = \int_0^{u_1} \sin\left(i\frac{\pi}{2}u^2\right) du \end{cases}, \quad (1.4)$$

где $C(u_1)$ и $S(u_1)$ – интегралы Френеля.

Интегралы Френеля очень важны для решения многих задач и их значения можно получить из таблиц функций. Эти величины иллюстрируются спиралью Корню, представленной на рисунке 1.25.

Величина u представляет собой длину спиральной линии между точками:

$$\begin{cases} C(0) = S(0) = 0 \\ C(\infty) = S(\infty) = \pm 0,5 \end{cases}. \quad (1.5)$$

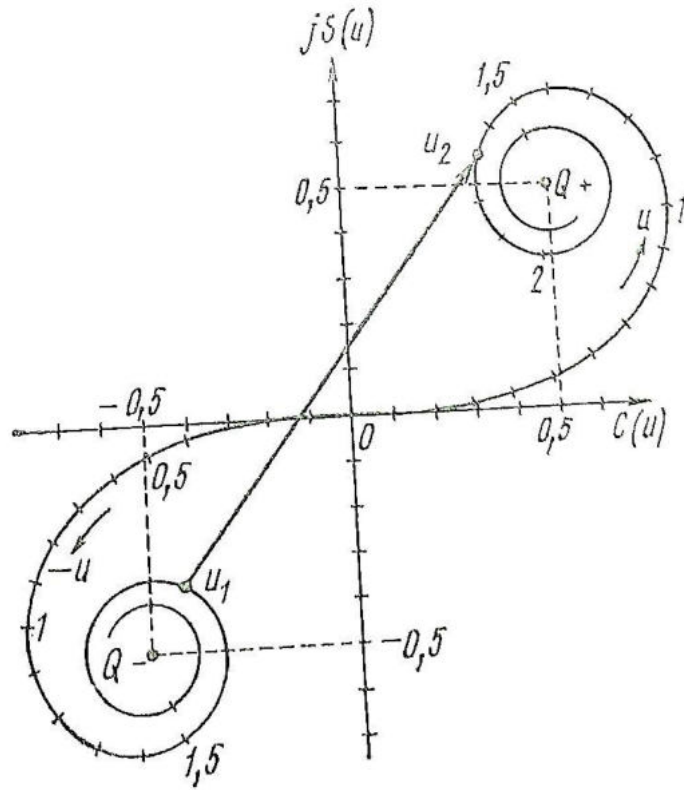


Рисунок 1.25 – Спираль Корню

Комплексная величина $\int_{u_1}^{u_2} \exp\left(i\frac{\pi}{2}u^2\right) du$ представляет собой вектор от u_1 до u_2 , его абсолютная величина и угол между ним и осью абсцисс соответствуют амплитуде и фазовому углу.

Теперь допустим, что точки S и P находятся в свободном пространстве без всякого экрана, тогда в выражении (1.2) $u_1 = -\infty$, $v_1 = -\infty$, $u_2 = +\infty$ и $v_2 = +\infty$ и тогда $U_0 = -iA(1+i)^2 = 2A$.

Фактор дифракции может быть определён как:

$$\begin{aligned}
 [DF] \frac{U_{(P)}}{U_0} &= iA \int_{u_1}^{u_2} \exp\left(i\frac{\pi}{2}u^2\right) du \int_{v_1}^{v_2} \exp\left(i\frac{\pi}{2}v^2\right) dv = \\
 &= \frac{-i}{2} \{C(u_2) - C(u_1) + i[S(u_2) - S(u_1)]\} \times \\
 &\quad \times \{C(v_2) - C(v_1) + i[S(v_2) - S(v_1)]\}.
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

Звуковое поле в точке P, прошедшее через окно, представляет собой произведение фактора дифракции (DF) на поле в свободном пространстве.

Основные методы шумозащитных экранов базируются на дифракционной теории Келлера [38]. Келлер получил формулу, позволяющую описать математическое решение для звуконепроницаемого полубесконечного экрана. Выражение для полубесконечного экрана, выглядит следующим образом:

$$\Delta L = -20 \lg \frac{1}{2\pi(\delta/\lambda)^{1/2}} - 20 \lg \frac{d}{A+B} - 20 \lg \frac{\sqrt{2}}{[(1+d)/(A+B)]^{1/2}} - \\ - 20 \lg \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\cos^{1/2}(\theta - \alpha)}{\sin^{1/2}(\theta + \alpha)} \right), \quad (1.7)$$

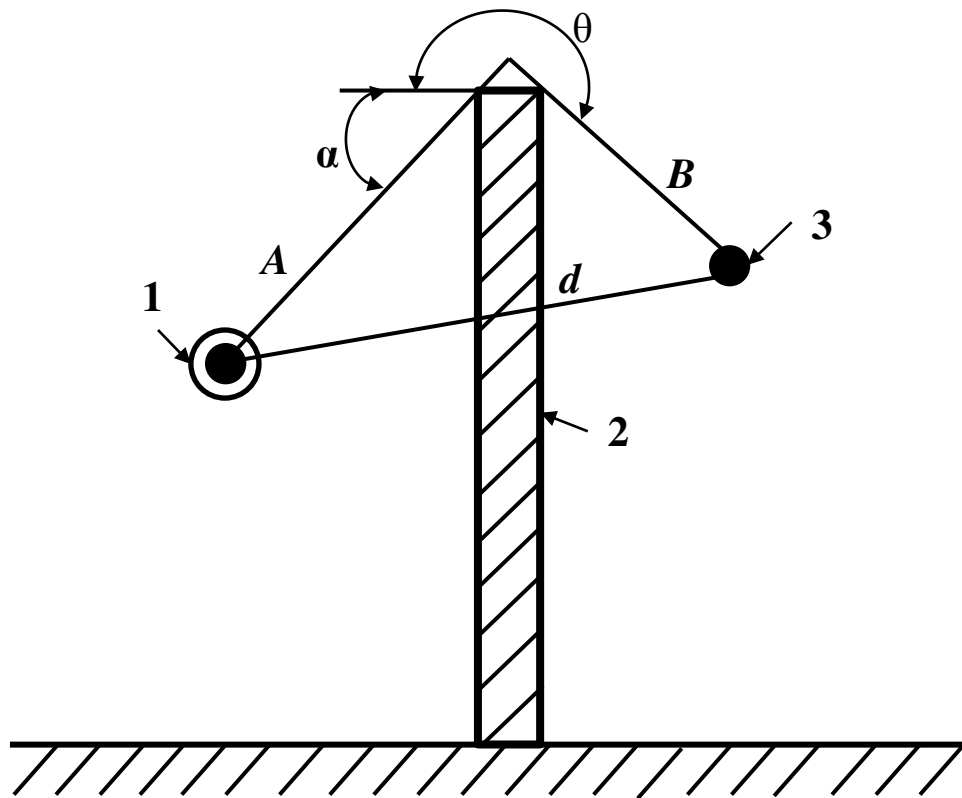
где $\delta = A + B - d$ (рисунок 1.26) – разность хода лучей, м;

λ – длина звуковой волны, м;

d, A, B – расстояния, м (рисунок 1.26);

θ и α – углы (рисунок 1.26).

Первый основной член в формуле (1.7) устанавливает частотно-зависимую связь эффективности экрана от разности хода лучей δ . Второй член – коррекция, которым учитывается увеличение сферической дивергенции дифрагированных лучей относительно движения луча, если экран отсутствует. В практических случаях коррекция невелика, но может принимать существенные значения, если ИШ и РТ расположены близко к экрану. Третий и четвертый члены дают небольшие поправки в пределах ± 3 дБ. По формуле Келлера затухание в зоне тени зависит от 7 параметров, поэтому пользование формулой затруднено.



1 – ИШ, 2 – ШЭ, 3 – РТ

Рисунок 1.26 – Расчетная схема ШЭ

Решающий вклад в разработку методов расчёта экрана для защиты от шума внесли исследования З. Маекавы, выполненные им в конце шестидесятих годов XX века [294–299]. Он выполнил экспериментальные исследования на моделях в акустических камерах. Источником звука служили импульсы чистого тона, достаточно кратковременные, чтобы учитывать только дифракцию звука на свободном ребре полубесконечного звуконепроницаемого экрана. Им получено достаточно простое выражение для определения эффективности экрана в связи со значением числа Френеля (N)

$$\Delta L_{\text{экp}} = 10 \lg(20N), \text{ дБ, где } N = \frac{2(A+B-d)}{\lambda} \quad (1.8)$$

Все используемые в дальнейшем формулы имели похожий вид, но с другими числовыми коэффициентами как, например:

$$\Delta L_{\text{экp}} = 9 \lg N + 9, \text{ при } N \geq 1, \quad (1.9)$$

$$\Delta L_{\text{экp}} = 4,5 \lg N + 8,35, \text{ при } 0,2 \leq N < 1, \quad (1.10)$$

$$\Delta L_{\text{экp}} = 2 \lg N + 6, \text{ при } 0,01 \leq N < 0,2, \quad (1.11)$$

$$\Delta L_{\text{экp}} = 20 \lg 20N, \text{ при } 0 < N < 0,01, \quad (1.12)$$

$$\Delta L_{\text{экp}} = 10 \lg 20 \frac{\sqrt{2\pi N}}{th\sqrt{2\pi N}} \cdot [300] \quad (1.13)$$

Обобщённые данные, полученные З. Маекавой показаны на рисунке 1.27. Он сравнивал данные по теории Кирхгофа и по теории З. Маекавы для точечного и линейного источников шума.

Первая даёт завышенной на 3 дБ по сравнению с теорией З. Маекавы результат. Разница между данными для линейного и точечного источника шума составили около 4–6 дБ. Все современные отечественные и зарубежные НТД базируются на полученных З. Маекавой закономерностях.

В конце XX века появились работы, описывающие расчёт шумозащитных экранов с использованием метода конечных элементов. Как показали исследования Н. В. Тюриной [13] эти методы пригодны только для расчёта в низкочастотном диапазоне. В начале 2000-х Н. И. Ивановым и Н.В. Тюриной был предложен другой подход для расчёта шумозащитных (акустических) экранов [6; 11; 13]. Основным недостатком теории З. Маекавы, по мнению авторов, состоит в том, что она не учитывает акустических свойств экрана и окружающих поверхностей, например, опорной.

Прежняя теория оперировала понятием звуковых лучей, а вторая предложила рассматривать звуковые поля вокруг экрана. Опираясь на автореферат диссертации Н. В. Тюриной, можно увидеть, что: «В расчётной схеме, предложенной З. Маекавой (рисунок 1.28а), звук огибает свободное ребро экрана, эффективность зависит от взаимного расположения ШЭ, ИШ, и РТ (угла дифракции), акустические свойства ШЭ не учитываются.

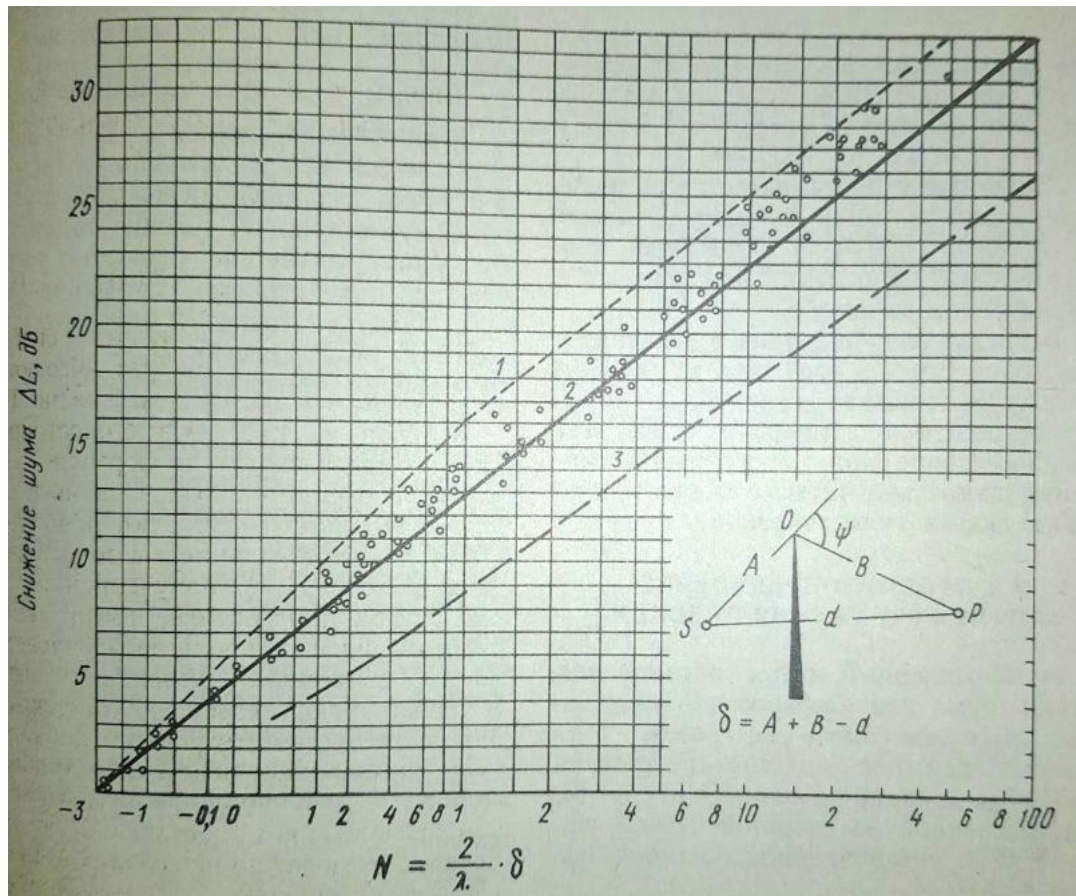
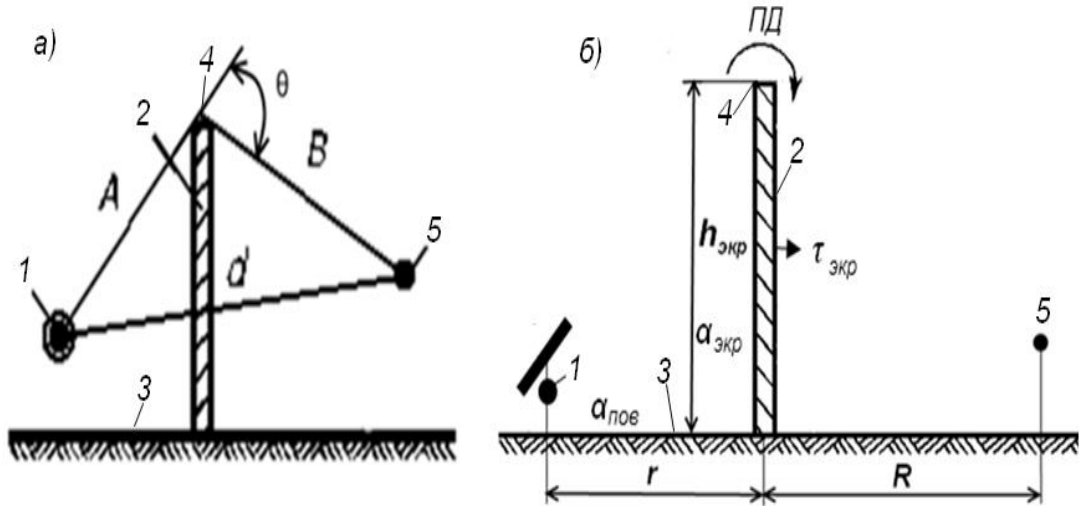


Рисунок 1.27 – Обобщённые данные, полученные З. Маекавой

В разработанной теории (рисунок 1.28б) предлагается другой подход. Согласно новому подходу введены допущения о расположении источника шума вблизи опорной поверхности ШЭ и о преимущественном распространении шума вдоль опорной поверхности к нижней части ШЭ с учётом отражения или поглощения звука опорной поверхностью. Распространение звука вдоль ШЭ происходит по направлению от нижнего ребра ШЭ к верхнему ребру ШЭ, при этом учитывается звукопоглощение ШЭ. При переходе звука через верхнее свободное ребро ШЭ (вследствие дифракции) происходит изменение направления движения звука и изменение пространственного угла излучения. Процесс дифрагирования звука на верхнем ребре определяется коэффициентом дифракции ШЭ ($\beta_{\text{экр}}$), который выражается через показатель дифракции (ПД), при этом звуковое поле формируется вторичным излучателем цилиндрических звуковых

волн (свободным ребром ШЭ). Правомерность введённых допущений доказана автором экспериментально» [13].



1 – точечный источник шума (ИШ), 2 – ШЭ, 3 – опорная поверхность между ИШ и ШЭ, 4 – свободное ребро ШЭ, 5 – расчётная точка (РТ), 6 – линейный ИШ, θ – угол дифракции

Рисунок 1.28 – Расчётные схемы ШЭ по оптико-геометрической теории (а) и предлагаемой Тюриной Н.В. (б)

Введение понятия показатель дифракции – сильная сторона предложенного подхода. На вышеописанном основании и используя правило Н. И. Иванова [6] был получен ряд формул для расчётов экранов в помещении и для транспорта. Так, например, для точечного источника шума была получена формула [13]:

$$\Delta L_{\text{экр}} = 10 \lg \frac{r^2 R}{(R + r)^2 r_0} + 10 \lg \frac{h_{\text{экр}}}{\lambda} + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}} - 10 \lg(1 - \alpha_{\text{экр}}) - \\ - 10 \lg(1 - \alpha_{\text{пов}}) - 10 \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2h_{\text{экр}}} - 10 \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2R} + 10 \lg 2\pi^2, \quad (1.14)$$

где r, R – расстояния от ИШ и от ШЭ до РТ, соответственно, м; $r_0 = 1$ м;

$h_{\text{экр}}$ – высота ШЭ, м;

λ – длина звуковой волны;

$\beta_{\text{дифр}}$ – коэффициент дифракции ШЭ;

$\alpha_{\text{экр}}$ – коэффициент звукопоглощения акустических панелей ШЭ;

$\alpha_{\text{пов}}$ – коэффициент звукопоглощения поверхности между ИШ и ШЭ;

$l_{\text{экp}}$ – длина ШЭ, м.

На рисунке 1.28 данные расчёта и эксперимента по методу З. Маекавы. Теория Н. В. Тюриной для точечного излучателя даёт хорошие совпадения с экспериментом (отклонения 2–3 дБ). Теория З. Маекавы показывает отклонения до 10 дБ.

На наш взгляд, этот подход плодотворен, но имеет определённые недостатки. Автор рассматривал звуковые поля единичных отражений звука. Это, вероятно, правомерно для точечных источников, но при рассмотрении транспортных экранов, где возникают процессы переотражения звука между ИШ, опорной поверхностью и шумозащитным экраном, этот подход требует уточнения. Здесь также не учитывается высота расположения ИШ и РТ. Предложенная авторами теория должна быть развита для транспортных и технологических шумозащитных экранов в части рассмотрения звукового поля перед ШЭ не как результат единичных, а как результат множественных отражений.

1.9 Постановка задач исследования

Проанализированы технические, акустические и технологические свойства и особенности современных шумозащитных экранов и определены следующие задачи исследования:

1. Выполнить оценку акустического загрязнения основными источниками шума (средства транспорта и стационарные ИШ) в городах и населённых пунктах.
2. Выполнить оценку акустической эффективности, акустической долговечности и акустических свойств основных видов шумозащитных

экранов, установленных в РФ в связи с их техническими характеристиками и технологиями.

3. Уточнить теорию транспортных и технологических шумозащитных экранов, базирующуюся на понятии звуковых полей.
4. Разработать основные расчётные схемы транспортных и технологических экранов, получить математические модели и выполнить их теоретические исследования.
5. Разработать или уточнить методики определения акустических свойств шумозащитных экранов в натурных условиях, разработать стенды и методики исследования опытных транспортных и технологических шумозащитных экранов.
6. Провести испытания транспортных и технологических экранов на стендах и в натурных условиях с целью изучения характера звуковых полей, сравнения экспериментальных данных с данными расчёта, уточнения или получения зависимостей акустической эффективности экранов от конструктивных и прочих параметров.
7. Разработать требования к шумозащитным экранам и рекомендации по их проектированию, монтажу и эксплуатации.
8. Разработать или обосновать новые более эффективные технологии шумозащитных экранов.
9. Выполнить апробацию основных положений диссертационной работы при проектировании, изготовлении и монтаже шумозащитных экранов.
10. Осуществить внедрение результатов диссертационной работы в проектных решениях и при изготовлении шумозащитных экранов, а также в нормативно-техническую документацию.

ГЛАВА 2 КОМПЛЕКСНОЕ НАТУРНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ШУМА В ГОРОДАХ И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

2.1 Цели, задачи и масштабы обследования

Целью комплексного натурального обследования шумозащитных экранов является анализ технических решений и технологий при проектировании, выборе, установке и эксплуатации шумозащитных экранов.

Основными задачами исследования являются:

- оценка акустического загрязнения городов и населенных пунктов и выявление основных источников шума;
- проведение экспериментальных исследований по определению акустической эффективности транспортных шумозащитных экранов и сравнение расчетной эффективности шумозащитных экранов с эффективностью, полученной экспериментальным путем;
- выявление причин недостаточной акустической эффективности шумозащитных экранов, включая ошибки проектирования, монтажа и качества изготовления шумозащитных конструкций;
- разработка методики измерения показателей звукоизоляции и звукопоглощения в натуральных условиях;
- проведение экспериментальных исследований по определению акустических свойств транспортных шумозащитных экранов (звукопоглощение и звукоизоляция);
- измерения шума в жилой застройке при установленных ШЭ с целью определения соответствия экранов заявленным характеристикам;

- проведение сравнительного анализа между показателями звукопоглощения и звукоизоляции, полученными в натурных условиях с показателями, полученными в акустических камерах;
- определение состояния транспортных шумозащитных экранов из различных материалов на различных сроках службы и последующее определение их акустической долговечности.

Для решения поставленных задач по оценке акустического загрязнения городов были исследованы крупнейшие транспортные магистрали I–II категорий, такие как М–4 «Дон», М–10 «Россия», М–5 «Урал», М–8 «Холмогоры», М–7 «Волга», М–9 «Балтия», М–2 «Крым», А–118, Р–21 «Кола», А–108 и другие, участки железнодорожной инфраструктуры Северо–Западного региона, Октябрьской железной дороги, крупные промышленные предприятия.

С целью изучения качества и свойств, устанавливаемых в РФ шумозащитных экранов, были обследованы более 50 конструкций из оцинкованной стали, дерева, комбинированных материалов (металлические шумозащитные экраны с секциями из поликарбоната и закаленного стекла), установленных вдоль автомобильных и железных дорог РФ, с различными сроками службы от одного года до 15 лет.

2.2 Методика натурных измерений

2.2.1 Общие положения и средства измерений

Методика измерения шума на селитебной территории опирается на ГОСТ 23337–2014 «Методы измерения шума на селитебной территории в помещениях жилых и общественных зданий», а методика измерения шумовых характеристик от автодороги на ГОСТ 20444–2014 «Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики» [316].

Измерение уровней звука, эквивалентных и максимальных уровней звука проводились интегрирующими–усредняющими шумомерами 1-го класса по ГОСТ 17187 или измерительными системами с аналогичными характеристиками.

Перед началом каждой серии измерений и после ее окончания должны быть проведены проверки калибровки средств измерения в соответствии с руководствами по их эксплуатации.

Если при проверке калибровки до и после измерения показания шумомера или иного средства измерения отличаются более чем на 0,3 дБА, выполненные измерения недействительны, проводится новая проверка калибровки прибора и повторяются измерения.

Средства измерений, предназначенные для измерения шума, имели действующие свидетельства о поверке.

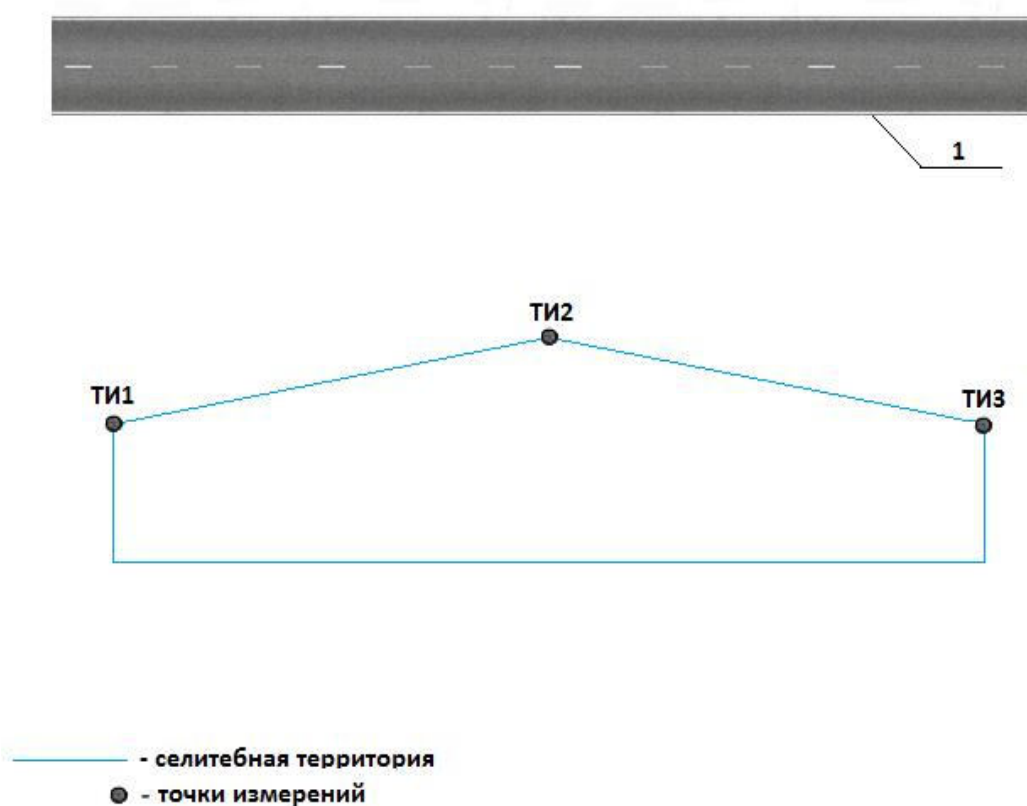
Перед проведением измерений шума на открытом воздухе определялись метеорологические условия (скорость ветра, температуру воздуха, влажность, атмосферное давление).

2.2.2 Измерение уровней звука на селитебной территории

Измерение шума проводятся на территории непосредственно прилегающей к жилым домам, зданиям больниц, санаториев, поликлиник, амбулаторий, диспансеров, домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, детских дошкольных учреждений, школ и других учебных заведений, библиотек, гостиниц и общежитий в точках, расположенных на расстоянии не ближе 2 м от ограждающих конструкций зданий на высоте $(1,5 \pm 0,1)$ м над уровнем поверхности территории.

Точки измерения для групп жилых домов определяются около здания, наиболее близко расположенного к ИШ и около углов крайних зданий групп жилых домов. Для населенных пунктов, садовых товариществ, садоводств и пр., точки измерения определяются у начального, конечного и наиболее близкого к

автодороге участков жилой застройки. В случае если начальный или конечный участок жилой застройки является наиболее близкорасположенным краем селитебной территории, то количество точек измерения сокращается до двух. При расположении нескольких населенных пунктов, садовых товариществ и пр. сплошной линией жилой застройки, для каждого промежуточного населенного пункта выбирается всего одна точка измерения в наиболее близкорасположенной части территории, как представлено на рисунке 2.1.



1 – дорога с движущимися автомобилями,
ТИ1, ТИ2, ТИ3 – точки измерений

Рисунок 2.1 – Схема измерения шума на селитебной территории от автотранспортного потока в натуральных условиях

Измерения шума на территории не проводятся во время выпадения атмосферных осадков, при тумане, при температуре и влажности воздуха, не соответствующих паспортным данным на аппаратуру, и при скорости ветра более

5 м/с. При скорости ветра от 1 до 5 м/с применяется ветрозащитное устройство, рекомендованное изготовителем шумомера. Значения других метеорологических параметров (температура воздуха, влажность, атмосферное давление) во время измерений не должны выходить за рамки предельных значений, приведенных в технической документации на соответствующую измерительную аппаратуру.

При проведении измерений уровней шума закреплялись измерительный микрофон или шумомер с микрофоном на штативе, установленном в точке измерения. При этом ось измерительного микрофона направлена в сторону автодороги.

Во время проведения измерения шума оператор, проводящий измерение, находился от измерительного микрофона на расстоянии не менее 0,5 м для уменьшения отражений звука. Между измерительным микрофоном и источником шума не должны находиться какие-либо лица и размещаться посторонние (особенно крупногабаритные) предметы.

При измерении шума на селитебной территории от автодороги длительность измерительного интервала в каждой измерительной точке составляла не менее 5 мин.

Количество измерений не менее 3 повторений в каждой измерительной точке.

2.2.3 Измерения шумовых характеристик автомобильных и железных дорог

Места для проведения измерений шумовых характеристик автотранспортных потоков выбирались на прямолинейных участках улиц и автомобильных дорог с установившейся скоростью движения автотранспортных средств, и на расстоянии не менее 50 м от перекрёстков, транспортных площадей и остановочных пунктов пассажирского общественного транспорта. Измерения проводились на участках улиц и автомобильных дорог с чистой и сухой поверхностью проезжей части без осадков в небе.

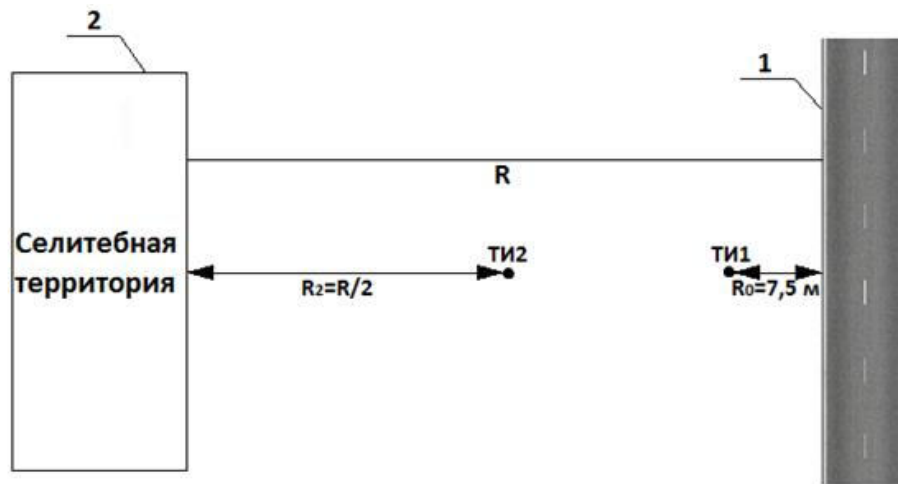
При проведении измерений шумовых характеристик ось измерительного микрофона направлена в сторону транспортного потока и перпендикулярно к направлению дороги.

Уровни фонового шума, т.е. уровни звука помех, создаваемых посторонними источниками шума в период измерения шумовых характеристик транспортных потоков, должны быть не менее чем на 10 дБ (дБА) ниже уровней звука при прохождении перед измерительным микрофоном транспортных средств. Уровни фона измеряются в паузах между проездами отдельных транспортных средств при наличии такой возможности.

При проведении измерений шумовых характеристик автотранспортного потока, в состав которого могут входить легковые и грузовые автомобили, автопоезда, автобусы, троллейбусы, трамваи, мотосредства (мотоциклы, мотороллеры, мопеды, мотовелосипеды), а также другие виды транспортных средств, измерительный микрофон должен располагаться на расстоянии $(7,5 \pm 0,2)$ м от оси ближней к точке измерения полосы или пути движения транспортных средств и на высоте $(1,5 \pm 0,1)$ м от уровня покрытия проезжей части в соответствии с рисунком 2.2.

Дополнительно выбирается точка измерения на половине расстояния от ближайшей селитебной территории и автодороги на высоте $(1,5 \pm 0,1)$ м от уровня земли, как представлено на рисунке 2.2.

Продолжительность периода измерения шумовых характеристик автотранспортного потока, в состав которого могут входить автотранспортные средства различного вида (в частности, легковые и грузовые автомобили, общественный транспорт), зависит от интенсивности движения потока. Измерение продолжают до тех пор, пока не произойдет стабилизация показаний измерительного прибора в пределах выбранной точности измерений, которая должна быть не хуже $\pm 0,5$ дБА, но и при этом продолжительность измерения должна быть не менее 5 мин. Также в период проведения измерений проводится подсчет легковых и грузовых автомобилей.



1 – дорога с движущимися автомобилями, 2 – ближайшая селитебная территория,
ТИ1, ТИ2 – точки измерений

Рисунок 2.2 – Схема измерения шумовых характеристик от автотранспортного потока в натуральных условиях, вид сверху

При неинтенсивном движении автотранспорта, например, при одиночных проездах автотранспортных средств, продолжительность периода измерений шумовых характеристик автотранспортного потока должна охватывать проезд двух основных групп транспорта, одна из которых включает в себя не менее 30 легковых автомобилей, а другая включает в себя грузовые автомобили, автобусы и общественный транспорт (суммарно не менее 30 транспортных средств).

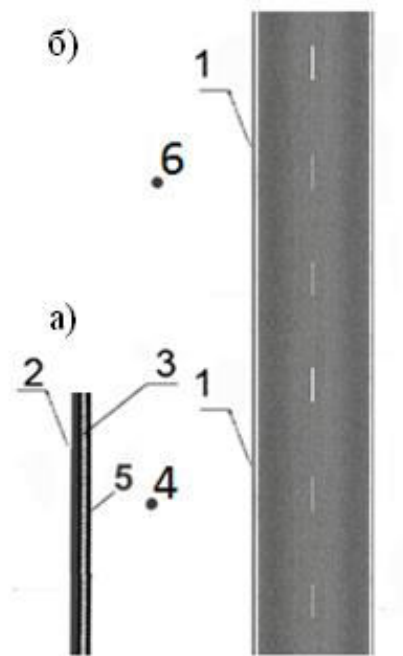
2.2.4 Измерения коэффициентов звукопоглощения

Измерения проводятся вблизи ШЭ на расстоянии 1 м от звукопоглощающего экрана (рисунок 2.3, а) и без ШЭ (рисунок 2.3, б). Измерения с экраном проводят в тех же местах, где измеряли эффективность ШЭ. Место для выполнения испытаний без экрана выбирают таким образом, чтобы оно наиболее точно соответствовало месту, где установлен экран, по характеристикам источника шума, рельефу местности, характеристикам поверхности, метеорологическим условиям и расположению микрофонов и

находилось на расстоянии от стоящего экрана минимум на 30 м (предпочтительно 50 м).

Высота расположения микрофона определяется индивидуально. Ось микрофона должна быть перпендикулярна центральной части звукопоглощающей панели экрана. Между микрофоном и автотранспортным потоком не должно быть препятствий, влияющих на распространение шума, таких как, например, барьерное ограждение и пр.

Измерения в выбранных точках проводятся одновременно.



а) – измерения на расстоянии 1 м от отражающе-поглощающего экрана,

б) – измерения без крана;

1 – дорога с движущимися автомобилями, 2 – внешняя (по отношению к автотранспортному потоку) сторона ШЭ, 3 – шумозащитный экран, 4, 6 – точки измерений,

5 – внутренняя сторона ШЭ со звукопоглощением

Рисунок 2.3 – Схема измерения звукопоглощающей способности ШЭ в натуральных условиях. Вид сверху

Для каждой точки период проведения измерений должен включать проезд не менее 50 машин в обоих направлениях и время измерения должно быть не менее 3 минут. В период проведения измерения идет фиксация направлений

проезда авто и разделение легковых и грузовых машин. Количество измерений должно быть не менее трёх.

Значение коэффициента звукопоглощения определяется:

$$\alpha_{\text{экр}} = 2 - 10^{0,1(L_{\text{ТИ}1}^{\text{с ШЭ}} - L_{\text{ТИ}2}^{\text{без ШЭ}})}, \quad (2.1)$$

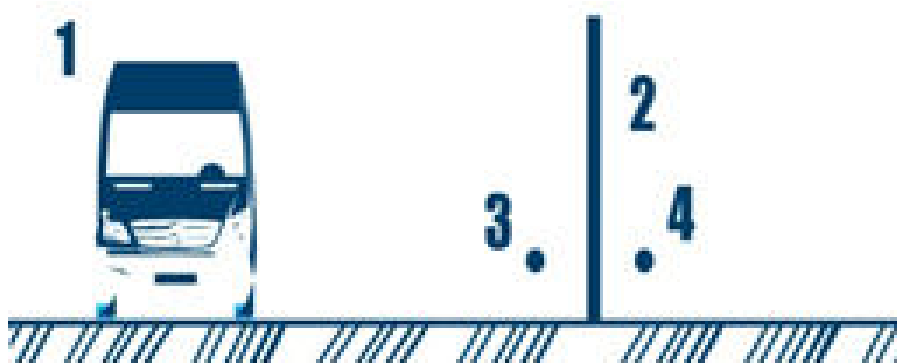
где $\alpha_{\text{экр}}$ – коэффициент звукопоглощения ШЭ;

$L_{\text{ТИ}1}^{\text{с ШЭ}}$ – УЗД в точке с ШЭ, дБ;

$L_{\text{ТИ}2}^{\text{без ШЭ}}$ – УЗД в точке без ШЭ, дБ.

2.2.5 Измерения звукоизоляции

При движении автотранспорта по дороге проводится процедура измерения фактической звукоизоляции путём «прозвучивания» шумозащитного экрана в основных сечениях (рисунок 2.4), а также в местах, где обнаружены «слабые» с акустической точки зрения участки в конструкции (неплотное прилегания панелей друг к другу или к стойкам, не предусмотренные конструкцией проемы, щели и др.). Схема размещения дорог с движущимися машинами, ШЭ и измерительных точек сбоку показаны на рисунке 2.4.

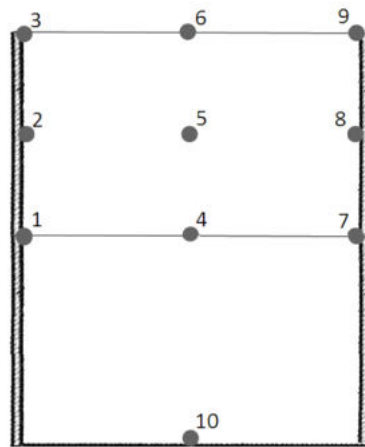


- 1 – дорога с движущимся автотранспортом, 2 – шумозащитный экран,
3 – расположение измерительных точек перед ШЭ,
4 – расположение измерительных точек за ШЭ

Рисунок 2.4 – Схема размещения мест расположения точек измерений и шумозащитного экрана

Размещение измерительных точек на поверхностях панелей относительно стоек показано на рисунке 2.5. Точки располагаются относительно стоек и панелей по девять штук (в верхней, средней и нижней частях панели) на 1 стойку и панели, расположенные между двумя стойками. Дополнительно в измерение включается 10 точка измерений, для оценки прохождения шума под шумозащитным экраном.

Измерительные точки располагаются на расстоянии 0,1 м от акустического экрана. Измерения выполняются двумя шумомерами одновременно. Для каждой точки период проведения измерений должен включать проезд не менее 50 машин в обоих направлениях и время измерения должно быть не менее 3 минут. В период проведения измерения идет фиксация направлений проезда авто и разделение легковых и грузовых машин.



1–10 – измерительные точки

Рисунок 2.5 – Схема расположения измерительных точек

Количество измерений должно быть не менее трёх. Измерения проводятся в тех же сечениях, где измерялась эффективность ШЭ (рисунок 2.4). Если на экране есть дефекты, то в таком месте проводится измерение звукоизоляции только для точки, положение которой соответствует №5 согласно рисунку 2.5.

а) Определение ЗИ верхней части ШЭ:

$$L_{\text{верх}}^{\text{перед ШЭ}} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{(0,1 \cdot L_i)}, \quad (2.2)$$

где $L_{\text{верх}}^{\text{перед ШЭ}}$ – средний УЗД в верхней части ШЭ, дБ;

L_i – УЗД в i -ой точке измерений перед ШЭ, дБ.

$$L_{\text{верх}}^{\text{за ШЭ}} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{(0,1 \cdot L_i)}, \quad (2.3)$$

где $L_{\text{верх}}^{\text{за ШЭ}}$ – средний УЗД в верхней части ШЭ, дБ;

L_i – УЗД в i -ой точке измерений, дБ.

$$\text{ЗИ}_{\text{верх}} = L_{\text{верх}}^{\text{перед ШЭ}} - L_{\text{верх}}^{\text{за ШЭ}}, \quad (2.4)$$

где $\text{ЗИ}_{\text{верх}}$ – звукоизолирующая способность верхней части ШЭ, дБ.

б) Определение ЗИ нижней части ШЭ:

$$\text{ЗИ}_{\text{низ}} = L_{\text{низ}}^{\text{перед ШЭ}} - L_{\text{низ}}^{\text{за ШЭ}}, \quad (2.5)$$

где $L_{\text{низ}}^{\text{перед ШЭ}}$ – УЗД перед шумозащитным экраном, дБ;

$L_{\text{низ}}^{\text{за ШЭ}}$ – УЗД за шумозащитным экраном, дБ.

$$\text{ЗИ}_{\text{экрана}} = \text{ЗИ}_{\text{верх}} - 10 \log \frac{\frac{s_{\text{верх}}}{s_{\text{низ}}} + 10^{0,1(\text{ЗИ}_{\text{верх}} - \text{ЗИ}_{\text{низ}})}}{1 + \frac{s_{\text{верх}}}{s_{\text{низ}}}}, \quad (2.6)$$

где $s_{\text{верх}}$ – площадь сечения/пролета верхней части ШЭ, м²;

$s_{\text{низ}}$ – площадь нижней части ШЭ под измеряемой секцией/пролетом, м²
(площадь щели).

2.3 Характер акустического загрязнения в городах и населенных пунктах

2.3.1 Общие положения

Были проведены измерения уровней шума от крупнейших автомагистралей в городе Санкт-Петербург и Ленинградской области, Москве и Московской области, Чебоксарах, Рязани, Уфе, Сочи, Пскове, Самаре, от международных

аэропортов г. Санкт-Петербурга и Москвы, железных дорог в г. Санкт-Петербург и Ленинградской области, промышленных объектов в г. Санкт-Петербурге.

2.3.2 Автомобильный транспорт

Для исследования акустического загрязнения городов и населённых пунктов шумом автомобильных дорог были исследованы крупнейшие транспортные магистрали I–II категорий, такие как М–4 «Дон», М–10 «Россия», М–5 «Урал», М–8 «Холмогоры», М–7 «Волга», М–9 «Балтия», М–2 «Крым», А–118, Р–21 «Кола», А–108 и другие на 17 участках в различных регионах РФ. Интенсивность движения на обследуемых участках по официальным данным, предоставленным ФКУ РОСАВТОДОР, составляла от 7 000 авт/сутки на съездах до 180 000 авт/сутки и более на участках с 8-мью полосами движения.

Измеренные шумовые характеристики автомобильных дорог представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Шумовые характеристики автомобильных дорог
в дневной период времени

Автомобильная дорога	ШХ, дБА		Состав транспортного потока (время измерений – от 5 мин)					
	Экв УЗ	Макс. УЗ	легковые	грузовые	автобусы	троллейбусы	мотоциклы	др. виды
г. Санкт–Петербург и Ленинградская область								
А–118 КАД	80	89	409	99	5	–	1	–
	77	83	437	84	2	–	3	–
	85	96	302	110	4	–	–	–
	82	93	427	87	–	–	–	–
Р–21 «Кола»	78	87	435	95	7	–	–	1
	74	83	362	32	8	–	1	–
	74	88	468	45	8	–	2	–

Продолжение таблицы 2.1

Автомобильная дорога	ШХ, дБА		Состав транспортного потока (время измерений – от 5 мин)					
	Экв УЗ	Макс. УЗ	легковые	грузовые	автобусы	троллейбусы	мотоциклы	др. виды
г. Москва и Московская область								
А–108	74	84	188	231	16	–	–	–
	74	84	210	201	9	–	–	–
	76	86	197	221	10	–	–	–
М–2 «Крым»	80	84	257	184	20	–	–	–
М–4 «Дон»	79	89	251	161	5	–	–	–
	79	89	290	120	5	–	–	–
М–10 «Россия»	79	85	251	134	30	–	–	–
	78	88	270	44	29	–	–	–
	78	88	267	134	23	–	–	–
г. Москва и Московская область								
М–5 «Урал»	81	89	280	146	21	–	–	–
М–8 «Холмогоры»	84	90	273	134	28	–	–	–
М–7 «Волга»	78	85	266	138	15	–	–	–
	80	85	230	146	13	–	–	–
М–9 «Балтия»	86	93	312	89	17	–	–	–
г. Чебоксары								
М–7 «Волга»	73	85	267	142	3	–	–	–
	76	89	147	254	3	–	–	–
	76	85	138	271	6	–	–	–
г. Рязань								
М–5 «Урал»	76	84	297	90	20	–	–	–
г. Уфа								
М–5 «Урал»	80	89	311	90	15	–	–	–
г. Сочи								
М–4 «Дон»	70	80	364	12	18	–	–	–

Продолжение таблицы 2.1

Автомобильная дорога	ШХ, дБА		Состав транспортного потока (время измерений – от 5 мин)					
	Экв УЗ	Макс. УЗ	легковые	грузовые	автобусы	троллейбусы	мотоциклы	др. виды
г. Сочи								
А–147 (М–27)	75	82	378	17	28	–	–	–
г. Псков								
М–9 «Балтия»	86	93	312	89	17	–	–	–
г. Самара								
М–5 «Урал»	79	83	354	30	25	–	–	–

Доля грузовых автомобилей в составе транспортного потока в Санкт-Петербурге и Ленинградской области на А–118 (КАД) составила в среднем 21%, на Р–21 «Кола» – 14%, в Москве и Московской области на А–108 – 54%, М–2 «Крым» – 44%, М–4 «Дон», М–10 «Россия», М–5 «Урал», М–8 «Холмогоры», М–7 «Волга» – от 39 до 33%, на М–9 «Балтия» – 25%, в Чебоксарах на М–7 «Волга» – 55%, в Рязани – 27%, в Уфе – 25%, в Сочи от 8 до 11%, в Пскове – 25%, в Самаре – 13%. Следует отметить, что при наличии грузовых автомобилей более 50% в составе транспортного потока эквивалентный уровень звука повышается в среднем на 5 дБА, максимальный – на 6 дБА.

Графики шумовых характеристик выполненных измерений приведены на рисунках 2.6–2.7.

По результатам проведённого исследования шумовые характеристики автомобильных дорог в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области составили по эквивалентному уровню звука 74–85 дБА, по максимальному – 83–96 дБА, в Москве и Московской области – 74–86 дБА и 84–93 дБА соответственно. При проведении расчетов по распространению шума на местности автомобильная дорога аппроксимируется линейным источником шума при оценке эквивалентного уровня звука и точечным источником шума при оценке

максимального уровня звука для случая, когда максимальный уровень звука создается наиболее шумным автомобилем при проезде на кратчайшем расстоянии от жилой застройки.

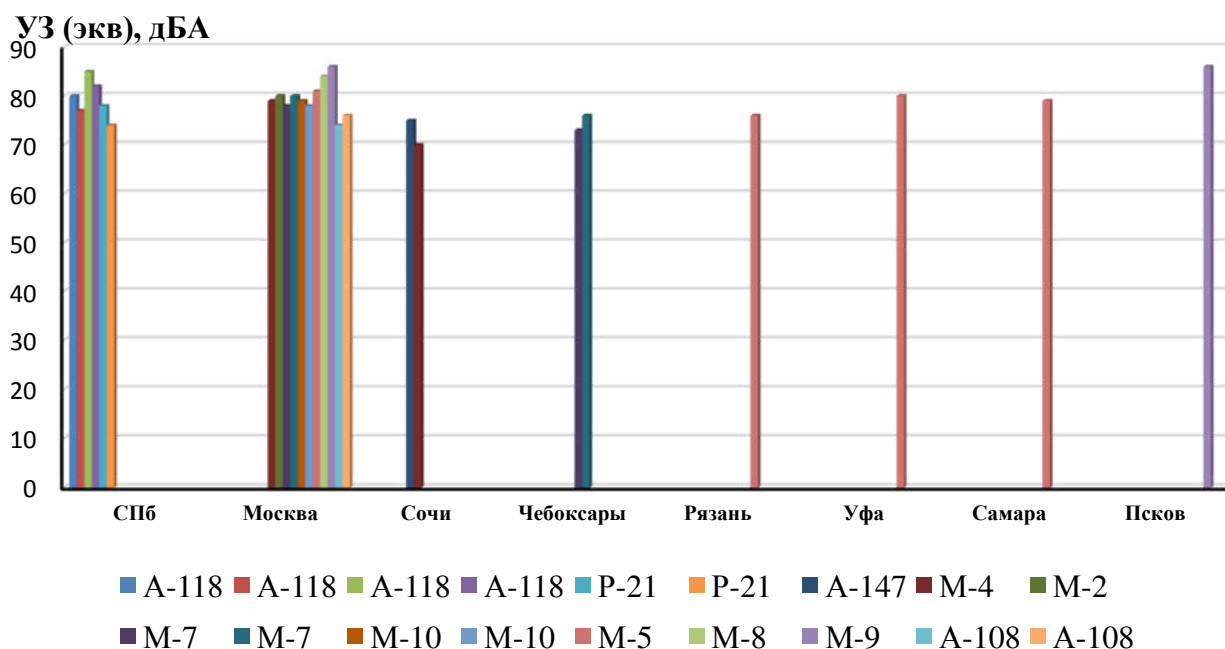


Рисунок 2.6 – Шумовые характеристики автомобильных дорог по эквивалентному уровню звука

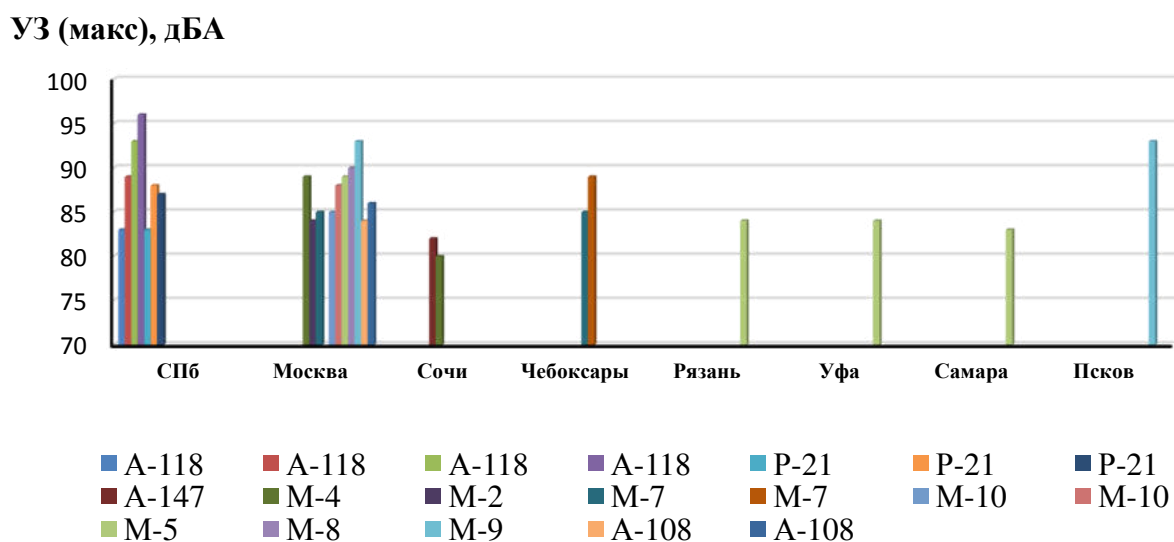


Рисунок 2.7 – Шумовые характеристики автомобильных дорог по максимальному уровню звука

Для оценки акустической обстановки вдоль автомобильных дорог условно рассматривалась зона на расстоянии 100 м от оси транспортной магистрали.

При ориентировочных расчетах уровней звука на расстоянии 100 м от оси автомобильной дороги учитывалось только снижение шума с расстоянием за счет дивергенции.

Эквивалентный уровень звука на расстоянии R от автомобильной дороги (линейного источника шума) определяется по общеизвестной формуле:

$$L_{AeqR} = L_{Aeqr_0} - 10 \lg \left(\frac{R}{r_0} \right), \quad (2.7)$$

где L_{AeqR} – эквивалентный уровень звука на расстоянии R от линейного источника шума, дБА;

L_{Aeqr_0} – шумовая характеристика автомобильной дороги по эквивалентному уровню звука на расстоянии r_0 , дБА;

R – расстояние, на котором определяется эквивалентный уровень звука, м,
 r_0 – расстояние, на котором определялась шумовая характеристика автомобильной дороги, $r_0 = 7,5$ м.

Максимальный уровень звука на расстоянии R от автомобильной дороги (точечного источника шума) также определяется по общеизвестной формуле:

$$L_{AmaxR} = L_{Amaxr_0} - 20 \lg \left(\frac{R}{r_0} \right), \quad (2.8)$$

где L_{AeqR} – максимальный уровень звука на расстоянии R от точечного источника шума, дБА;

L_{Aeqr_0} – шумовая характеристика автомобильной дороги по максимальному уровню звука на расстоянии r_0 , дБА;

R – расстояние, на котором определяется максимальный уровень звука, м,
 r_0 – то же, что в формуле (2.7).

Так, на расстоянии 100 м от оси автомобильной дороги эквивалентный уровень звука снизится на 11 дБА, максимальный уровень звука – на 22 дБА.

Сравнение рассчитанных уровней звука на расстоянии 100 м от оси автомобильных дорог с нормами для территорий, непосредственно прилегающих

к жилой застройке, согласно СН 2.2.4/2.1.8.562–96 представлено на рисунках 2.8–2.9.

Анализируя представленные гистограммы, в 100% случаев на расстоянии 100 м от оси автомобильных дорог остаются превышения по эквивалентному уровню звука на величину от 1 до 20 дБА (рис. 2.8). Одновременно по выполненному расчету 100 м достаточно для снижения максимального уровня звука до нормы, превышения остаются в 17% случаев (рис 2.9).

Выполненный анализ подтверждает данные, приведенные Роспотребнадзором в [1].

При определении шумовых характеристик автомобильных дорог вклад других источников шума был минимальный и более чем в 80% случаев не имел какого-либо влияния. Диаграмма процентного соотношения вкладов представлена на рисунке 2.10.

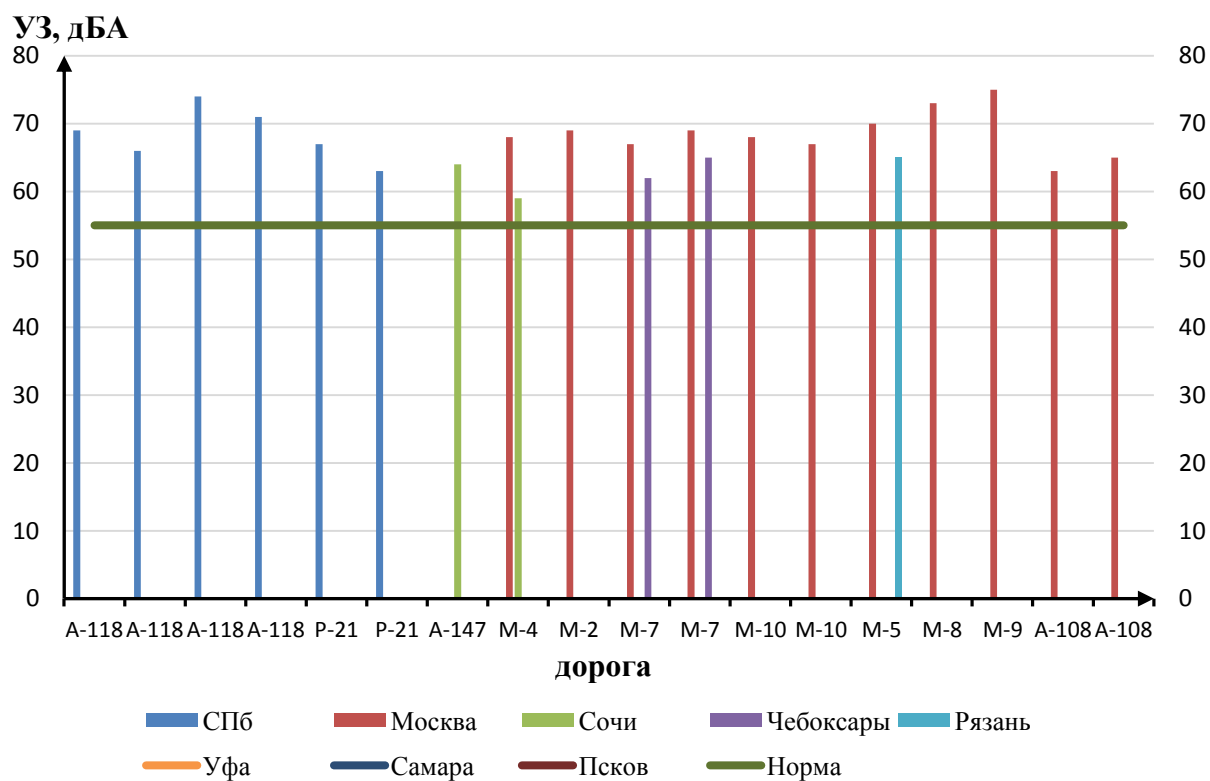


Рисунок 2.8 – Рассчитанные эквивалентные УЗ на расстоянии 100 м от оси автомобильных дорог

УЗ, дБА

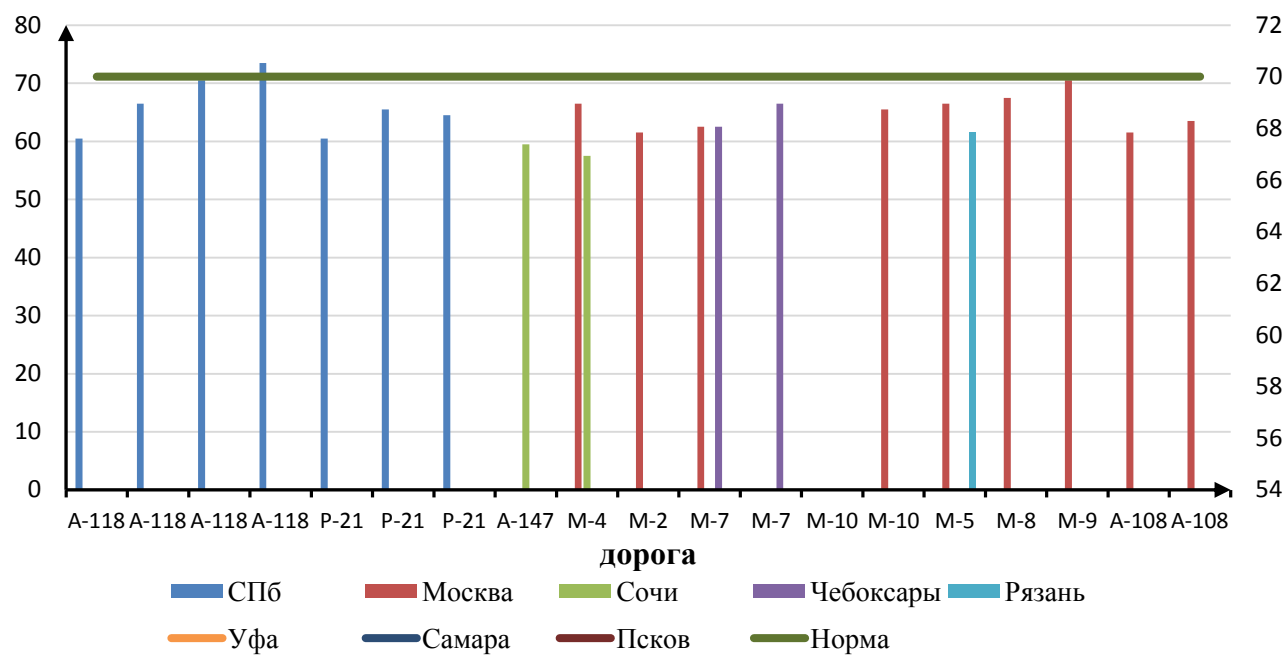


Рисунок 2.9 – Рассчитанные максимальные УЗ на расстоянии 100 м от оси автомобильных дорог

Вклад других источников шума при определении ШХ а/д., %

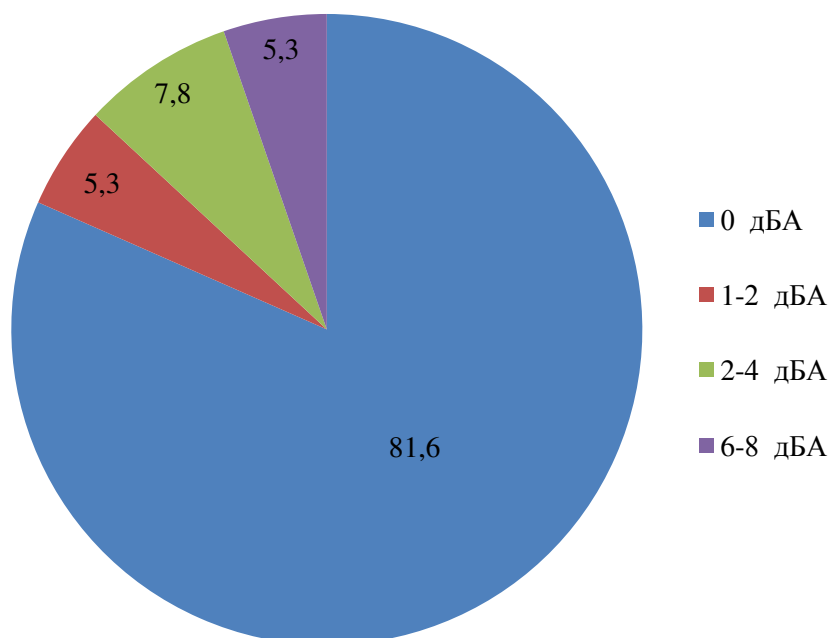


Рисунок 2.10 – Диаграмма процентного соотношения вкладов посторонних источников шума при определении ШХ автомобильных дорог

2.3.3 Железнодорожный транспорт

Согласно ГОСТ 20444 шумовая характеристика потока поездов определяется на расстоянии $(25 \pm 0,5)$ м от оси ближней к точке измерения полосы движения транспортных средств и на высоте $(1,5 \pm 0,1)$ м над уровнем головки рельса (при скорости движения поезда менее 250 км/ч).

Для определения акустического загрязнения городов и населенных пунктов были исследованы различные участки железнодорожной инфраструктуры Северо-Западного региона Октябрьской железной дороги. Были измерены шумовые характеристики на прямых бесстыковых участках железной дороги на железобетонных шпалах, как отдельных поездов, так и потоков поездов.

Сравнение измеренных эквивалентных и максимальных уровней звука представлено на рисунках 2.11–2.13.

В качестве примера на рисунках 2.14–2.17 представлены измеренные шумовые характеристики отдельных поездов различных категорий на одном из участков Октябрьской железной дороги и общий за 4 часа измерений эквивалентный и максимальный уровни звука.

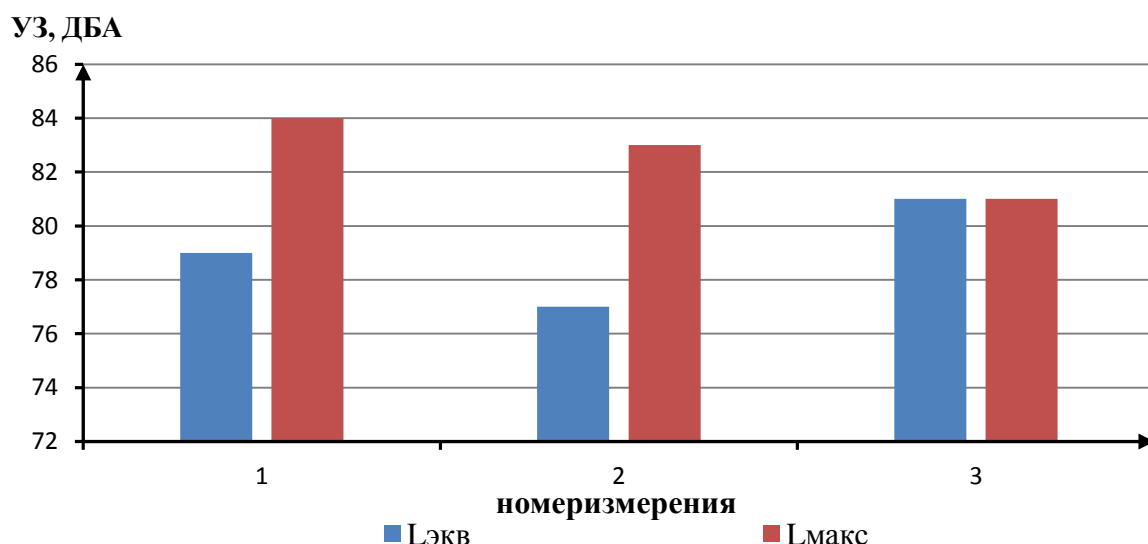


Рисунок 2.11 – Измеренные уровни звука скоростных поездов за время проезда мимо точки наблюдения в дневное время суток

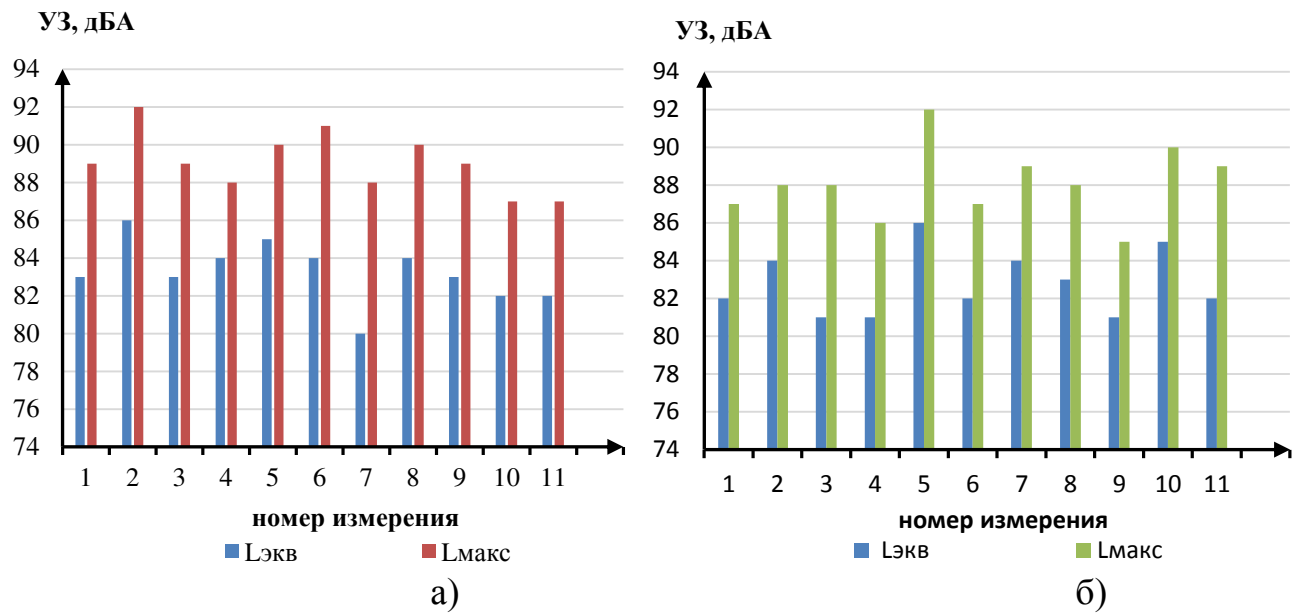


Рисунок 2.12 – Измеренные уровни звука грузовых поездов за время проезда мимо точки наблюдения в дневное (а) и ночное (б) время суток

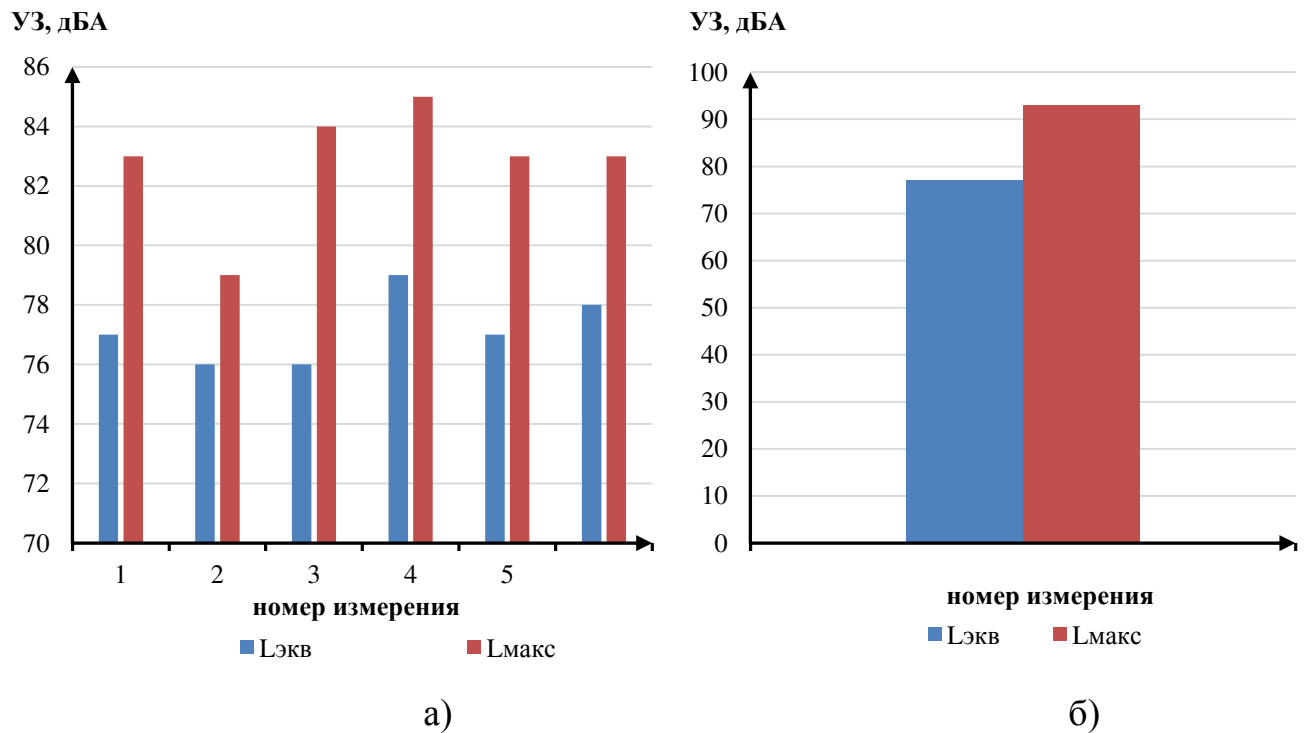


Рисунок 2.13 – Измеренные уровни звука электропоездов за время проезда мимо точки наблюдения в дневное (а) и ночное (б) время суток

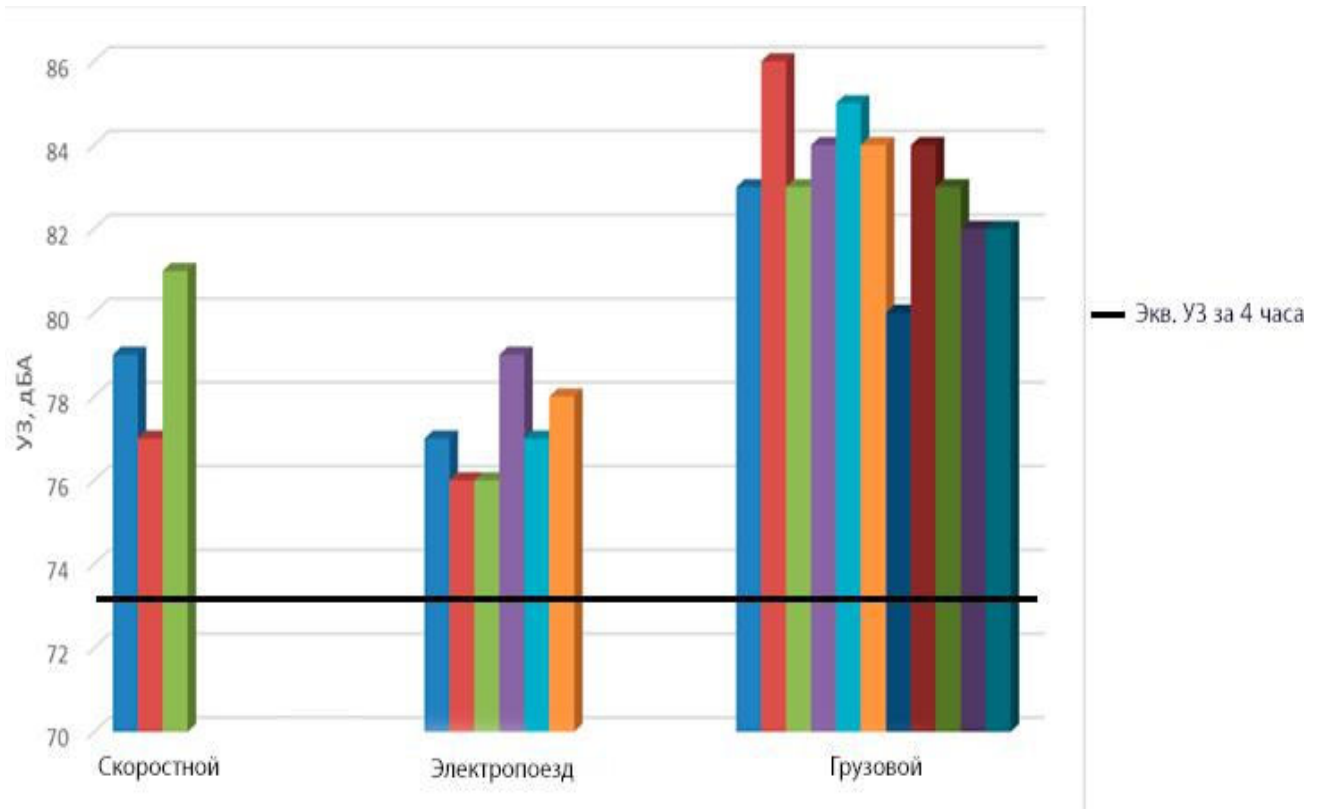


Рисунок 2.14 – Измеренные эквивалентные уровни звука за время проезда поездов различных категорий в дневное время суток

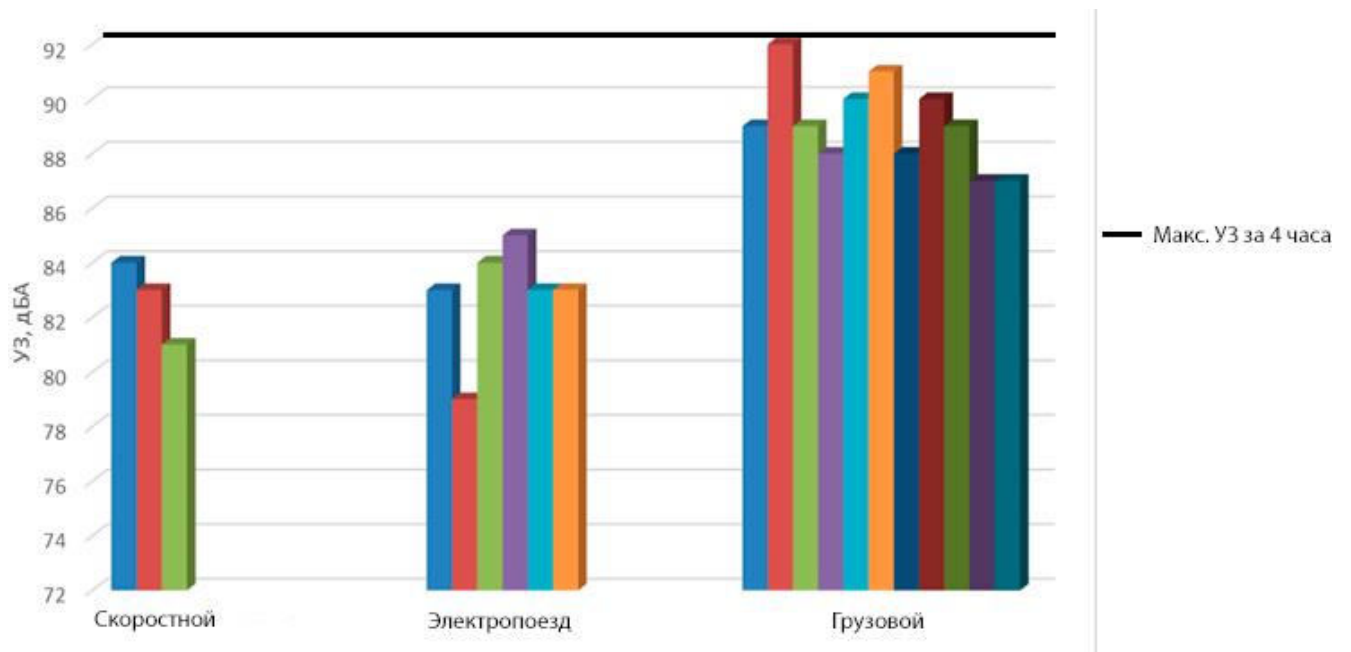


Рисунок 2.15 – Измеренные максимальные уровни звука за время проезда поездов различных категорий в дневное время суток

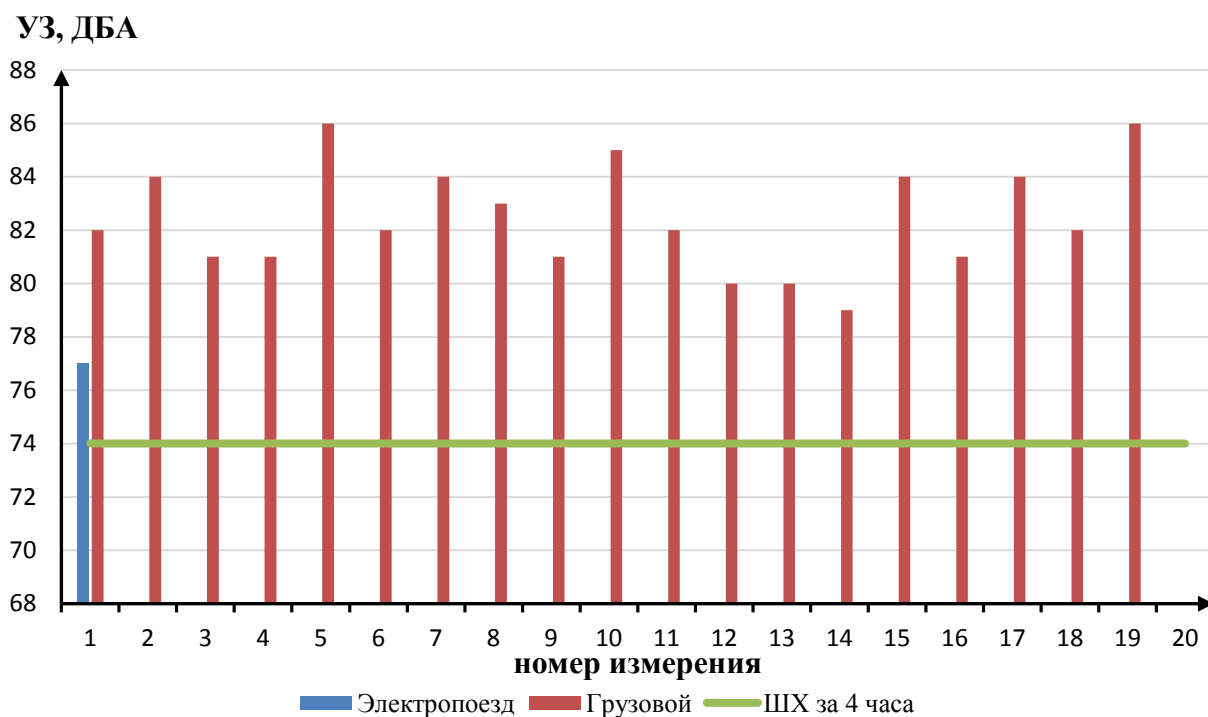


Рисунок 2.16 – Измеренные эквивалентные уровни звука за время проезда поездов различных категорий в ночное время суток

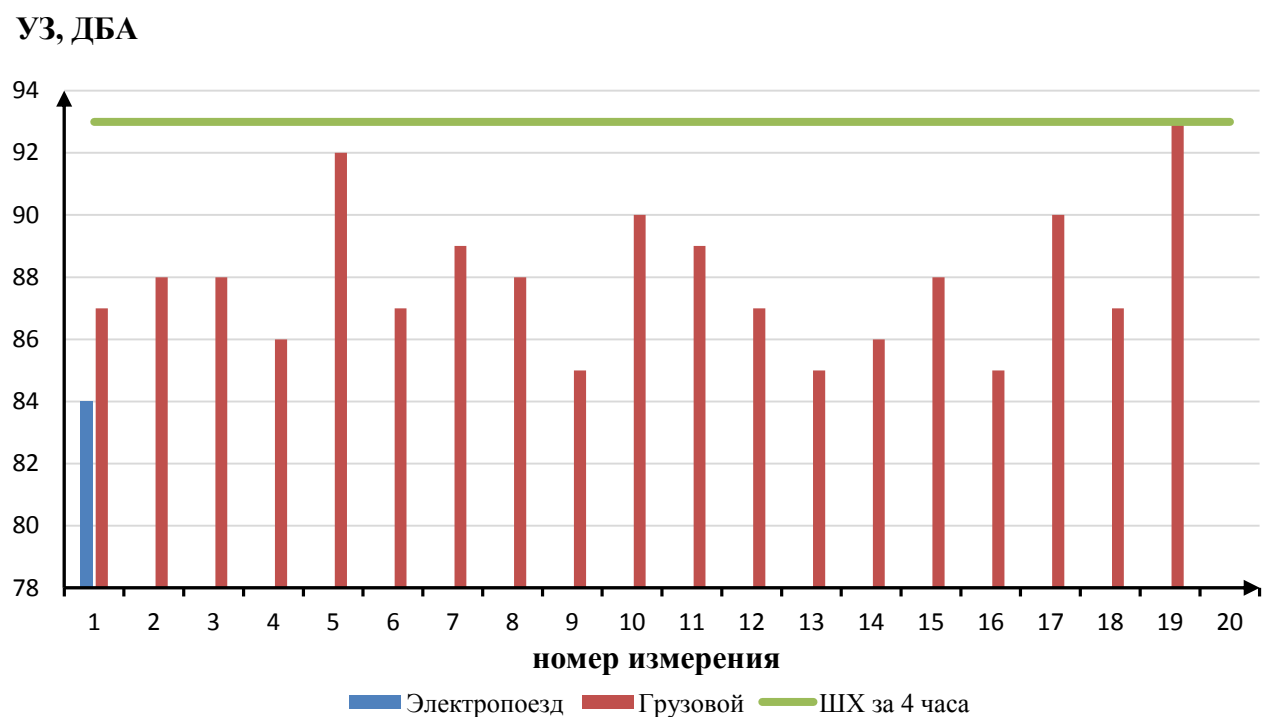


Рисунок 2.17 – Измеренные максимальные уровни звука за время проезда поездов различных категорий в ночное время суток

Шумовые характеристики железной дороги зависят от типа поездов, скорости движения, интенсивности, длины поездов (при определении эквивалентных уровней звука), типа пути, кривизны участка, наличия на рассматриваемых участках искусственных сооружений (мостов). Так, за время проезда поезда эквивалентные уровни звука в зависимости от скорости, категории и длины подвижного состава, можно в общем случае представить диапазонами для электропоездов – 78–86 дБА, грузовых поездов – 81–86 дБА, пассажирских поездов – 78–87 дБА, высокоскоростных поездов (при скорости движения до 250 км/ч) – 78–85 дБА. Эквивалентный уровень звука за дневной период времени (равно, как и за часовой) зависит от интенсивности движения и состава железнодорожного потока и, как правило, на умеренно загруженных железных дорогах составляет 60–75 дБА.

Максимальные уровни звука за время проезда поезда мимо точки наблюдения в самом общем виде для электропоездов составляют 83–90 дБА, грузовых поездов – 86–90 дБА, пассажирских поездов – 83–91 дБА, высокоскоростных поездов (при скорости движения до 250 км/ч) – 80–87 дБА.

2.3.4 Технологическое оборудование

Промышленные зоны также вносят вклад в общее акустическое загрязнение городов. Селитебная территория, располагающаяся вблизи производственных предприятий, заводов, отдельных цехов и сборочных площадок подвергается не только воздействию со стороны физических факторов, но и химических, биологических.

Для оценки уровней звука от промышленных предприятий в натурных условиях были проведены измерения на прилегающих к ним селитебных территориях на расстоянии от 7,5 до 200 м. Данные некоторых измерений приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Измеренные УЗД и УЗ от работы стационарных ИШ в близрасположенной жилой застройке

Источник шума	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Дизель-генераторная установка	75	80	73	70	68	67	65	60	73
Блок кондиционеров	72	78	70	71	73	76	60	58	79
Чиллер	70	61	60	65	63	59	55	49	67
Трансформаторная подстанция	72	82	70	71	75	78	65	60	80
Вентиляционная установка	70	68	60	58	63	57	50	45	65

Получены превышения эквивалентных УЗ на 10-25дБА.

2.4 Акустическая эффективность транспортных шумозащитных экранов

2.4.1 Общие положения

Акустическая эффективность ШЭ, это разница между УЗ (УЗД) в точке наблюдения без ШЭ ($L_{PT}^{\delta/\varepsilon}$) и с ШЭ ($L_{PT}^{c/\varepsilon}$), определяемая по формуле:

$$\Delta L_{\text{экp}} = L_{PT}^{\delta/\varepsilon} - L_{PT}^{c/\varepsilon}, \text{ дБ (дБА)}, \quad (2.9)$$

На акустическую эффективность ШЭ влияют:

- высота и длина ШЭ;
- расстояние от ИШ до ШЭ и (или) от ШЭ до РТ;
- звукопоглощающие или отражающие свойства опорной поверхности;
- угол дифракции ШЭ;
- звукопоглощающие (или отражающие) свойства ШЭ;
- звукоизоляция ШЭ;
- спектральная характеристика ИШ.

За несколько лет автором было обследовано более 100 технологических и транспортных шумозащитных экранов, установленных в Российской Федерации. Основные результаты изложены ниже.

2.4.2 Транспортные шумозащитные экраны вдоль автомобильных дорог

Было исследовано 40 шумозащитных экранов, расположенных вдоль автомобильных дорог Российской Федерации.

На рисунках 2.18–2.22 графически представлены результаты измерений эффективности шумозащитных экранов высотой от 1 до 7 м. Наиболее часто встречающимися были ШЭ высотой 3,5–4,0 м, которые составили 40% всех обследуемых ШЭ.

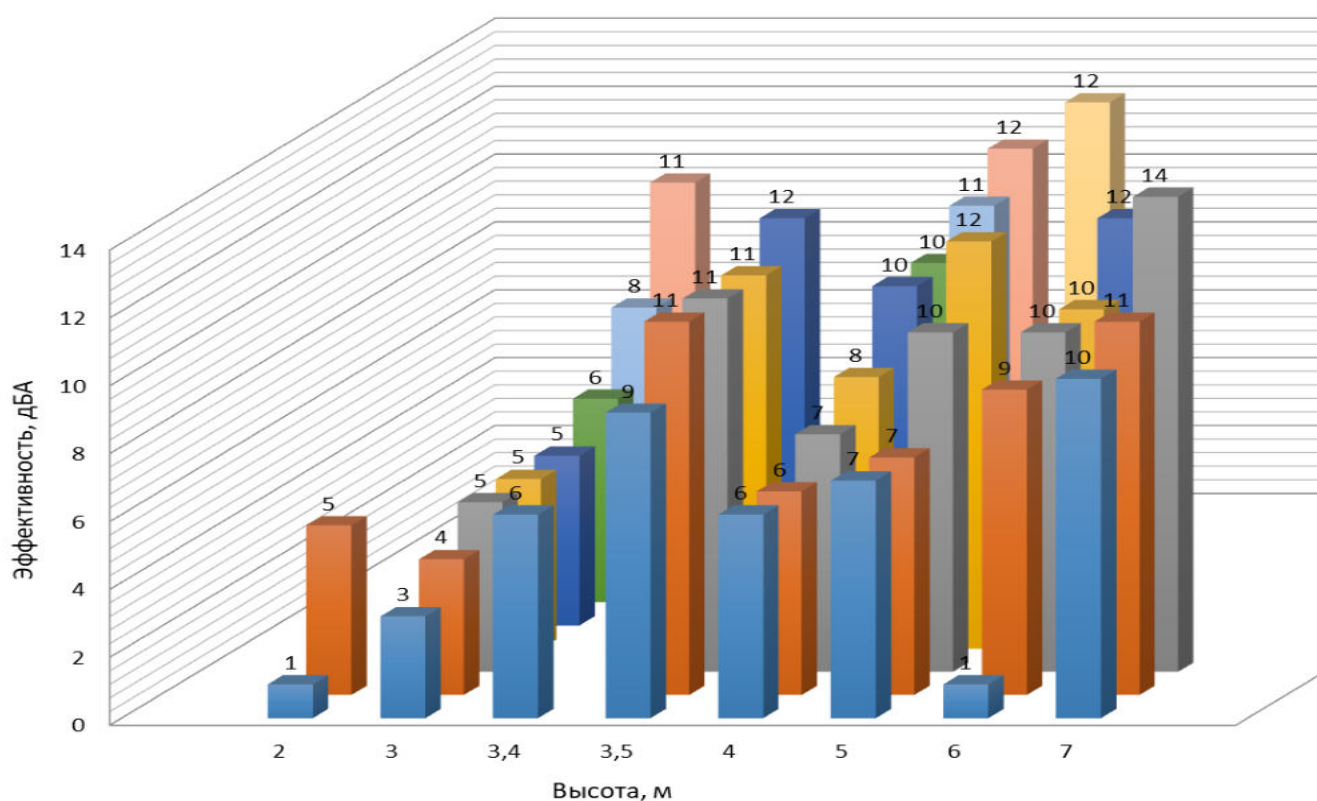


Рисунок 2.18 – Результаты измерений эффективности ШЭ в зависимости от высоты

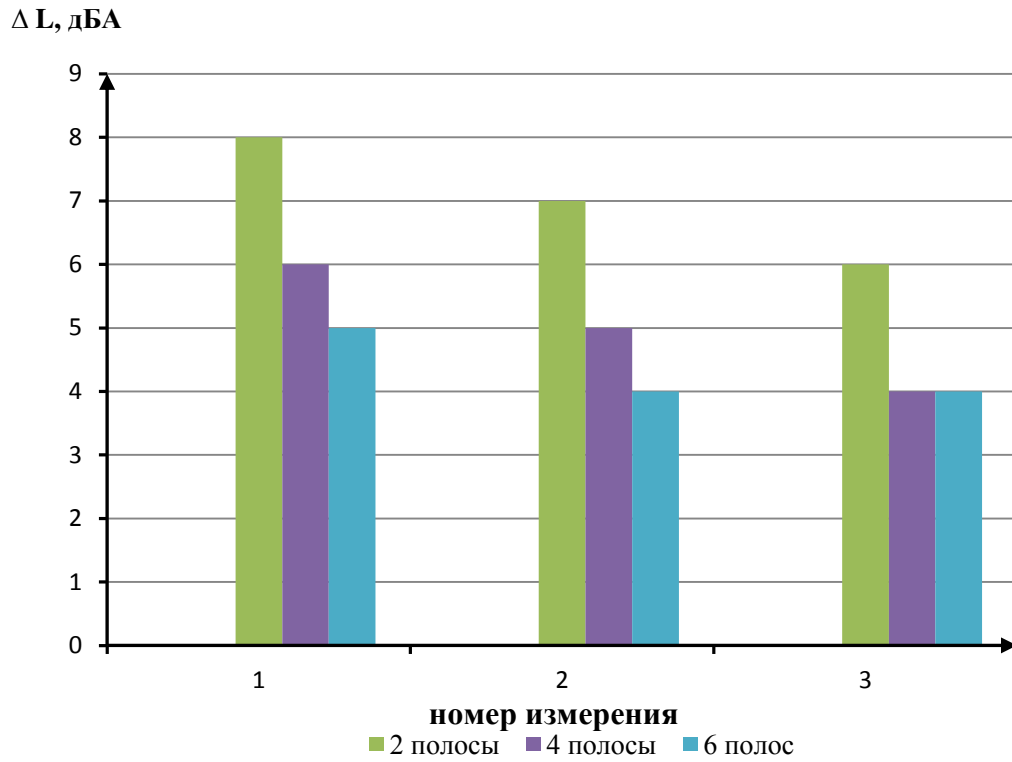


Рисунок 2.19 – Эффективность ШЭ высотой 3 м при разном количестве полос автомобильных дорог

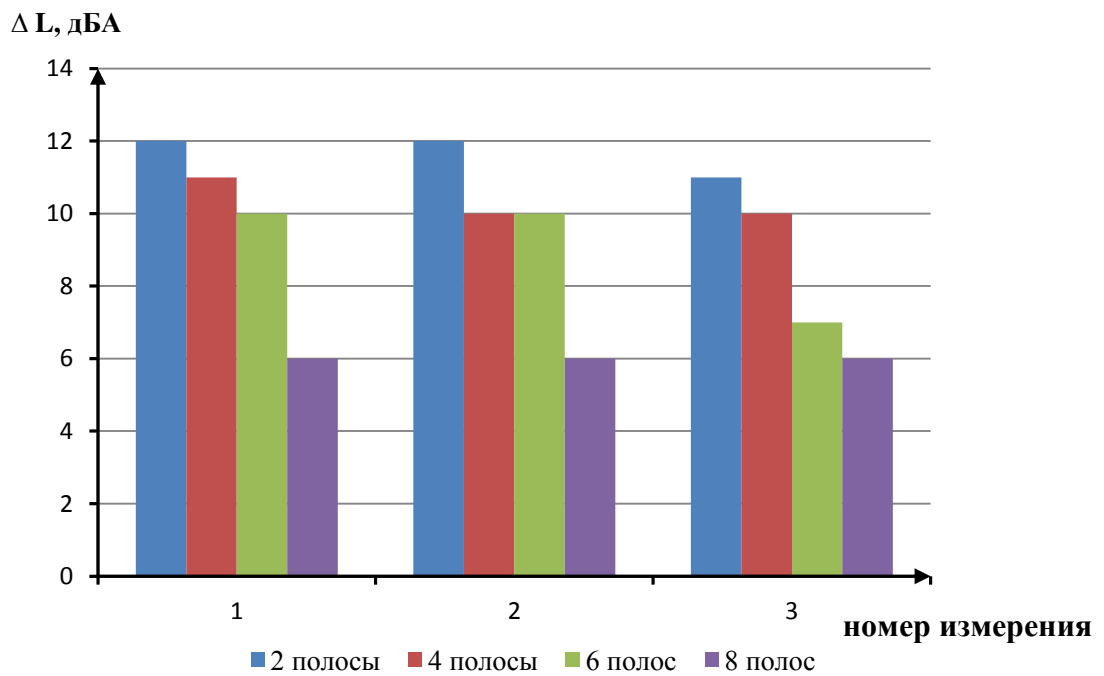


Рисунок 2.20 – Эффективность ШЭ высотой 4 м при разном количестве полос автомобильных дорог

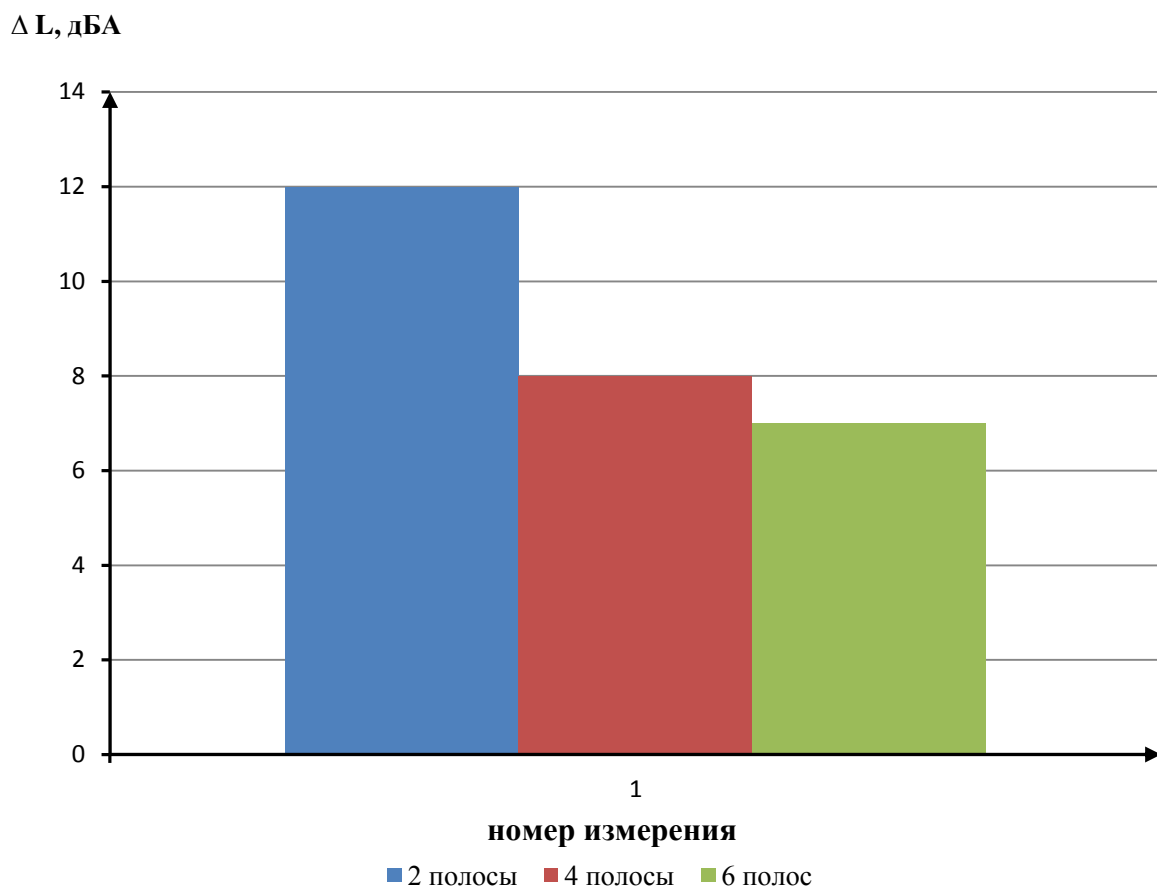


Рисунок 2.21 – Эффективность ШЭ высотой 5 м при разном количестве полос автомобильных дорог

На практике не просматривается строгая зависимость акустической эффективности ШЭ от высоты. Это связано как с недостатками проектирования (например, недостаточная длина экрана или неудачное его расположение), так и с ошибками при монтаже. В среднем эффективность ШЭ на дорогах РФ составляет 5–12 дБА.

Аномальное значение низкой эффективности в 1 дБА шумозащитного экрана высотой 6 м связаны с некачественным его исполнением и недостаточной протяженностью.

Следует также отметить, что эффективность ШЭ зависит от количества полос автомобильной дороги. На рисунках 2.19–2.21 показаны сравнительные эффективности ШЭ одной и той же высоты при различной ширине

автомобильных дорог. Как видно из рисунков 2.19–2.21, при возрастании количества полос с 2 до 4 эффективность ШЭ уменьшается на 3–5 дБА, при дальнейшем увеличении количества полос до 6 или 8 эффективность ШЭ меняется в среднем на 1 дБА.

Дополнительно был проведен анализ сравнения фактически измеренной эффективности ШЭ с расчетной, определенной по методу Д. Маекава, основанной на дифракционной теории Френеля–Кирхгофа.

Ориентировочный расчет выполнялся для самой ближней и самой дальней полос движения автомобильных дорог с допущениями, что ШЭ является полубесконечным, звуконепроницаемым и расположен в свободном пространстве, а источник звука (автомобильная дорога) является ненаправленным ИШ, по формулам:

$$\Delta L_{1/2} = 10 \lg(20N), \text{ дБ} \quad (2.10)$$

$$N = \delta \frac{2}{\lambda}, \delta = A + B - d, \quad (2.11)$$

где N – число Френеля, представляющее зависимость между разностью хода звуковых лучей (δ) и длиной волны (λ); расстояния A (от источника шума до верхней кромки экрана), B (от расчетной точки до верхней кромки экрана) и d (от источника шума до расчетной точки) (согласно рисунку 1.25).

Как видно на рисунке 2.22, фактическая эффективность ШЭ в 89% случаев ниже расчетной для ближней полосы движения, и в 45% – для дальней полосы движения. Основная причина – недостатки методов расчетов, которые должны быть усовершенствованы, также причинами могут служить выбранная недостаточная протяженность ШЭ или его некачественное исполнение и монтаж.

Можно выделить основные группы ошибок проектирования и монтажа, существенно влияющих на эффективность шумозащитного экрана:

- незаполненный зазор в местах устройства ступеней фундамента (наличие брешей) (рисунок 2.23);
- необоснованные разрывы (рисунок 2.24);

- щели между акустическими панелями и фундаментом (поверхностью земли) (рисунок 2.25);
- устройство водоотводных лотков сквозь фундамент экрана с нарушением его целостности (наличие брешей) (рисунок 2.26);
- разрывы, не удовлетворяющие требованиям нормативных документов в области устройства шумозащитных экранов (рисунок 2.27);
недостаточная длина ШЭ (рисунок 2.28).

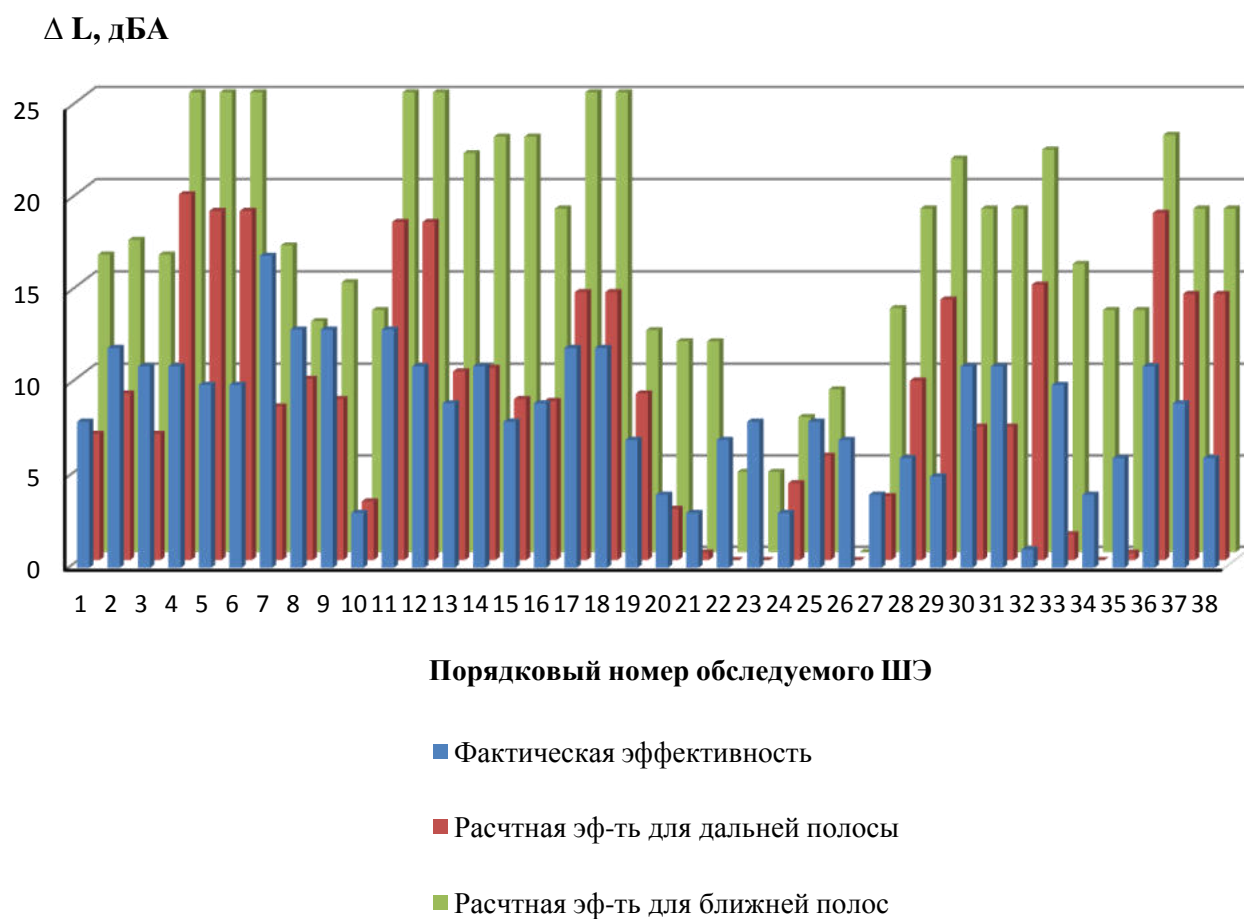


Рисунок 2.22 – Сравнение расчетной и фактической эффективностей ШЭ



д. Ивашево



с. Эстосадок



д. Ложки



д. Бузланово

Рисунок 2.23 – Незаполненный зазор в местах устройства ступеней фундамента (наличие брешей)

М-9 "Балтия"

ШСЗ №16

$l=660 \text{ м}$

$h=3-8 \text{ м}$

www.mnodels.com

ШЭ №16
l=660 м,
h=3-8 м

Рисунок 2.24 – Необоснованные разрывы в ШЭ



Рисунок п. Новоселье



д. Тереси



д. Жилино



д. Калмыково

Рисунок 2.25 – Щели между акустическими панелями и фундаментом



с/о Стрелковский



д. Калмыково

Рисунок 2.26 – Образование проемов при организации водоотвода



СНТ «Флора-2»



г. Мытищи

Рисунок 2.27 – Разрывы, не удовлетворяющие требованиям нормативных документов в области устройства шумозащитных экранов



с/о Стрелковский



д. Калмыково



д. Ложки



д. Жилино

Рисунок 2.28 – Недостаточная длина ШЭ

По результатам обследования 40 шумозащитных экранов, установленных вдоль автомобильных дорог, было выявлено, что на стадии проектирования чаще всего ошибки допускаются при определении необходимой длины ШЭ. Высота экрана, больше чем в половине случаев рассчитана и подобрана правильно, однако, в связи с плохим качеством исполнения ШЭ и неправильным монтажом конструкций в 62% не обеспечивает заданных значений. Диаграммы соответствия параметров ШЭ требованиям нормативных документов представлены на рисунке 2.29

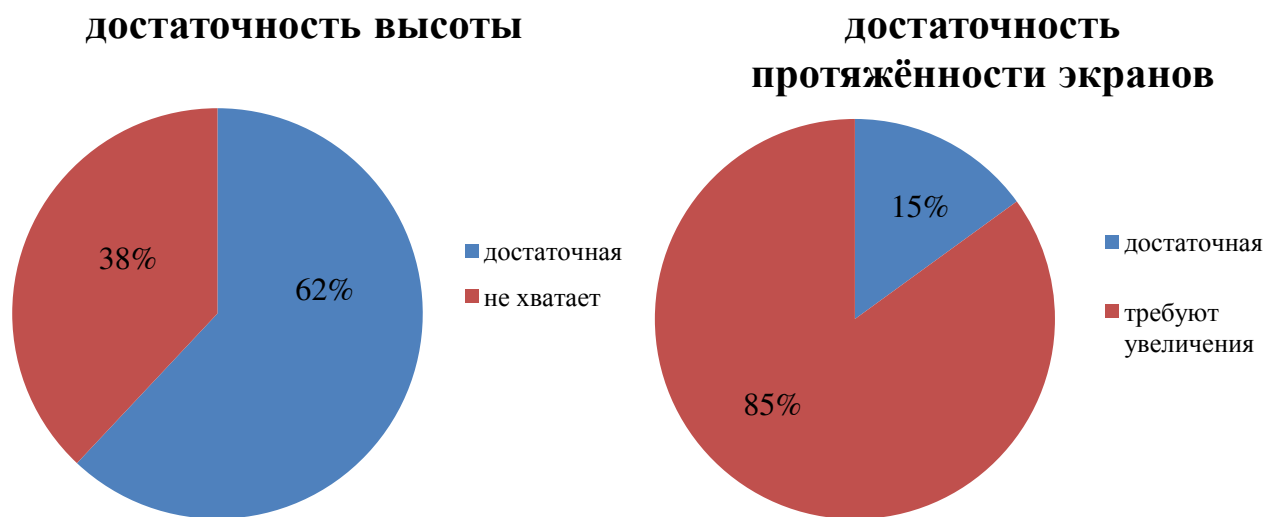


Рисунок 2.29 – Диаграммы соответствия параметров ШЭ нормативным документам

Неудовлетворительное проектирование, неправильная установка и монтаж ШЭ связаны с недостатками действующей нормативной документации, в частности ОДМ 218.2.013–2011 «Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам» [232], который должен быть откорректирован, а требования к ШЭ ужесточены.

В ходе проведения натурных обследований был также выполнен анализ влияния формы и материала экрана на его эффективность. Сравнительная характеристика средней эффективности ШЭ представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Сравнительная характеристика средней эффективности ШЭ

Материал ШЭ	Форма ШЭ	Высота ШЭ, м	Количество полос, шт.	Количество ШЭ, шт.	Средняя эффективность, дБА
Металл	вертикальный	1	6	3	8,6
		2	2	1	5
		3	2	1	6
			4	2	4,5
			6	2	5
		3,4	2	1	6
		3,5	4	3	10,6
		4	4	1	6
			6	3	9,6
			8	1	10
		5	6	1	7
		6	2	1	1
			8	2	11,5
	Г-образный	3	4	1	8
		4	6	1	12
			8	1	7
		4,3	6	2	9,5
		4,5	6	1	8
	вертикальный с коленообразной верхней частью	3,5	4	3	11
		7	10	1	14
Металл и поликарбонат	вертикальный	2	2	1	1
		5	4	1	7
		7	8	1	10
	Г-образный	3	4	1	3
	вертикальный с коленообразной верхней частью	7	10	1	14

Продолжение таблицы 2.3

Материал ШЭ	Форма ШЭ	Высота ШЭ, м	Количество полос, шт.	Количество ШЭ, шт.	Средняя эффективность, дБА
Дерево и закаленное стекло	вертикальный	4	2	2	10
		5	2	1	12

Сравнивая экраны одной высоты и одинаковых параметров автомобильной дороги (количества полос) вертикальные и Г-образные можно сделать вывод, что у Г-образных и вертикальных с шарообразной верхней частью экранов эффективность в среднем на 2–3 дБА выше, чем у вертикальных, независимо от материала изготовления экрана.

Эффективности металлических экранов и комбинированных металлических с поликарбонатом в среднем равны. Небольшое преимущество в 1–2 дБА наблюдается у металлических экранов, что может быть связано с некачественным негерметичным исполнением экранов с поликарбонатом.

Деревянные экраны более эффективны, что объясняется большим звукопоглощением, целостностью конструкции (высота панелей до 2м), высокой стойкостью обработанной (импрегнированной) древесины к агрессивному воздействию окружающей среды по отношению к экранам из оцинкованной стали, которые быстро подвергаются гниению и теряют свои свойства спустя 5–7 лет.

2.4.3 Транспортные шумозащитные экраны вдоль железных дорог

В рамках настоящей работы было исследовано 10 шумозащитных экранов, расположенных вдоль железных дорог Российской Федерации.

Были исследованы ШЭ из оцинкованной стали и ШЭ выполненные по технологии «Дюрисол», основным материалом которого является композитная

смесь, состоящая из древесной щепы, скрепленной портландцементом и минеральными добавками.

Эффективность ШЭ определялась для ближнего (I) и дальнего (II) путей при движении поездов различных категорий: грузовых, скоростных, электропоездов.

Результаты измерения эффективности ШЭ типа «Дюрисол» высотой 4 м представлены на графиках с рисунками 2.30– 2.31.

УЗД, дБ

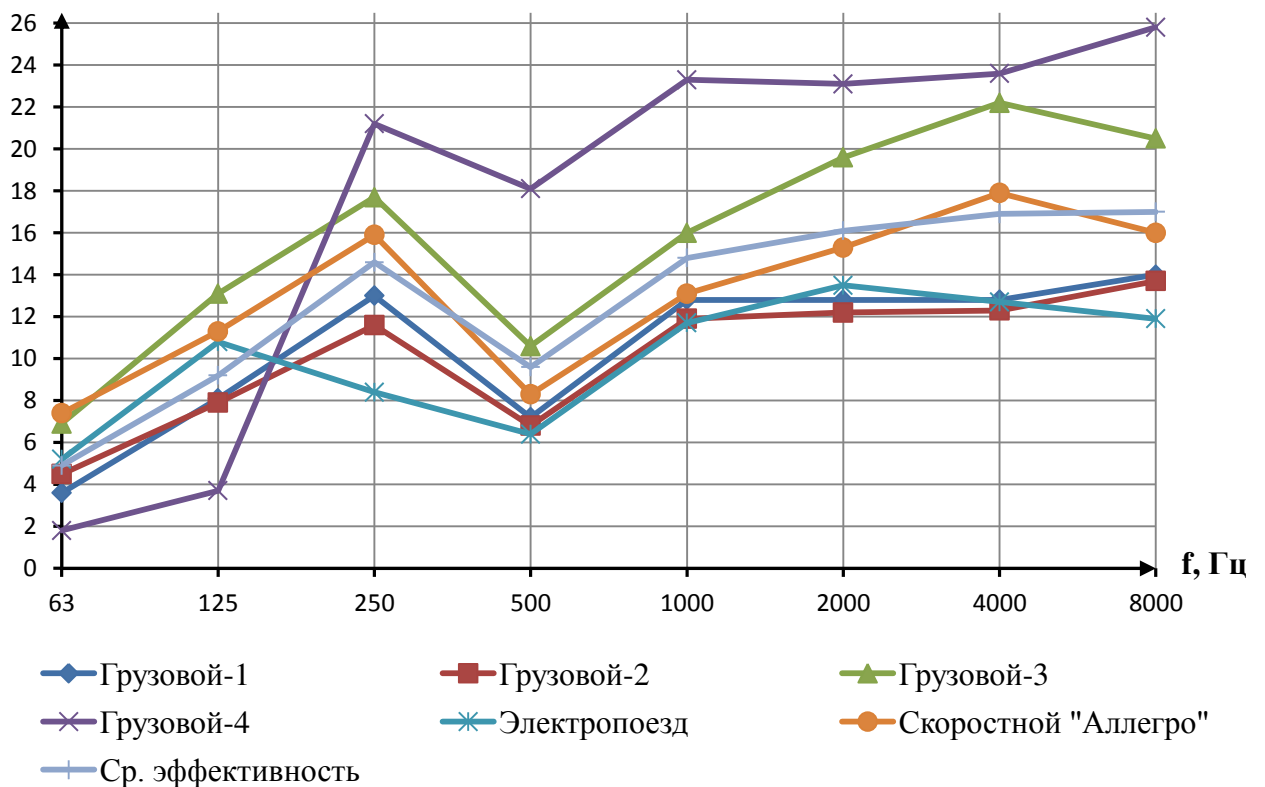


Рисунок 2.30 – Эффективность ШЭ, измеренная при проезде различных категорий поездов для ближнего пути

Согласно проведенным измерениям зависимость между эффективностью ШЭ и категорией поездов не прослеживается и для ближнего пути составляет в среднем 2–13 дБ для низких частот, 9–23 дБ – для средних частот, и 12–26 дБ для высоких частот (рисунок 2.31).

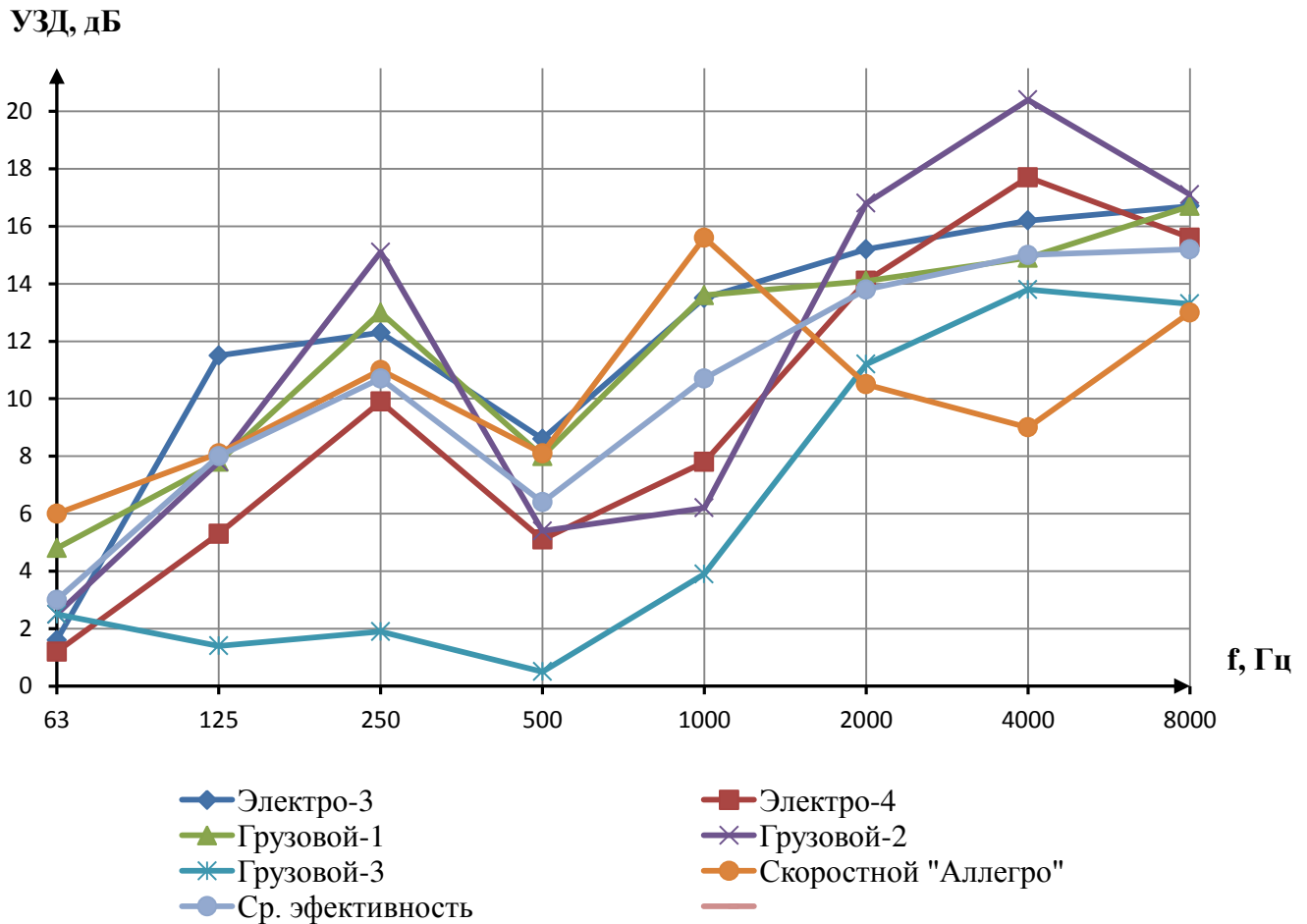


Рисунок 2.31 – Эффективность ШЭ, измеренная при проезде различных категорий поездов для дальнего пути

Для дальнего пути эффективность шумозащитного экрана «Дюрисол» составляет в среднем 1–11 дБ на низких частот, 2–16 дБ – для средних частот, и 10–20 дБ на высоких частотах (рисунок 2.31).

Таким образом, анализируя и сравнивая между собой графики 2.30–2.31 видно, что эффективность ШЭ для ближнего пути выше, чем для дальнего пути, на низких частотах в среднем на 2 дБ, на средних – до 7 дБ, на высоких – до 6 дБ.

Графическое отображение сравнения графиков усредненной эффективности ближнего и дальнего путей представлено на рисунке 2.32.

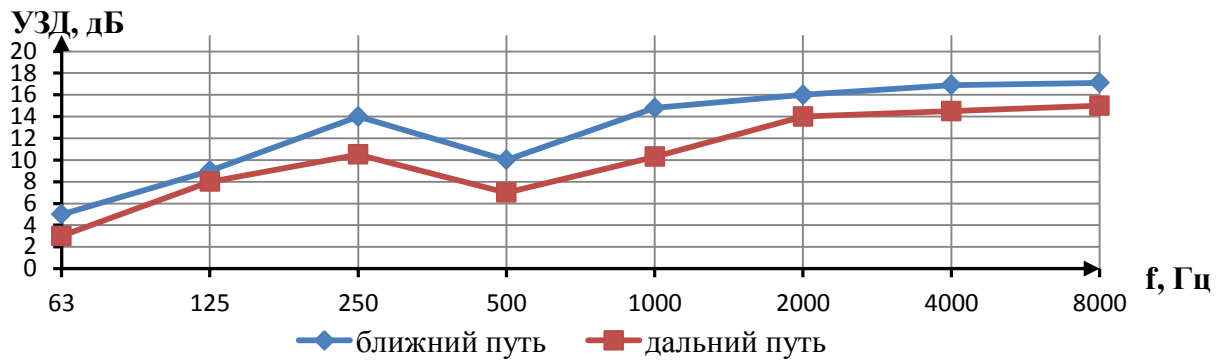


Рисунок 2.32 – Сравнение усредненной эффективности ШЭ «Дюрисол» для ближнего и дальнего пути

Выполненными испытаниями в соответствии с требованиями [308] было определено, что установленные акустические экраны высотой 4 м изготовленные по технологии DURISOL в среднем имеют акустическую эффективность 12–14 дБА.

При проведении комплексного анализа также были исследованы шумозащитные экраны из оцинкованной стали высотой 3 м, 3,5 м, 5 м из оцинкованной стали.

Результаты измерения эффективности ШЭ высотой 5 м представлены на графиках 2.33– 2.34.

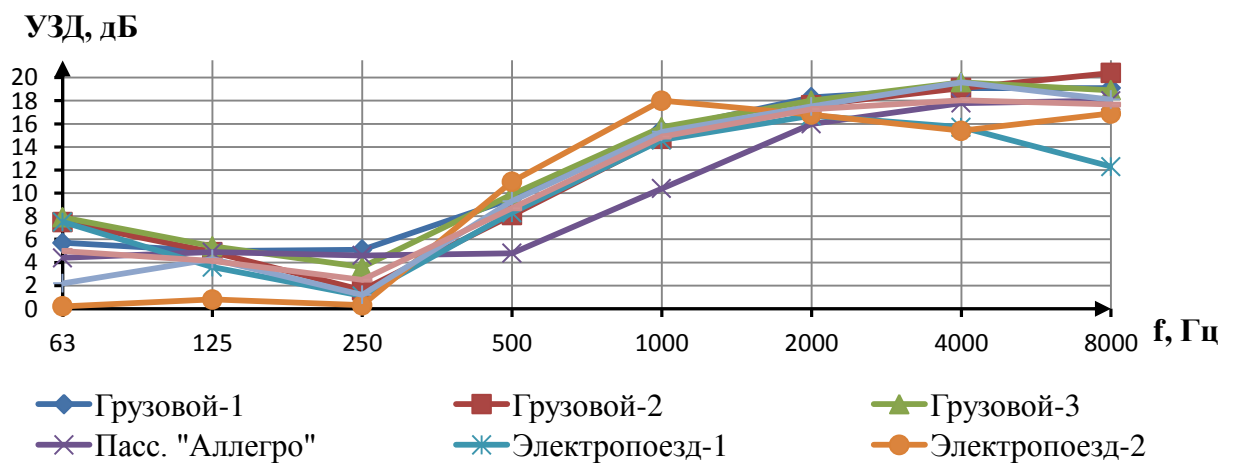


Рисунок 2.33 – Эффективность ШЭ, измеренная при проезде различных категорий поездов для ближнего пути

Эффективность ШЭ для ближнего пути составляет в среднем 1–8 дБ на низких частотах, 5–10 дБ – на средних частотах, и 10–20 дБ на высоких частотах.

Для дальнего пути эффективность шумозащитного экрана составляет в среднем 1–10 дБ на низких частотах, 3–13 дБ – на средних частотах, и 10–20 дБ на высоких частотах (рисунок 2.34).

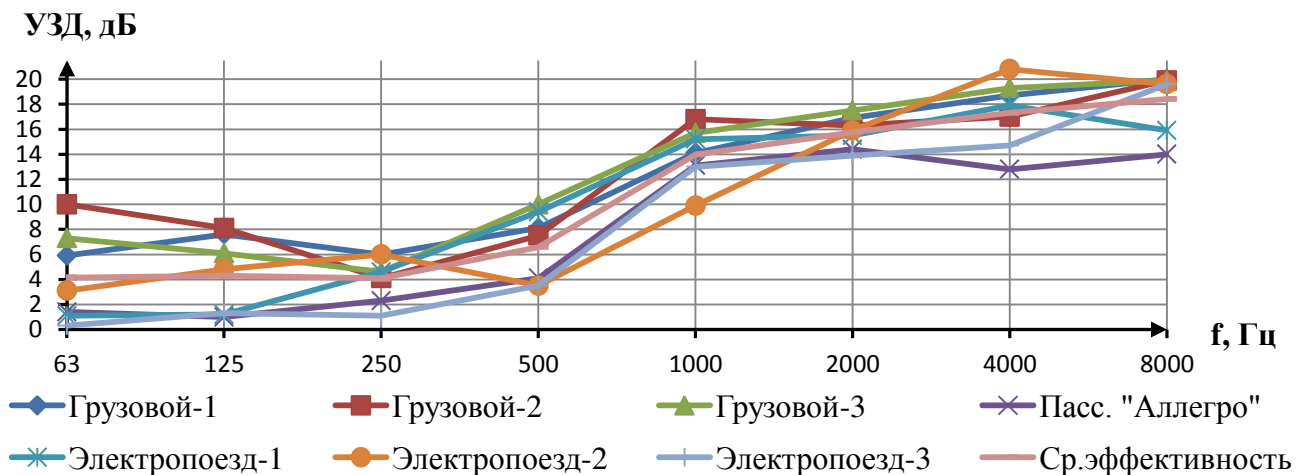


Рисунок 2.34 – Эффективность ШЭ, измеренная при проезде различных категорий поездов для дальнего пути

Таким образом, анализируя и сравнивая между собой графики 2.33-2.34 видно, что эффективность ШЭ для ближнего пути выше, чем для дальнего пути, на низких частотах в среднем на 2 дБ, на средних – до 3 дБ, на высоких – 1–2 дБ. Графическое отображение сравнения графиков усредненной эффективности ближнего и дальнего путей представлено на рисунке 2.35.

Было исследовано 6 экранов высотой 3 м и протяженностью 21 м, 84 м, 219 м, 237 м, 310 м, 527 м. Результаты измерения эффективности ШЭ высотой 3 м представлены на рисунках 2.35– 2.36.

Согласно проведенным измерениям эффективность ШЭ для ближнего пути составляет в среднем 1–15 дБ на низких частотах, 2–18 дБ – на средних частотах, и 9–20 дБ на высоких частотах.

Для дальнего пути эффективность шумозащитного экрана составляет в среднем 2–12 дБ на низких частотах, 9–19 дБ – на средних частотах, и 8–29 дБ на высоких частотах (рисунок 2.36).

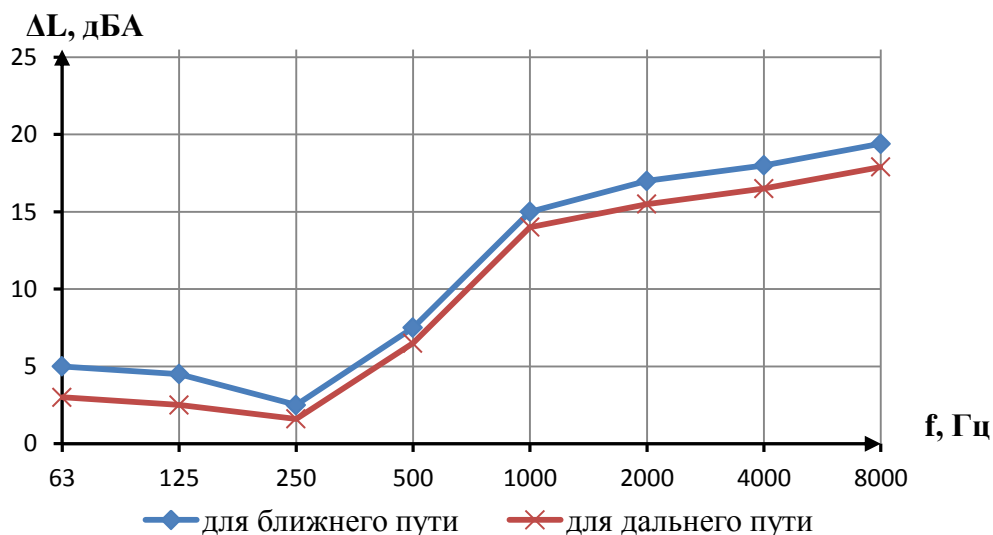


Рисунок 2.35 – Сравнение усредненной эффективности ШЭ высотой 5 м для ближнего и дальнего пути

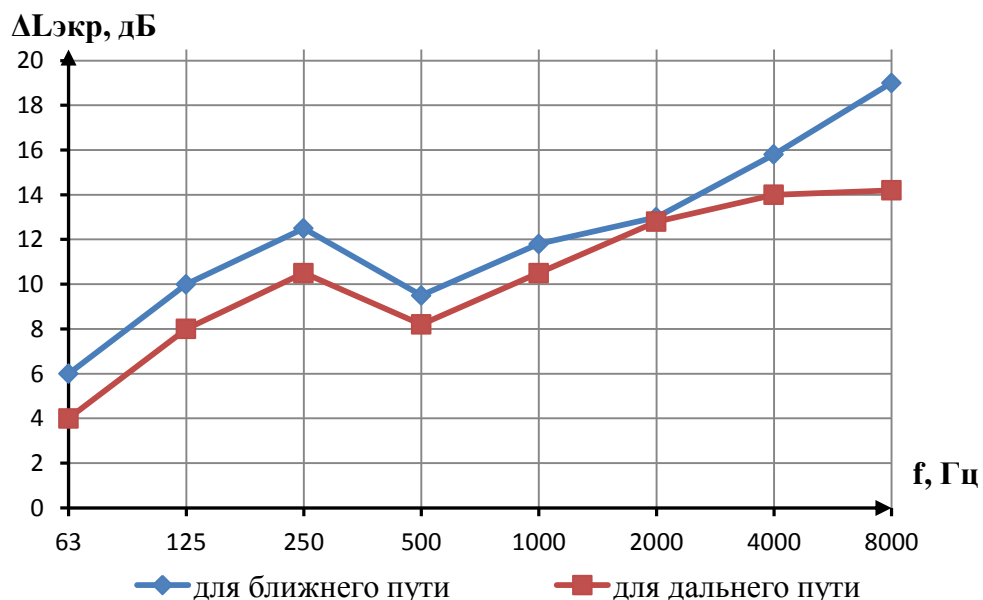


Рисунок 2.36 – Сравнение усредненной эффективности ШЭ высотой 3 м для ближнего и дальнего пути

Таким образом, анализируя и сравнивая между собой рисунки 2.31–2.35 видно, что эффективность ШЭ для ближнего пути выше, чем для дальнего пути, на низких частотах в среднем на 3 дБ, на средних – на 1–2 дБ, на высоких – до 5 дБ. Графическое отображение сравнения графиков усредненной эффективности ближнего и дальнего путей представлено на рисунке 2.36.

Было исследовано 2 экрана высотой 3,5 м и 3,6 м и протяженностью 114 м и 120 м. Результаты измерения эффективности ШЭ высотой 3 м представлены на графиках 2.37–2.38.

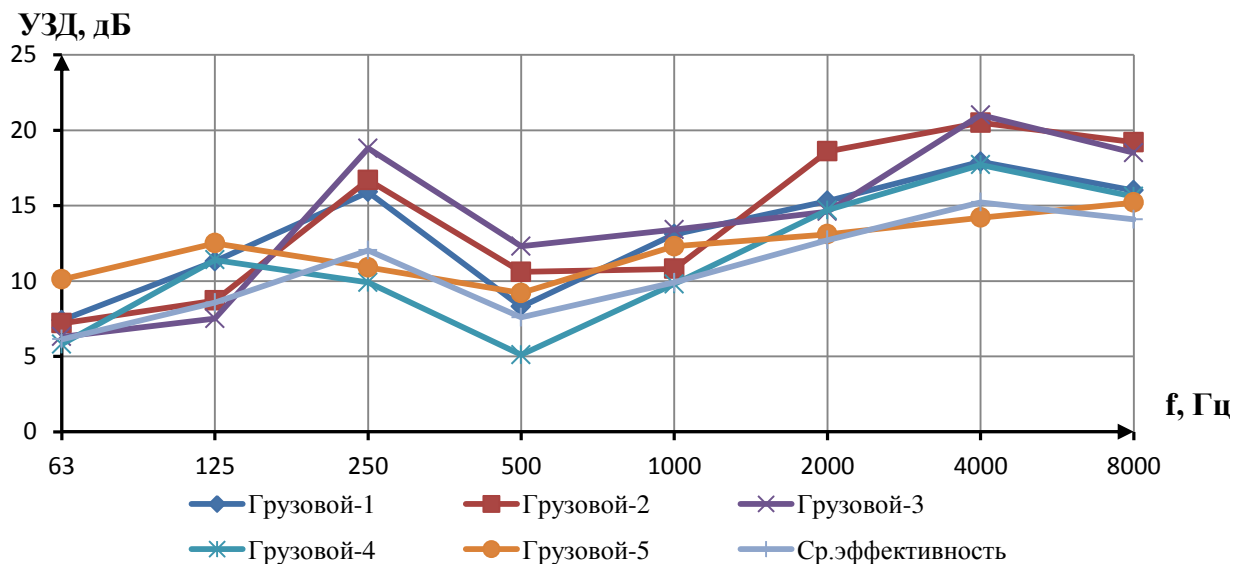


Рисунок 2.37 – Эффективность ШЭ, измеренная при проезде различных категорий поездов для ближнего пути

Согласно проведенным измерениям эффективность ШЭ для ближнего пути составляет в среднем 5–12 дБ на низких частотах, 4–14 дБ – на средних частотах, и 8–21 дБ на высоких частотах (рисунок 2.37).

Для дальнего пути эффективность шумозащитного экрана составляет в среднем 1–12 дБ на низких частотах, 3–14 дБ – на средних частотах, и 9–17 дБ на высоких частотах.

Таким образом, анализируя и сравнивая между собой графики (рисунки 2.36–2.37) видно, что эффективность ШЭ для ближнего пути выше, чем для дальнего пути, на низких частотах в среднем на 3 дБ, на средних – до 2 дБ, на высоких – до 4 дБ. Графическое отображение сравнения графиков усредненной эффективности ближнего и дальнего путей представлено на рисунке 2.38.

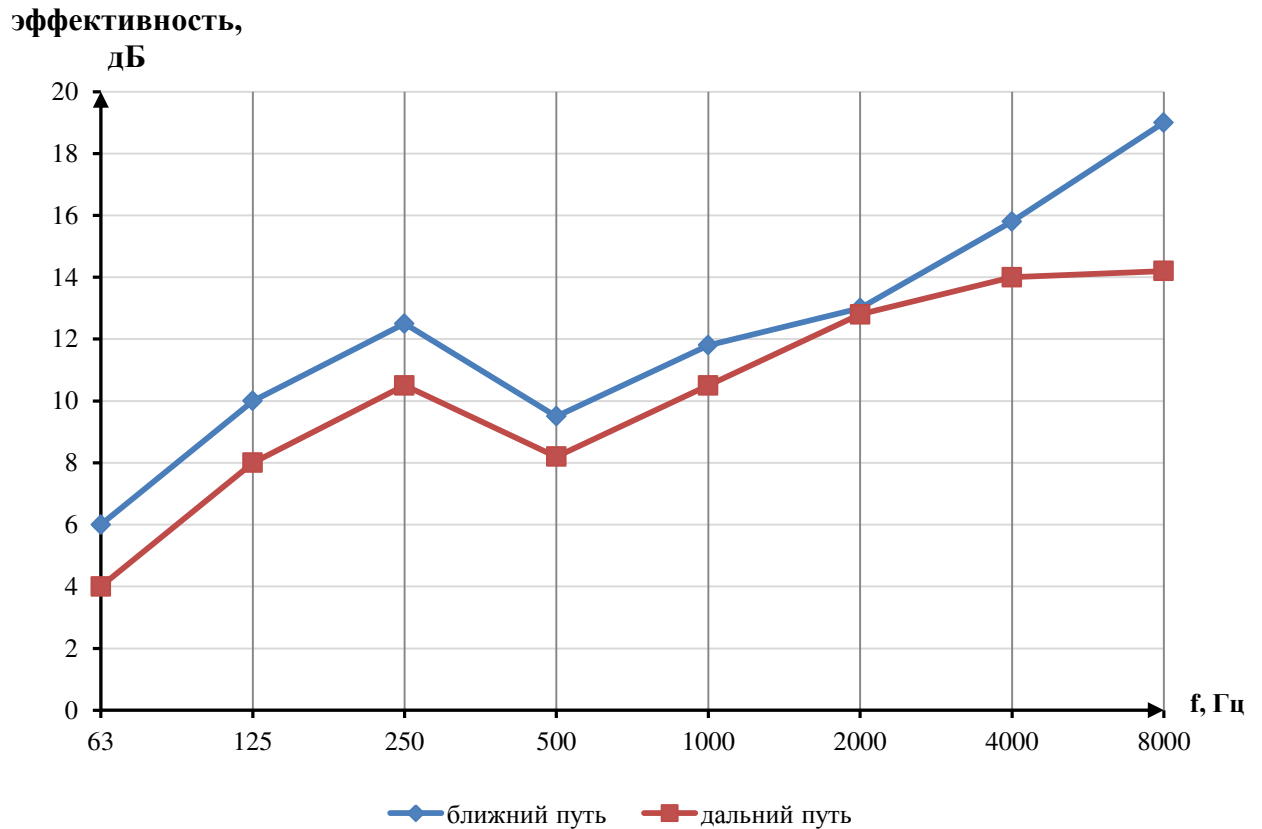


Рисунок 2.38 – Сравнение усредненной эффективности ШЭ высотой 3,5 м для ближнего и дальнего пути

На рис. 2.39–2.40 представлены графики средней эффективности ШЭ из оцинкованной стали различной высоты для I (ближнего) и II (дальнего) пути.

Выполненными испытаниями в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51943–2002 «Экраны акустические для защиты от шума транспорта. Методы экспериментальной оценки эффективности» было установлено, что

установленные ШЭ с панелями из оцинкованной стали высотой 3–4 м в среднем имеют акустическую эффективность 11–13 дБА, высотой 5 м – 14–16 дБА.

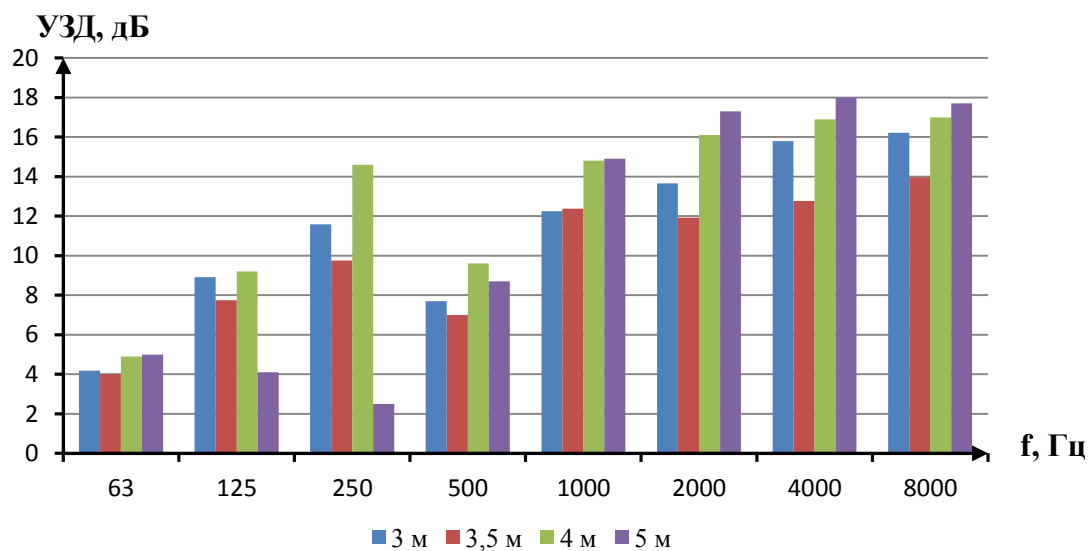


Рисунок 2.39 – Сравнение усредненной эффективности ШЭ из оцинкованной стали различной высоты для ближнего пути

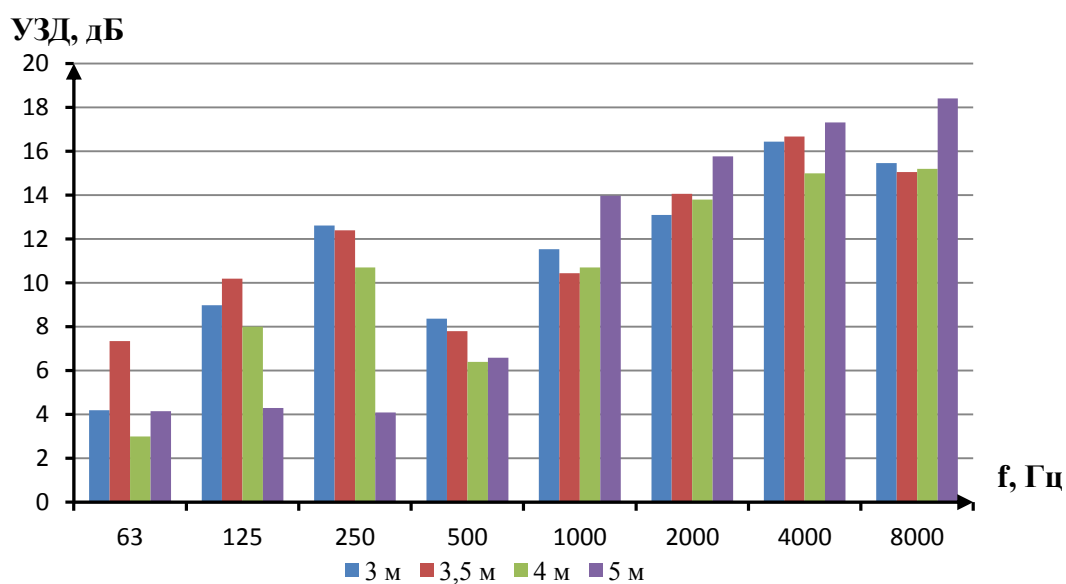


Рисунок 2.40 – Сравнение усредненной эффективности ШЭ из оцинкованной стали различной высоты для дальнего пути

Эффективность металлических экранов, установленных вдоль железных дорог выше, в связи с меньшими агрессивными воздействиями окружающей среды, по сравнению с экранами вдоль автомобильных дорог.

Более того, технические требования и методы контроля к шумозащитным экранам, устанавливаемым вдоль железных дорог, регламентированы ГОСТ 33329–2015 и ГОСТ 33328–2015, подготовленные на базе ГОСТ Р 54931–2012 и ГОСТ Р 54932–2012, которые разрабатывались научным коллективом БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, в том числе, при непосредственном участии автора, что является причиной более высокого качества проектирования и исполнения шумозащитных экранов.

2.5 Акустические свойства шумозащитных экранов: звукоизоляция и звукопоглощение

2.5.1 Исследования звукоизолирующих свойств транспортных экранов

В основе проводимых экспериментов было принято допущение о том, что звукоизоляция ШЭ в натурных условиях существенно отличается от значений звукоизоляции акустических панелей того же ШЭ, полученных в акустической камере.

Были испытаны деревянные, металлические и комбинированные ШЭ высотой от 4 до 7 м, установленные вдоль автомобильных дорог в РФ. Измеренные значения звукоизоляции по каждому ШЭ приведены в Приложении А.

На рисунках 2.41–2.43 показаны усредненные значения звукоизоляции ШЭ в натурных условиях по сравнению с данными измерений звукоизоляции, полученными в акустических камерах различных производителей.

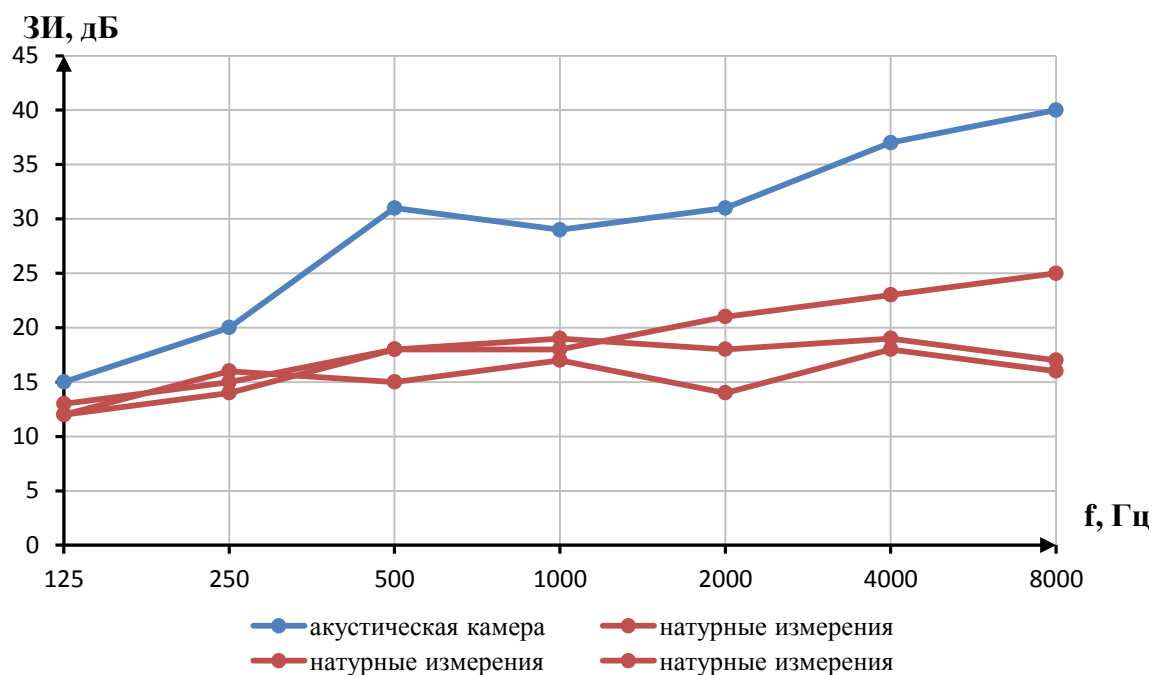


Рисунок 2.41 – Сравнение значений ЗИ деревянных ШЭ, измеренных в акустической камере и в натуральных условиях

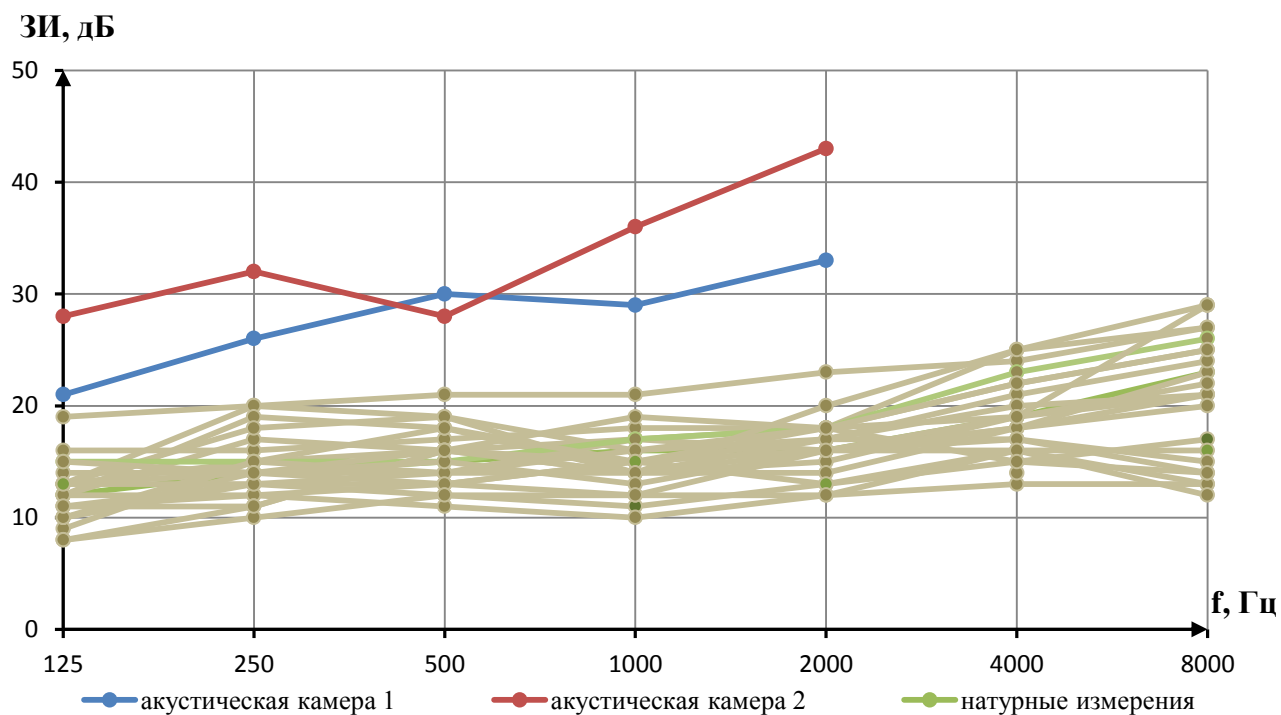


Рисунок 2.42 – Сравнение значений ЗИ металлических ШЭ из оцинкованной стали, измеренных в акустической камере и в натуральных условиях

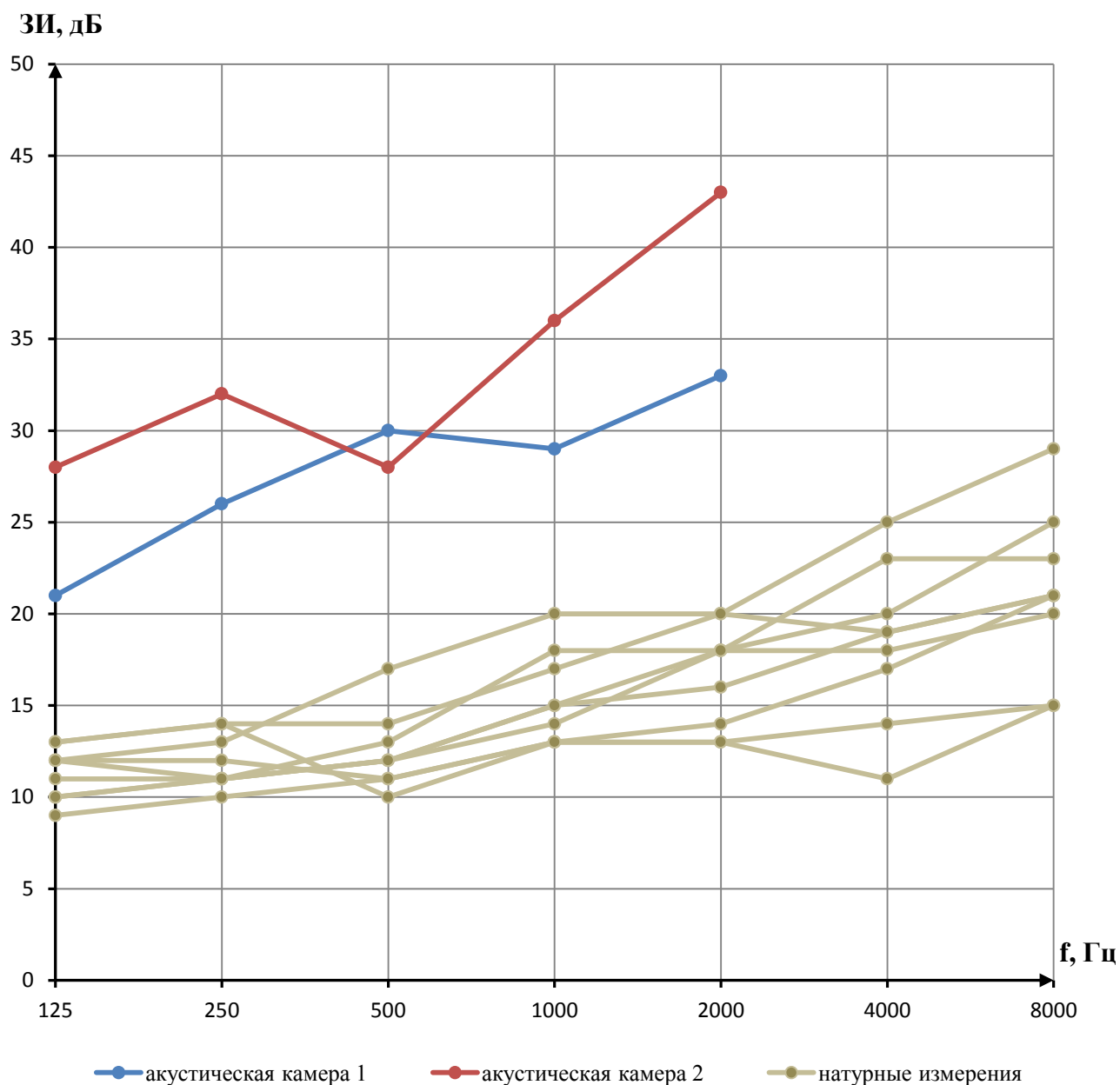


Рисунок 2.43 – Сравнение значений ЗИ комбинированных ШЭ из оцинкованной стали и поликарбоната, измеренных в акустической камере и в натуральных условиях

Данные звукоизоляции акустических панелей, по результатам измерений в акустических камерах были получены из технических условий и протоколов к сертификатам соответствия на ШЭ различных отечественных и зарубежных производителей. Следует отметить, что измерения звукоизоляции металлических экранов в камерах проводились в частотном диапазоне 125–2000 Гц, т.е.

на рисунках 2.42–2.43 отсутствуют значения в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63, 4000 Гц и 8000 Гц.

Сравнение звукоизоляции деревянных ШЭ показало, что их звукоизоляция в натуральных условиях в диапазоне 125–250 Гц ниже на 2–5 дБ, на частотах 500–2000 Гц – на 11–17 дБ, и на частотах 4000–8000 Гц – на 14–23 дБ, чем звукоизоляция, полученная в акустической камере (рисунок 2.41).

Сравнение звукоизоляции металлических ШЭ из оцинкованной стали показало, что их звукоизоляция в натуральных условиях в диапазоне 125–500 Гц ниже на 7–21 дБ, на частотах 1000–2000 Гц – на 8–31 дБ, чем звукоизоляция, полученная в акустической камере (рисунок 2.42).

Сравнение звукоизоляции комбинированных ШЭ из оцинкованной стали и поликарбоната показало, что их звукоизоляция в натуральных условиях в диапазоне 125–1000 Гц ниже на 8–22 дБ, на частоте 2000 Гц – на 13–30 дБ, чем звукоизоляция, полученная в акустической камере (рисунок 2.43).

Звукоизоляция металлических экранов, установленных вдоль автомобильных дорог, составила в натуральных условиях 11–22 дБА, металлических с поликарбонатом – 12–15 дБА (рисунок 2.44).

Анализ приведенных результатов позволяет утверждать, что полученные в экспериментах значения звукоизоляции для ШЭ в натуральных условиях в среднем составляют 15–18 дБА (68% измерений), предельные значения в 20–22 дБА достигнуты только в 12 % случаев. Таким образом, заявляемый производителем индекс ЗИ металлических ШЭ в 31–36 дБ является завышенным почти в 2 раза и в натуральных условиях абсолютно нереален.

Заявляемая ЗИ деревянных ШЭ как 34 дБА, также является недостижимой, т.к. в натуральных условиях в среднем составляет лишь 16–18 дБА.

Графики сравнения, измеренного в натуральных условиях и в акустической камере, индекса ЗИ для металлических экранов из оцинкованной стали, а также деревянных ШЭ представлены на рисунках 2.44–2.55. Низкая звукоизоляция ШЭ может заметно снижать их акустическую эффективность (рисунок 2.45).

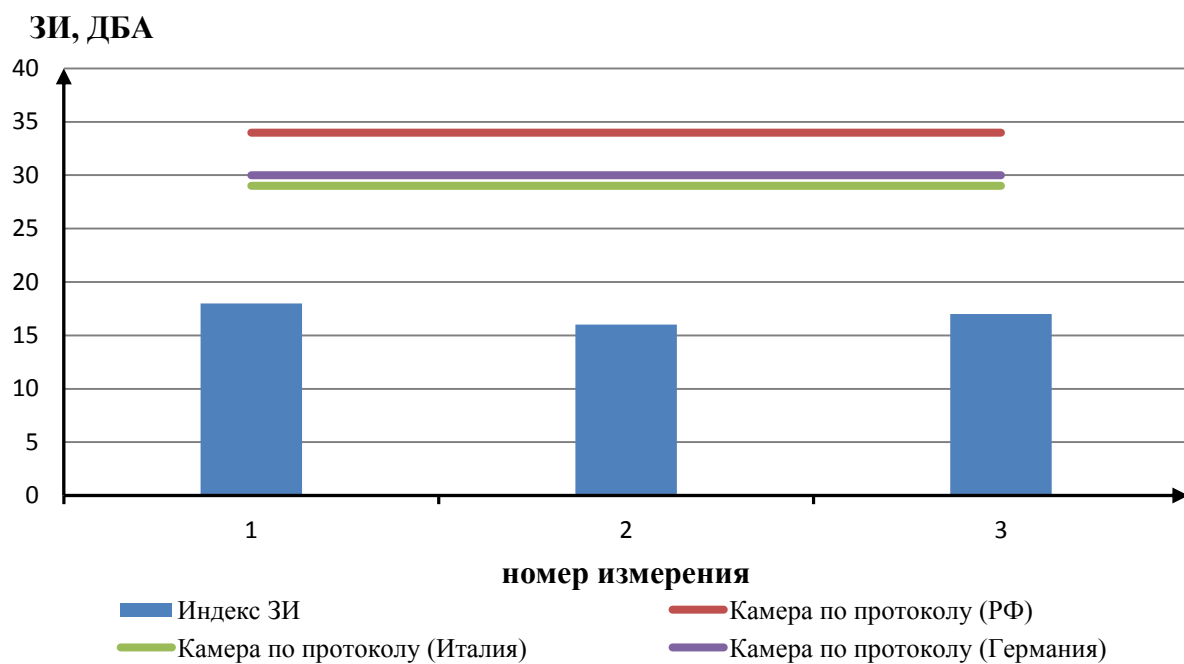


Рисунок 2.44 – Сравнение индекса звукоизоляции заявляемого производителями и полученных в результате натурных измерений деревянных экранов (комбинированных из дерева и закаленного стекла)



Рисунок 2.45 – Сравнение индекса звукоизоляции заявляемого производителем и полученных в результате натурных измерений металлических экранов (из оцинкованной стали)

Следует отметить, что при проектировании ШЭ высокой эффективности (свыше 16 дБА) недостаточная звукоизоляция будет сказываться на акустической эффективности ШЭ, уменьшая ее на 1–3 дБА, за счет прохождения звука прямым путем, т.е. через панели ШЭ. При еще больших заданных значениях акустической эффективности она может быть вообще не достигнута из-за описанного явления.

2.5.2 Исследования звукопоглощающих свойств транспортных экранов

Для исследования звукопоглощающих свойств были испытаны деревянные, металлические и комбинированные ШЭ высотой от 1 до 7 м, установленных вдоль автомобильных дорог РФ. Измеренные значения звукопоглощения по каждому ШЭ приведены в Приложении Б.



Рисунок 2.46 – Сравнение значений коэффициентов ЗП на частоте 500 Гц металлических ШЭ из оцинкованной стали, измеренных в акустической камере и в натуральных условиях



Рисунок 2.47 – Сравнение значений ЗП на частоте 1000 Гц металлических ШЭ из оцинкованной стали, измеренных в акустической камере и в натуральных условиях

Результаты измерений крайне противоречивы. В качестве примера можно рассмотреть данные измеренных значений коэффициента звукопоглощения ШЭ на двух частотах (рисунок 2.46 и 2.47). Разница в полученных значениях коэффициента звукопоглощения более чем вдвое. На рисунке 2.48 приведены сравнительные данные звукопоглощения двух экранов (условно «хорошего» и «плохого» по данным выполненных натуральных измерений). Разница в полученных коэффициентах звукопоглощения достигает 0,35–0,4. Это объясняется различным конструктивным исполнением элементов, обеспечивающих в ШЭ звукопоглощение. Возможны следующие недостатки: неравномерное размещение ЗПМ по площади панелей, недостаточно высокие звукопоглощающие свойства выбранного ЗПМ и другие.

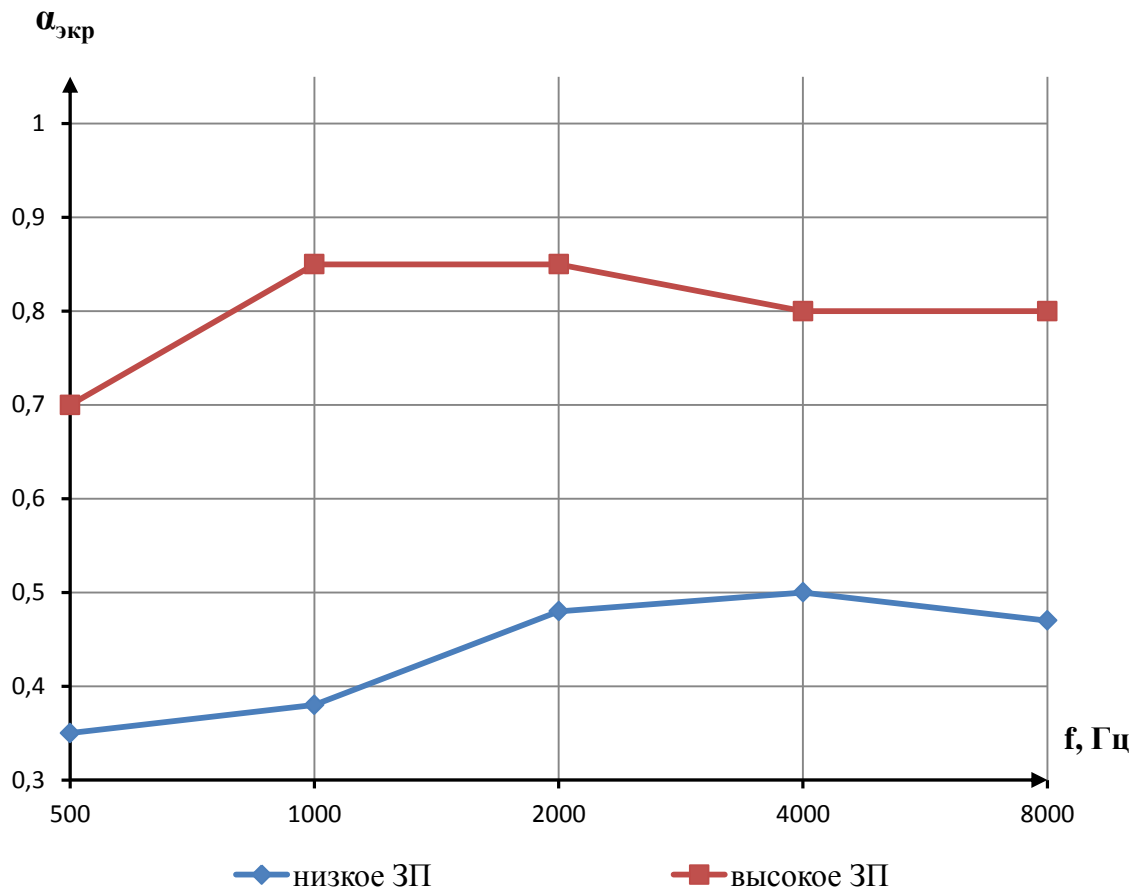


Рисунок 2.48 – Сравнение усредненных коэффициентов звукопоглощения двух ШЭ, измеренных в натуральных условиях

Наибольший интерес представляют сравнительные результаты звукопоглощающих свойств ШЭ, измеренных в акустических камерах и в натуральных условиях. Среднее значение коэффициента звукопоглощения 0,45–0,6 при заявляемых производителем 0,9–1,0, то есть разница почти в 2 раза (рисунок 2.49). Это несоответствие объясняется рядом причин, в том числе неправильной эксплуатацией ШЭ. Из данных экспериментов становится понятно, что заявленные значения $\alpha_{\text{экр}} = 1$ являются недостижимыми в условиях эксплуатации. Полученные в настоящем разделе выводы позволят выполнить более точные расчёты ШЭ, а также проектировать их с пониманием ограничений по эффективности, накладываемых наличием в конструкции экрана ЗПМ

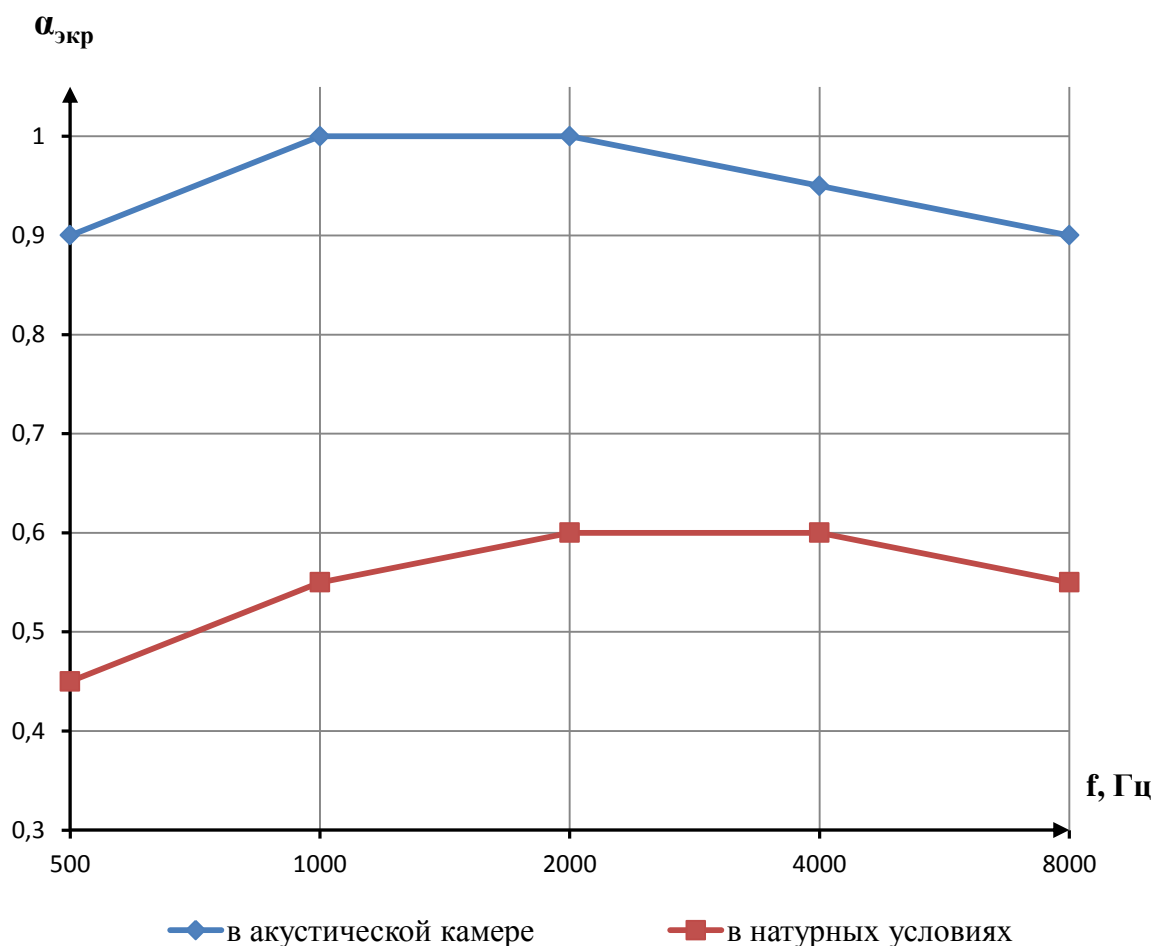


Рисунок 2.49 – Усреднённые характеристики ЗП шумозащитных экранов, измеренных в акустической камере и в натуральных условиях

2.6 Акустическая долговечность шумозащитных экранов

При обследовании ШЭ в общем количестве 40 шт., установленных вдоль автомобильных дорог в РФ, 80% составляли ШЭ из оцинкованной стали (рисунок 2.50).

Было установлено, что из 40 исследованных шумозащитных экранов, 21 ШЭ уже потерял первоначальные свойства. Так, в хорошем состоянии было только 47% ШЭ, большая часть из которых были недавно установленные (возраст не более 5 лет). Диаграмма состояния исследованных шумозащитных экранов представлена на рисунке 2.51.

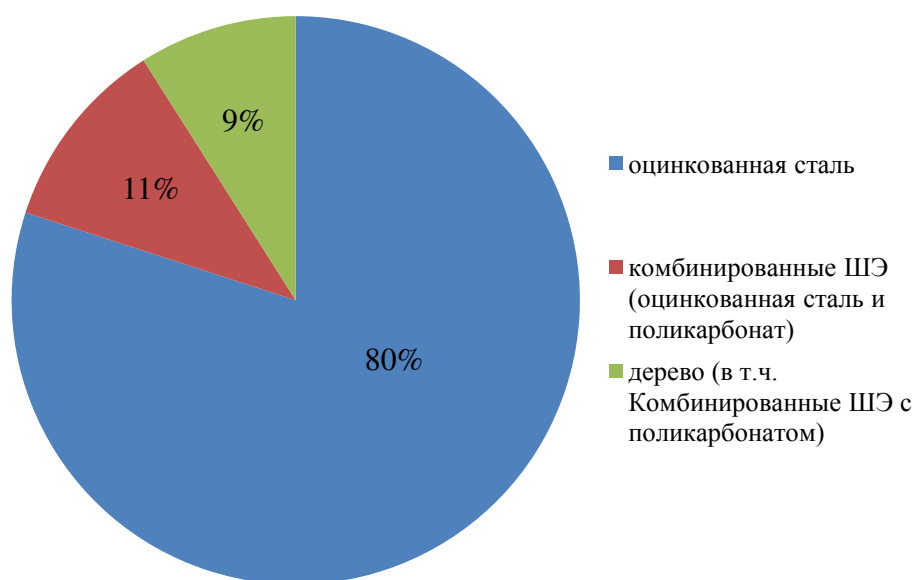


Рисунок 2.50 – Применимость материалов ШЭ, установленных вдоль автомобильных дорог в РФ

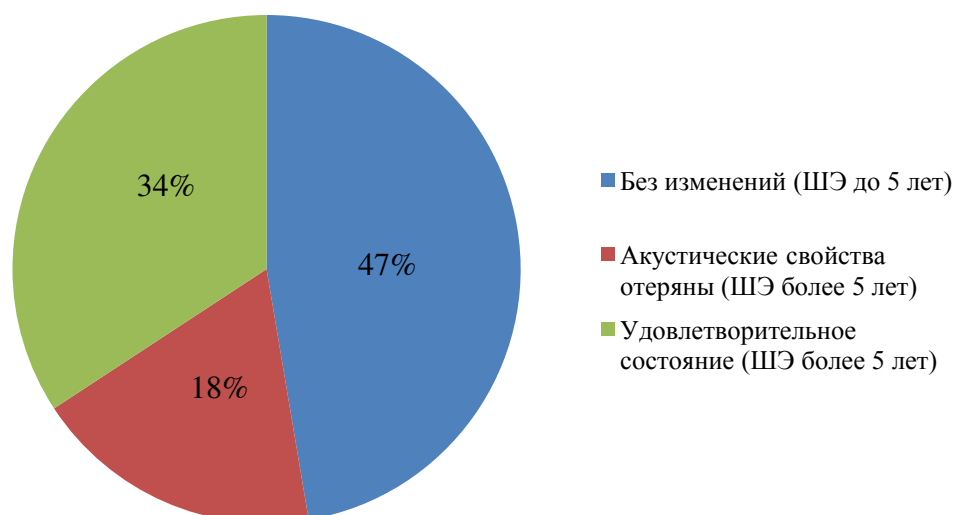


Рисунок 2.51 – Состояние исследованных ШЭ, установленных вдоль автомобильных дорог в РФ

Основными причинами неудовлетворительного состояния шумозащитных экранов являлись глубокая коррозия металла, выпадения панелей, нарушение целостности конструкций, разрушение фундамента. Иллюстрации описанных дефектов представлены на рисунках 2.52–2.55.

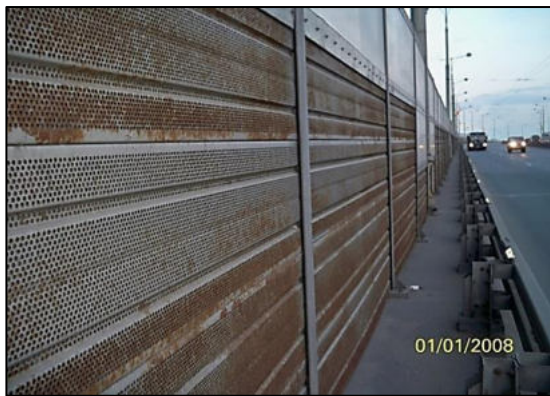


Рисунок 2.52 – Глубокая коррозия металла



Рисунок 2.53 – Выпадение панелей



Рисунок 2.54 – Нарушение целостности конструкций



Рисунок 2.55 – Разрушение фундамента

В РФ большинство экранов (до 80%), применяемых на железных и автомобильных дорогах, изготавливаются из оцинкованной стали, срок службы которых, например, на автомобильных дорогах не превышает 7–8 лет (рисунок 2.56), что приводит к неоправданным затратам по их замене. Необходим переход на новые технологии, обеспечивающие более высокую акустическую долговечность ШЭ. Согласно проведенному исследованию уже на 3-ем году эксплуатации 7 из 10 шумозащитных экранов теряют свои первоначальные акустические свойства, состояние 50% ШЭ можно оценить, как «среднее», 20% – как «плохое». Начиная с 8-ого года эксплуатации, состояние 50% шумозащитных экранов характеризуется как «среднее», и 50% – как «плохое».

Исследование установленных на автомобильных дорогах РФ деревянных ШЭ, наоборот, показало их высокое качество при сроках эксплуатации до 10 лет.

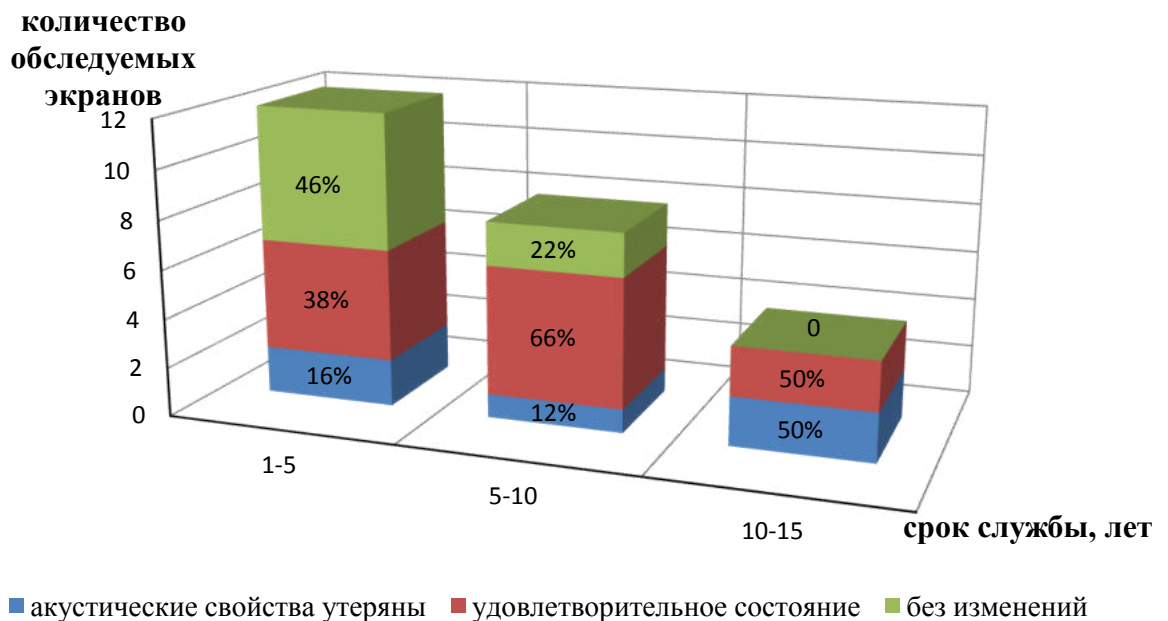


Рисунок 2.56 – Акустическая долговечность металлических ШЭ из оцинкованной стали

Важно понимать, какие шумозащитные экраны нужно выбирать для использования, чтобы иметь уверенность, что экраны выполняют не только свои

акустические функции и соответствуют требованиям к конструкции, но также сохраняют свои акустические характеристики в течение достаточно долгого срока эксплуатации с минимально возможным обслуживанием.

Долговечность может быть оценена с помощью описательных решений, основанных на расчетных характеристиках материалов или физическом состоянии изделия, или сравнительного тестирования производительности в соответствии с CEN/TS 1793–5 (это требует знания начальных характеристик в соответствии со стандартом CEN/TS 1793–5) [238].

Для сохранения акустических характеристик шумозащитных экранов и их свойств необходимо проводить регулярный мониторинг качества ШЭ. Необходимо контролировать акустические характеристики на протяжении всего срока эксплуатации ШЭ, так как это имеет важное значение для обеспечения соответствия продукции установленным требованиям.

EN 14389–1 [239] устанавливает порядок определения долгосрочных акустических характеристик для определенного набора экологических классов, в условиях ожидаемого сокращения производительности после 5, 10, 15 и 20 лет, при условии, что изделие содержится в соответствии с рекомендациями производителей и инструкциями. Изменение в звукоизоляции и звукопоглощении должно быть указано для каждого периода времени. Это будет шаг к ожидаемым характеристикам эксплуатации при определенных условиях окружающей среды, с точки зрения ожидаемого срока службы ШЭ в количестве лет для каждого набора условий и ожидаемых акустических характеристик в тот момент.

Как правило, имеющихся у производителей акустических данных недостаточно, чтобы определить отношение между сроком службы экрана и акустическими характеристиками с учетом временных факторов.

Как и в случае любых основных ресурсов транспортной инфраструктуры, например, тротуаров, дорожных знаков и т.д., ШЭ требуют управления, и в некоторых случаях, обслуживания, чтобы гарантировать выполнение их функций. На практике известно относительно мало об акустической долговечности экранов

и во многих случаях, техническое обслуживание осуществляется только при разрушении конструкции или значительного ущерба.

Рекомендуется на ежегодной основе производить визуальные проверки шумозащитных экранов. Если такие проверки выявляют повреждения или дефекты шумозащитного экрана, которые могут негативно повлиять на его характеристики защиты от шума, то могут потребоваться измерения акустических характеристик в дополнение к проверкам.

Для увеличения акустической долговечности нужно менять подход в изготовлении экранов, а именно разрабатывать и внедрять новые технические и технологические решения для проектирования, производства и эксплуатации транспортных и технологических шумозащитных экранов.

2.7 Снижение шума шумозащитными экранами в жилой застройке

Графики наличия превышения эквивалентных уровней звука на обследуемых селитебных территориях до и после проведения шумозащитных мероприятий представлены на рисунке 2.57, графики наличия превышения максимальных уровней звука – на рисунке 2.58. Общее число испытанных ШЭ более 40.

Как видно из графиков на рисунках 2.57–2.58 превышения эквивалентных уровней звука после установки ШЭ сократилось всего на 12%, при этом превышения более 10 дБА остались в 19% случаев при исходных 20%. Снижение максимальных уровней звука ШЭ было выявлено более эффективным, превышения сократились на 25%.

Дополнительно был выполнен анализ наличия превышения эквивалентных и максимальных уровней звука с установленными шумозащитными экранами при расположении селитебной территории на различном расстоянии от автомобильной дороги (рисунки 2.59–2.62).

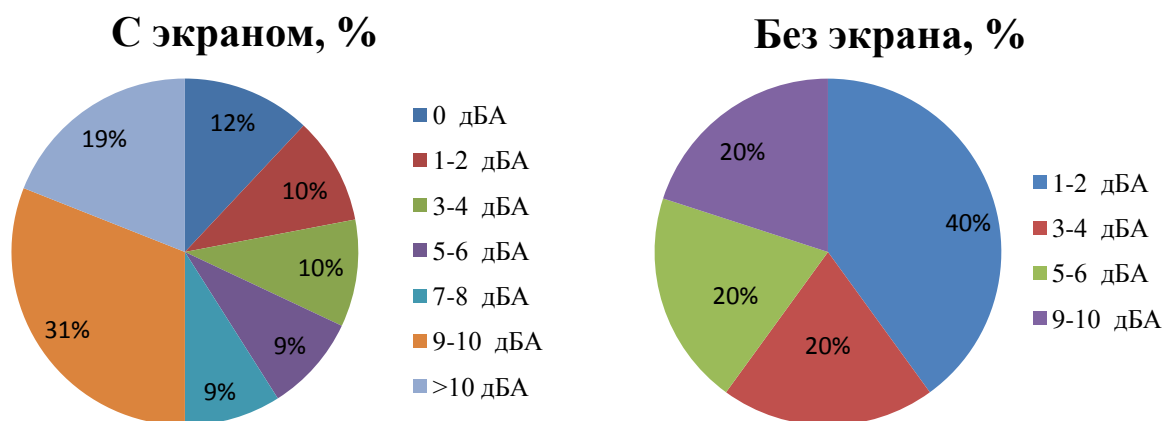


Рисунок 2.57 – Превышение эквивалентных уровней звука на селитебной территории до и после установки шумозащитных экранов

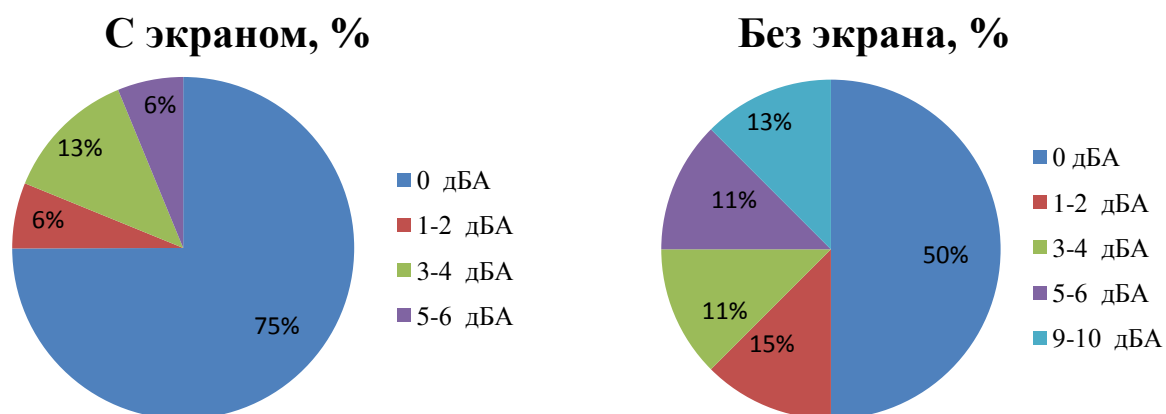


Рисунок 2.58 – Превышение максимальных уровней звука на селитебной территории до и после установки шумозащитных экранов

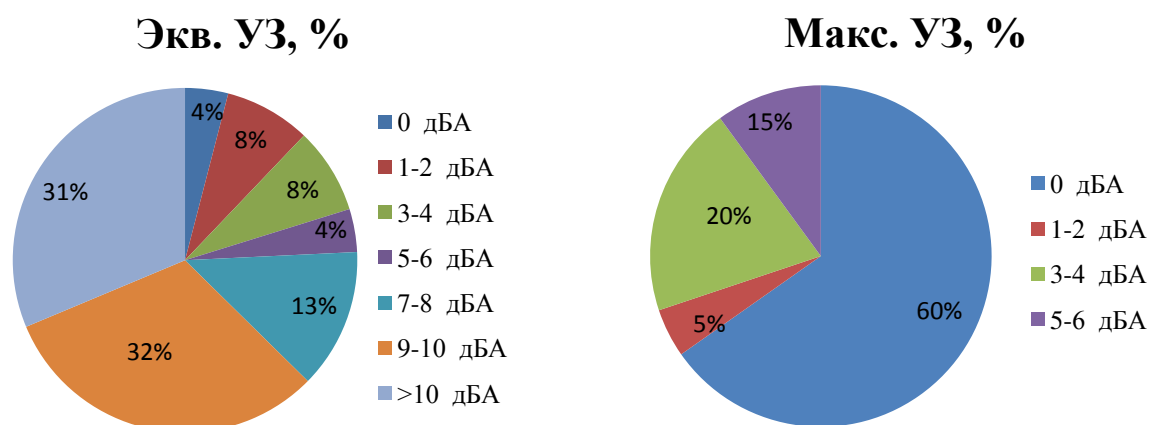


Рисунок 2.59 – Превышение эквивалентных и максимальных уровней звука на селитебной территории на расстоянии до 50 м от оси автомобильной дороги после установки шумозащитных экранов

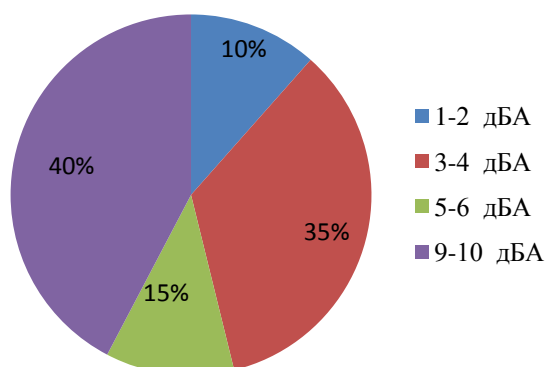
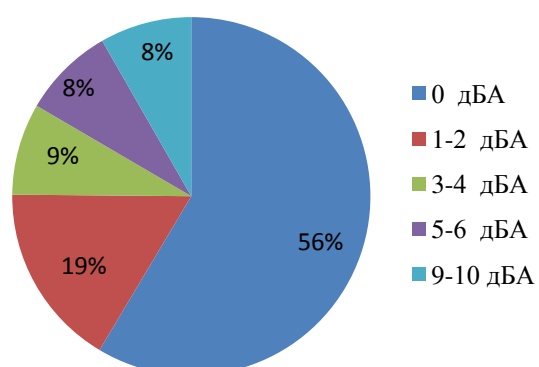
Экв. УЗ, %**Макс. УЗ, %**

Рисунок 2.60 – Превышение эквивалентных и максимальных уровней звука на селитебной территории на расстоянии от 50 до 100 м от оси автомобильной дороги после установки шумозащитных экранов

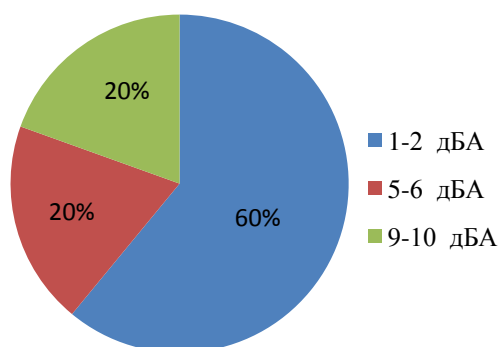
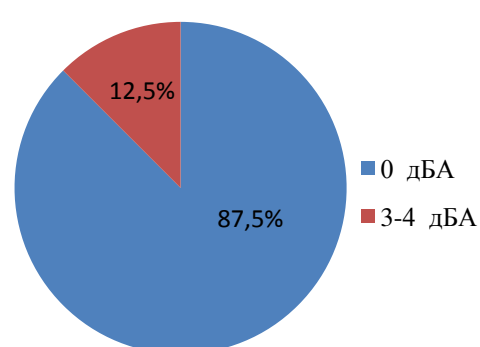
Экв. УЗ, %**Макс. УЗ, %**

Рисунок 2.61 – Превышение эквивалентных и максимальных уровней звука на селитебной территории на расстоянии от 100 до 250 м от оси автомобильной дороги после установки шумозащитных экранов

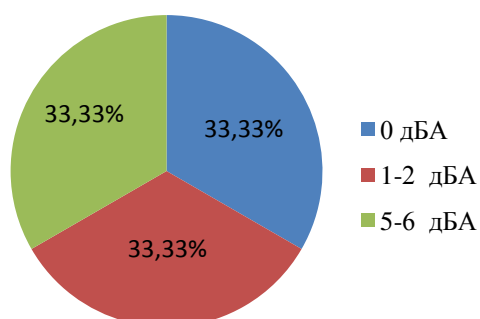
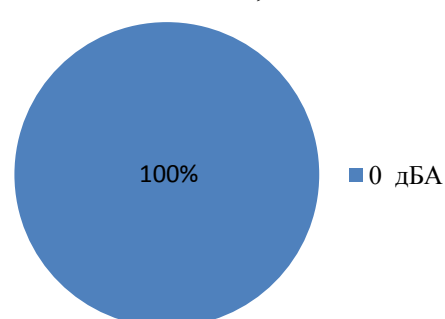
Экв. УЗ, %**Макс. УЗ, %**

Рисунок 2.62 – Превышение эквивалентных и максимальных уровней звука на селитебной территории на расстоянии более 250 м от оси автомобильной дороги после установки шумозащитных экранов

Как видно из графиков на рисунках 2.59–2.62 при расположении селитебной территории на расстоянии до 50 м превышения после установки ШЭ по эквивалентному УЗ отсутствуют только в 4% случаев, по максимальному – в 60% случаев. При расположении селитебной территории на расстоянии от 50 до 100 м превышения по эквивалентному уровню звука наблюдались в 100 % случаев, по максимальному – в 44% случаев. На расстоянии от 100 до 250 м от автомобильной дороги превышения по эквивалентному УЗ наблюдались во всех исследуемых объектах, при этом в 60% случаев составляли 1–2 дБА, по максимальному УЗ в 87,5% случаев превышения отсутствовали. При расположении жилой зоны на расстоянии более 250 м от автомобильной дороги, превышения по максимальному УЗ отсутствовали в 100% случаев, по эквивалентному УЗ – в 33% случаев.

Ниже приведена таблица 2.4 результатов измерений на обследуемых селитебных территориях с указанием наличия ШЭ и установленных превышения. Измерения проводились в дневное время суток. Исходя из измеренных характеристик, в ночное время суток превышения будут наблюдаться в 100% случаев.

Таблица 2.4 –Наличие превышения шума в жилой застройке после применения шумозащитных мероприятий

Населенный пункт	А.Д.	Расстояние до а.д., м	УЗ, дБА		Вклад других источников, дБА	Превышение, дБА		Наличие экрана	Примечание
			Экв.	Макс.		Экв.	Макс.		
п. Новоселье, Ломоносовского района, ЛО	А–118 (55 км внешнего кольца)	250	57	64	2–4	2	–	+	протокол № 001/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №2
СНТ «Березка», Ломоносовского района, ЛО	А–118 (36 км внешнего кольца).	190	56	62	0	1	–	–	протокол № 002/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №1
СНТ «Флора–2», Ломоносовского района, ЛО	А–118 (36 км внешнего кольца).	160	54	58	0	–	–	+	протокол № 002/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №3
ПККО «Агакули», Ломоносовского района, ЛО	А–118 (36 км внешнего кольца).	55	59	68	0	4	–	–	протокол № 002/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №4
МО «Пениковское сельское поселение», Ломоносовского района, ЛО	А–118 (111–112 км внутреннего кольца)	365	55	59	0	–	–	+	протокол № 003/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №1
д. Дудьево, кировского района, ЛО	Р–21 «Кола»	20	60	69	0	5	–	+	протокол № 004/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №1
	Р–21 «Кола»	35	62	70	0	7	–	+	протокол № 004/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №2
г. Сясьстрой, Сясьстройского городского поселения, Волховского района, ЛО	Р–21 «Кола»	27	56	63	0	1	–	+	протокол № 005/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №1
с. Паша, Пашского сельского поселения, ЛО	Р –21 «Кола»	17	57	60	0	2	–	+	протокол № 006/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №4

Продолжение таблицы 2.4

Населенный пункт	А.Д.	Расстояние до а.д., м	УЗ, дБА		Вклад других источников, дБА	Превышение, дБА		Наличие экрана	Примечание
			Экв.	Макс.		Экв.	Макс.		
с. Паша, Пашского сельского поселения, ЛО	Р –21 «Кола»	118	55	66	0	–	–	+	протокол № 006/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №4
с. Паша, Пашского сельского поселения, ЛО	Р –21 «Кола»	37	54	61	0	–	–	+	протокол № 007/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №1
	Р –21 «Кола»	120	57	67	0	2	–	+	протокол № 007/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №3
д. Ивашево, городского поселения Дмитров, Дмитровского р–на, МО	А–108 «Московское большое кольцо»	15	62	69	0	7	–	+	протокол № 008/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №2
д. Ивашево, городского поселения Дмитров, Дмитровского р–на, МО	А–108 «Московское большое кольцо»	36	64	71	0	9	1	+	протокол № 008/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №3
СНТ «Теплотехник», городское поселения Дмитров, Дмитровского р–на, МО	А–108 «Московское большое кольцо»	31	64	73	0	9	3	+	протокол № 009/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №1
	А–108 «Московское большое кольцо»	95	56	63	0	1	–	–	протокол № 009/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №3
с. Перестово, городское поселение Дмитров, Дмитровский р–н, МО	А–108 «Московское большое кольцо»	65	59	67	0	4	–	+	протокол № 010/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №1
с. Перестово, городское поселение Дмитров, Дмитровский р–н, МО	А–108 «Московское большое кольцо»	69	61	71	0–6	6	1	+	протокол № 010/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №2

Продолжение таблицы 2.4

Населенный пункт	А.Д.	Расстояние до а.д., м	УЗ, дБА		Вклад других источников, дБА	Превышение, дБА		Наличие экрана	Примечание
			Экв.	Макс.		Экв.	Макс.		
СНТ «Коллективный сад №3», вблизи п. Сельхозтехника, МО	М-2 «Крым»	96	65	68	0	10	–	+	протокол № 011/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №1
СНТ «Коллективный сад №3», вблизи п. Сельхозтехника, МО	М-2 «Крым»	85	58	61	0	3	–	+	протокол № 011/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №3
д. Ярлыково, Домодедовского р-на, МО	М-4 «Дон»	50	65	71	7–8	10	1	–	протокол № 012/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №1
д. Ярлыково, Домодедовского р-на, МО	М-4 «Дон»	15	59	63	0	4	–	+	протокол № 012/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №2
д. Ярлыково, Домодедовского р-на, МО	М-4 «Дон»	110	64	79	1–3	9	3	+	протокол № 013/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №1
д. Ярлыково, Домодедовского р-на, МО	М-4 «Дон»	84	66	73	1–2	11	3	+	протокол № 013/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №3
д. Пешки, Солнечногорского р-на, МО	М-10 «Россия»	15	69	77	0	14	7	+	протокол № 014/2017–ЖЗ от 19.10.2017 г., точка измерения №3
д. Ложки, Солнечногорского р-на, МО	М-10 «Россия»	10	69	76	0	14	6	+	протокол № 015/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №1
д. Ложки, Солнечногорского р-на, МО	М-10 «Россия»	15	67	73	1	12	3	–	протокол № 016/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №1

Продолжение таблицы 2.4

Населенный пункт	А.Д.	Расстояние до а.д., м	УЗ, дБА		Вклад других источников, дБА	Превышение, дБА		Наличие экрана	Примечание
			Экв.	Макс.		Экв.	Макс.		
д. Пушкино, МО	М-8 «Холмогоры»	40	64	65	0	9	–	+	протокол № 018/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №1
д. Ложки, Солнечногорского р-на, МО	М-10 «Россия»	15	69	76	0	14	6	+	протокол № 016/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №2
д. Меньшово, Бронницы, МО	М-4 «Урал»	220	53	55	0	–	–	+	протокол № 017/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №2
г. Мытищи, МО	М-18 «Холмогоры»	37	62	65	0	7	–	+	протокол № 019/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №2
СНТ «Калинка», городское поселение Ногинск, МО	М-7 «Волга»	50	69	75	0	14	5	–	протокол № 020/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №1
СНТ «Калинка», городское поселение Ногинск, МО	М-7 «Волга»	40	59	63	0	4	–	+	протокол № 020/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №2
СНТ «Солнышко», городское поселение Ногинск, МО	М-7 «Волга»	55	66	79	0	11	9	+	протокол № 022/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №2
п. Балтия, городского округа Истра, МО	М-9 «Балтия»	450	61	63	4	6	–	–	протокол № 023/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №1
п. Балтия, городского округа Истра, МО	М-9 «Балтия»	100	60	66	0	5	–	+	протокол № 023/2017–ЖЗ от 02.10.2017 г., точка измерения №2

Продолжение таблицы 2.4

Населенный пункт	Населенный пункт	Населенный пункт	Населенный пункт		Населенный пункт	Населенный пункт		Населенный пункт	Населенный пункт
			Экв.	Макс.		Экв.	Макс.		
п. Опытный, Цивильского района, Чувашской Республики	М-7 «Волга»	28	67	80	0	12	10	–	протокол № 027/2017–ЖЗ от 25.10.2017 г., точка измерения №3
д. Бузланово, Красногорского района, МО	М-9 «Балтия»	30	64	65	0	9	–	+	протокол № 023/2017–ЖЗ от 20.10.2017 г., точка измерения №2
с. Никольское, Ядринского района, Чувашской Республики	М-7 «Волга»	70	64	69	0	9	–	+	протокол № 026/2017–ЖЗ от 25.10.2017 г., точка измерения №1
п. Опытный, Цивильского района, Чувашской Республики	М-7 «Волга»	16	5	74	0	10	4	+	протокол № 027/2017–ЖЗ от 25.10.2017 г., точка измерения №2
д. Тереси, Моргаушского района, Чувашской Республики	М-7 «Волга»	17	69	74	0	14	4	+	протокол № 028/2017–ЖЗ от 25.10.2017 г., точка измерения №1
		15	64	69	0	9	–	+	протокол № 028/2017–ЖЗ от 25.10.2017 г., точка измерения №2
д. Калмыково, Моргаушского района, Чувашской Республики	М-7 «Волга»	26	64	69	0	9	–	+	протокол № 029/2017–ЖЗ от 25.10.2017 г., точка измерения №2
		30	67	75	0	12	5	–	протокол № 029/2017–ЖЗ от 25.10.2017 г., точка измерения №6

По результатам натурных исследований (таблица 2.4) можно сделать вывод, что более 80% шумозащитных экранов не выполняют своей функции в полной мере и на селитебной территории остаются превышения по эквивалентному и максимальному уровням звука от 1 до 14 дБА. Вклад сторонних источников шума составляет до 8 дБА. Причинами такого положения являются, как зачастую необоснованные технические решения, так и устаревшие технологии, применяемые на практике.

Графическое представление результатов изображено на рисунке 2.63.

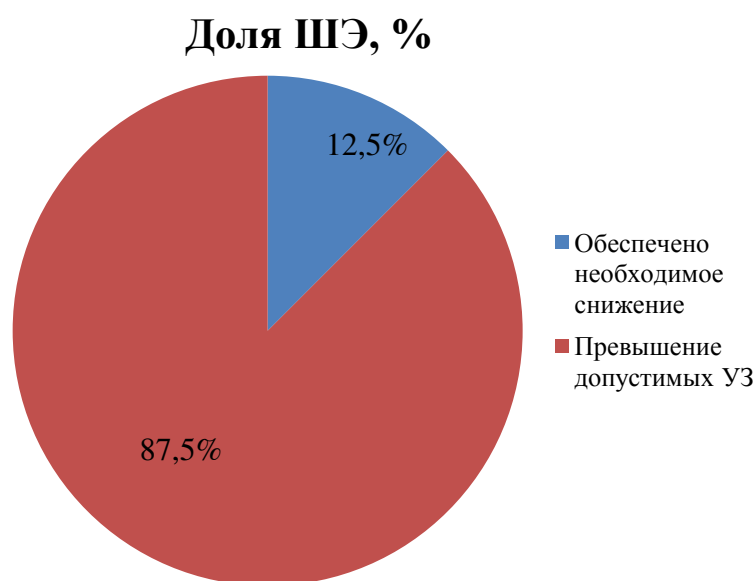


Рисунок 2.63 – Обеспечение достаточной эффективности обследуемыми ШЭ

Выполненные обследования показали, что проблема проектирования, изготовления, установки и монтажа ШЭ требует своего решения.

2.8 Выводы по главе

1. Показана актуальность проблемы акустического загрязнения городов, основные вклады в которое вносят автомобильный, железнодорожный транспорт, промышленные предприятия и др. источники. Выполнены измерения, которые показали высокие уровни основных источников шума:

- автомобильные дороги эквивалентные уровни звука составили 74–86 дБА, максимальные 83–96 дБА, измеренные на расстоянии 7,5м;
- железные дороги, где эквивалентные уровни звука составили 70–75 дБА, максимальные 90–93дБА, измеренные на расстоянии 25м;
- промышленные предприятия эквивалентные уровни звука 68-74дБА и максимальные уровни звука 68–74 дБА, измеренные на расстоянии 100м.

На приведенные расстояния 100 м рассчитанные значения составили:

- автомобильные дороги эквивалентные уровни звука составили 63–75 дБА, максимальные 56–75 дБА, превышающие на 8–20дБА;
- железные дороги, эквивалентные уровни звука составили 64–69 дБА, превышения 9–14 дБА, максимальные 78–81дБА, превышения на 8–11дБА;
- промышленные предприятия характеризуются значениями эквивалентных УЗ в жилой застройке 68–74дБА, а превышения на расстоянии 100 метров превышения составляют до 13-19 дБА.

2. Акустическая эффективность ШЭ на автодорогах достигает 5–12 дБА, на железных дорогах 8–14 дБА. Фактическая акустическая эффективность шумозащитных экранов отличается от теоретической расчетной в два и более раз, что связано с ошибками как на стадии проектирования, когда определяются необходимые параметры шумозащитного экрана (высота и протяженности, в первую очередь), так и на стадии монтажа конструкции. Согласно проведенному анализу в 85% случаев протяженность экрана является недостаточной и требует увеличения для исключения дифракции звука через боковые ребра ШЭ. В 38%

случаев необходимая высота шумозащитного экрана рассчитана неправильно и должна быть увеличена для достижения требуемого снижения шума. Указанные ошибки, в том числе, связаны и с отсутствием учета количества полос движения на автомобильной дороге, и учета движения подвижного состава по второму пути и др. Наиболее распространенными ошибками также являются: несоответствие шага стоек ШЭ и фундамента, приводящее к образованию щелей, крупных зазоров и проемов; необоснованные разрывы в шумозащитных экранах; негерметичное исполнение конструкции с образованием щелей между акустическими панелями и фундаментом (поверхностью земли); неправильное устройство водоотводов с образованием крупных проемов;

3. Разработаны методики проведения натурных испытаний для измерения показателей звукопоглощения и звукоизоляции ШЭ в натурных условиях

4. Проведены экспериментальные исследования по определению индекса звукоизоляции в натурных условиях. Полученные в экспериментах значения звукоизоляции для ШЭ в натурных условиях в среднем составляют 15–18 дБА (68% измерений), предельные значения в 20–22 дБА (12 % случаев). Заявляемый производителями индекс ЗИ ШЭ в 31–36 дБ в натурных условиях является абсолютно недостижимым. Звукоизоляция металлических экранов, установленных вдоль автомобильных дорог, составила в натурных условиях 11–22 дБА, металлических с поликарбонатом – 12–15 дБА, деревянных – 16–18 дБА. Невысокая звукоизоляция может заметно снижать их акустическую эффективность.

5. Экспериментами в натурных условиях установлены невысокие качества звукопоглощения ШЭ, которые в среднем составили по значению коэффициента звукопоглощения 0,45–0,6 при заявленных значениях 0,9–1 разница между ШЭ с хорошо выполненным и сохранившимся в период эксплуатации звукопоглощением и неэффективным звукопоглощением составила по значению коэффициента ЗП 0,35–0,45. Невысокое звукопоглощение ШЭ заметно снижает их акустическую эффективность.

7. Акустическая долговечность ШЭ, в первую очередь, связана с применяемыми материалами. В Европе наиболее распространенным материалом шумозащитных экранов являются древесина и бетон, в США – бетон и кирпич, в странах Скандинавии – древесина. В России большее количество шумозащитных экранов (порядка 80%) изготавливается из оцинкованной стали, всего 10% – из алюминия и нержавеющей стали, и древесины. В результате низкого качества установленных в России шумозащитных экранов последние являются акустически недолговечными, теряют свои свойства через 7–8 лет и требуют полной замены. Для повышения качества шумозащитных экранов и сроков их эксплуатации необходимо пересмотреть действующую в России нормативно-техническую документацию в части требований к шумозащитным экранам и применении новых технологий.

8. В результате проведения натурных измерений шумовых характеристик автомобильных дорог и уровней звука на прилегающих селитебных территориях было установлено, что более 80% шумозащитных экранов не выполняют своей функции в полной мере и на селитебной территории после установки экранов остаются превышения по эквивалентным уровням звука от 1 до 14 дБА.

ГЛАВА 3 УТОЧНЁННАЯ ТЕОРИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ

3.1 Основные допущения и положения теории

Основное применение в практике расчётов шумозащитных экранов находит оптико–дифракционная теория З. Маекавы–Д. Келлера. Она использует в качестве основных показателей число Френеля, показывающего разность хода звуковых лучей в присутствии экрана на различных частотах. Её основной недостаток – невысокая точность расчётов, обусловленная отсутствием учёта акустических свойств экрана (звукоизоляция и звукопоглощение).

Этих недостатков в значительной мере лишена теория акустических экранов, разработанная Н. В. Тюриной [13], в которой учитываются звукопоглощающие свойства ШЭ и опорных поверхностей введением членов:

$$10 \lg(1 - \alpha_{\text{экp}}) \text{ и } 10 \lg(1 - \alpha_{\text{пов}}), \quad (3.1)$$

где $\alpha_{\text{экp}}$ и $\alpha_{\text{пов}}$ – частотно–зависимые коэффициенты звукопоглощения ШЭ и опорной поверхности соответственно.

В этой теории звуковое поле перед ШЭ рассматривается как поле единичных отражений звука. Для учёта дифракции на свободном ребре ШЭ в теории впервые было введено очень важное понятие показателя дифракции (ПД):

$$\text{ПД} = 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{диф}}^{\text{экp}}}, \quad (3.2)$$

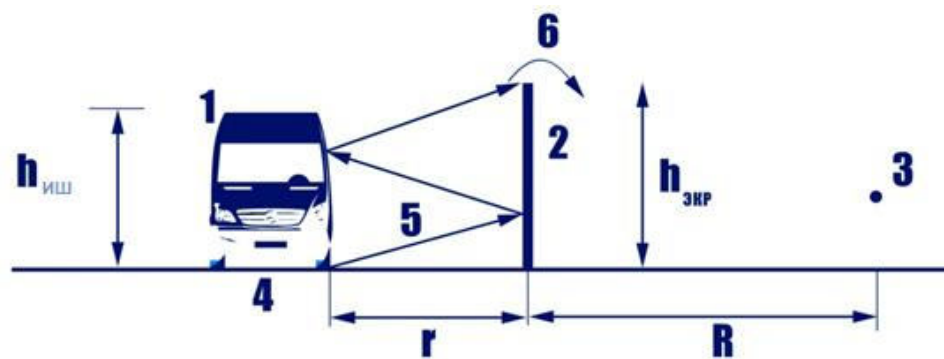
где $\beta_{\text{диф}}^{\text{экp}}$ – коэффициент дифракции ШЭ (отношение интенсивности звука дифрагированного на свободном ребре ШЭ к интенсивности падающего звука).

Таким образом, предположенная Н.В.Тюриной теория позволяет рассчитывать ШЭ в зависимости

- характера звукового поля источника шума (точечные – сферическая звуковая волна, линейные – цилиндрическая звуковая волна);
- акустических свойств экрана (звукопоглощения);

- высоты ШЭ;
- отражающих или поглощающих свойств близкорасположенных поверхностей;
- расположения ШЭ в пространстве.

Тщательное изучение в натуральных условиях характера звуковых полей, образующихся с внутренней (со стороны источников шума) стороны ШЭ, позволяет утверждать, что они имеют более сложный характер, чем рассмотрено в упомянутой теории (рисунок 3.1). Это звуковое поле характеризуется в первую очередь, множеством отражений в пространстве между ИШ, ШУ и опорной поверхностью.



- 1 – ИШ, 2 – шумозащитный экран, 3 – РТ, 4 – опорная поверхность,
 5 – многократные отражения звука,
 6 – дифракция звука на свободном ребре шумозащитного экрана

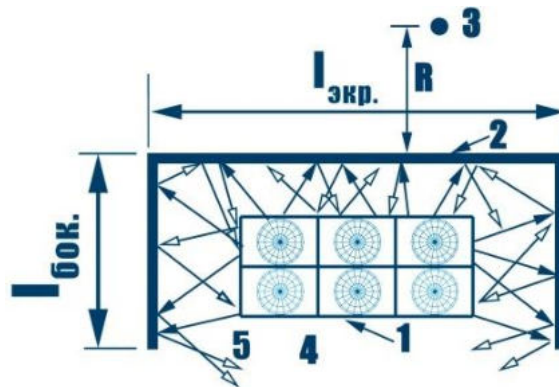
Рисунок 3.1 – Характер звукового поля перед транспортным шумозащитным экраном

Примем в качестве основной рабочей гипотезы: звуковое поле перед шумозащитным экраном – квазидиффузное, характеризуемое изотропностью звуковой энергии в любой точке пространства между ИШ и ШЭ, но имеющего характер уменьшения интенсивности звука в пространстве перед экраном по мере увеличения его высоты в результате дивергенции. Эта гипотеза будет проверена экспериментально.

Идея о квазидиффузном характере звуковых полей перед экраном была высказана Н. В. Тюриной при рассмотрении ШЭ в помещениях и Д. А. Куклиным

[309] и П. В. Матвеевым [310] при рассмотрении малых ШЭ, близрасположенных вблизи концов шпал в пределах габаритов приближенного строения. Но эти примеры носили частный характер.

Нами предлагается рассматривать квазидиффузное звуковое поле множественных отражений для всех транспортных (рисунок 3.1) и технологических экранов (рисунок 3.2).



1 – ИШ, 2 – шумозащитный экран, 3 – РТ, 4 – опорная поверхность, 5 – многократные отражения звука

Рисунок 3.2 – Характер звукового поля технологических звукозащитных экранов

Звуковое поле создаётся в условном объёме, образуемом шумозащитным экраном, источниками шума (автомобильный поток или поезд для транспортных экранов, дизель–электрическая станция, чиллер и другие ИШ для технологических экранов) и опорной поверхностью. В условном объёме верхний проём рассматривается как открытый с коэффициентом звукопоглощения $\alpha_{пр}$ равным единице.

Интенсивность отражённого звукового поля в условном объёме определяется с использованием статистической теории акустики:

$$I_{пад} = \frac{4W_{ист}(1-\bar{\alpha}_{об})}{\psi_{об} A_{об}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (3.3)$$

где $W_{ист}$ – акустическая мощность ИШ, Вт;

$\bar{\alpha}_{об}$ – средний коэффициент звукопоглощения объёма;

$\Psi_{об}$ – коэффициент, показывающий степень диффузности звукового поля (таблица 3.1);

$A_{об}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения условного объема, м².

Таблица 3.1 – Значения коэффициента степени диффузности $\Psi_{об}$

$\alpha_{об}$	$\Psi_{об}$	$10lg\Psi_{об}$
0,2	1,25	1
0,4	1,6	2
0,5	2,0	3
0,6	2,5	4

Для транспортных экранов:

$$A_{об} = l_{экр}(h_{экр}\alpha_{экр} + h_{иш}\alpha_{иш} + r\alpha_{пов} + r_1), \quad (3.4)$$

где $l_{экр}$ – длина шумозащитного экрана, м;

$h_{экр}$ – высота шумозащитного экрана, м;

$\alpha_{экр}$ – частотнозависимый коэффициент звукопоглощения экрана, полученный натурными измерениями на реальных экранах;

$h_{иш}$ – условная высота ИШ, м;

$\alpha_{иш}$ – коэффициент звукопоглощения ИШ (транспортный поток или поезд),

$\alpha_{иш} = 0,01$ (например, для а/д и ж/д);

$\alpha_{пов}$ – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Коэффициенты звукопоглощения различных опорных поверхностей

Отражающая поверхность	Коэффициенты в октавных полосах частот, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Асфальт, бетон	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06
Невысокая трава, песок	0,1	0,15	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,35

$$\bar{\alpha}_{об} = \frac{l_{экр}(h_{экр}\alpha_{экр} + h_{иш}\alpha_{иш} + r\alpha_{пов} + r_1)}{l_{экр}(h_{экр} + h_{иш} + 2r)}. \quad (3.5)$$

Для технологических экранов

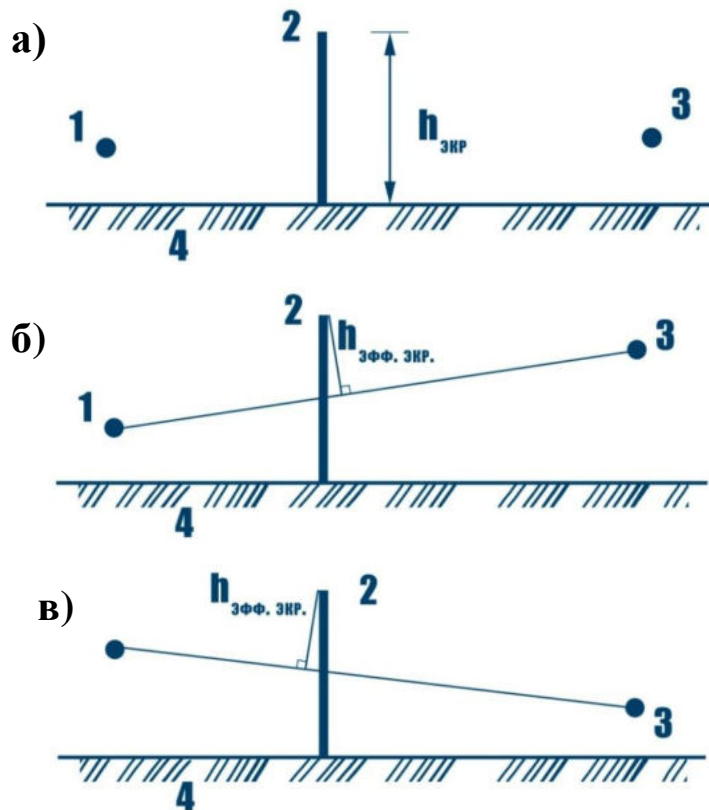
$$I_{пад} = \frac{4W(1 - \bar{\alpha}'_{об})}{\Psi'_{об} A'_{об}}, \quad (3.6)$$

$$A'_{об} = l_{фр}h_{экр}\alpha_{экр} + 2l_{бок}h_{экр}\alpha_{экр} + l_{бок}l_{фр}\alpha_{пов} + l_{бок}l_{фр} + l_{фр}h_{фр}, \quad (3.7)$$

$$\bar{\alpha}'_{об} = \frac{l_{фр}h_{фр}\alpha_{экр} + 2l_{бок}h_{экр}\alpha_{экр} + l_{бок}l_{фр}\alpha_{пов} + l_{бок}l_{фр} + l_{фр}h_{фр}}{2(l_{фр}h_{экр} + l_{бок}h_{экр} + l_{бок}l_{фр})}. \quad (3.8)?$$

где $l_{экр}$ – длина фронтального экрана, м; $l_{бок}$ – длина бокового отгона, м; $h_{фр}$ – высота фронтального экрана, м; $h_{бок}$ – высота бокового отгона, м;

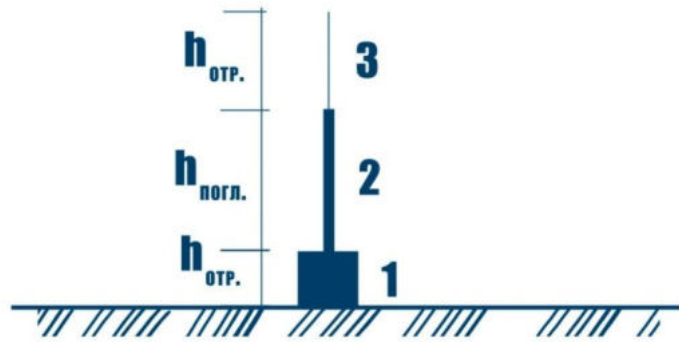
Важной особенностью при рассмотрении расчётных схем является возможное расположение РТ не только на высоте 1,5 м, но и на высотах 4 и более метров. В таком случае только часть высоты шумозащитного экрана работает в качестве препятствия, и тогда вместо $h_{экр}$ необходимо вводить в расчёты понятие $h_{экр}^{эф}$ – эффективной высоты экрана – перпендикуляр из вершины свободного ребра на линию, соединяющую ИШ и РТ (рисунок 3.3).



1 – ИШ, 2 – ШЭ, 3 – РТ, 4 – опорная поверхность

Рисунок 3.3 – Высота (а) шумозащитного экрана и эффективная высота (б, в)

Немалая часть шумозащитных экранов выполняется в виде комбинаций из панелей, содержащих звукопоглощающий материал с панелями из прозрачного стекла, работающими только на отражение звука, а также звукоотражающего фундамента (рисунок 3.4).



1 – отражающий звук фундамент, 2 – отражающе-поглощающие панели,
3 – отражающие звук светопрозрачные панели.

Рисунок 3.4 – Схема комбинированных шумозащитных экранов

В таком случае в расчётах вместо $\alpha_{\text{экр}}$ вводится понятие усреднённого коэффициента звукопоглощения экрана $\bar{\alpha}_{\text{экр}}$, равного:

$$\bar{\alpha}_{\text{экр}} = \frac{h_{\text{ф}}\alpha_{\text{ф}} + h_{\text{погл}}\alpha_{\text{погл}} + h_{\text{отр}}\alpha_{\text{отр}}}{h_{\text{ф}} + h_{\text{погл}} + h_{\text{отр}}}, \quad (3.9)$$

где $h_{\text{ф}}$, $h_{\text{погл}}$, $h_{\text{отр}}$ – высота фундамента, отражающе-поглощающих и отражающих светопрозрачных панелей соответственно, м;

$\alpha_{\text{ф}}$, $\alpha_{\text{погл}}$, $\alpha_{\text{отр}}$ – коэффициенты звукопоглощения материала фундамента, отражающе-поглощающих и отражающих светопрозрачных панелей.

Важной поправкой, влияющей на эффективность экрана, является учёт звукоизолирующих свойств экранов, полученный в натуральных условиях, когда приведенная звукоизоляция экрана равна:

$$\bar{ЗИ} = ЗИ_{\text{экр}} - 10 \lg \frac{\frac{S_{\text{экр}}}{S'_{\text{пр}}} + 10^{0,1(ЗИ_{\text{экр}} - ЗИ_{\text{пр}})}}{1 + \frac{S_{\text{экр}}}{S'_{\text{пр}}}}, \quad (3.10)$$

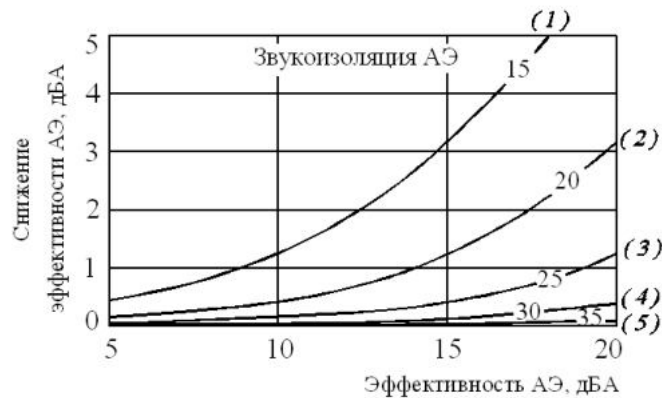
где $ЗИ_{\text{экр}}$ – звукоизоляция экрана, дБ;

$S_{\text{экр}}$ – площадь экрана, м^2 ;

$S'_{\text{пр}}$ – площадь проёма (щели), м^2 ;

$\text{ЗИ}_{\text{пр}}$ – звукоизоляция проёма (щели), дБ.

Снижение эффективности экрана ($\Delta \text{ЗИ}_{\text{экр}}$) при слабой звукоизоляции определяется из рисунка 3.5.



1 – 5 звукоизоляция АЭ

Рисунок 3.5 – Снижение эффективности АЭ при уменьшении его звукоизоляции

Акустическая эффективность экрана с поправкой на звукоизоляцию определяется:

$$\Delta L_{\text{экр}}^{\Delta \text{ЗИ}} = \Delta L_{\text{экр}} - \Delta \text{ЗИ}_{\text{экр}}, \quad (3.11)$$

где $\Delta L_{\text{экр}}$ – акустическая эффективность экрана, дБ;

$\Delta \text{ЗИ}_{\text{экр}}$ – поправка на звукоизоляцию экрана.

Основными положениями уточнённой теории шумозащитных экранов являются следующие:

1. Звуковое поле, создаваемое в условном объёме, образованном источниками шума, шумозащитным экраном и опорной поверхностью – для транспортных экранов; фронтальными и боковыми экранами, источниками шума и опорной и другими поверхностями – для технологических экранов,

рассматривается как квазидиффузное со множеством отражений по признаку изотропности звука, но обладающее дивергенцией по высоте ШЭ;

2. Для учёта явлений дифракции на свободном ребре шумозащитного экрана используется, предложенный Н. В. Тюриной, показатель дифракции ($ПД = 10 \lg 1/\beta_{\text{диф}}^{\text{экр}}$, где $\beta_{\text{диф}}^{\text{экр}}$ – коэффициент дифракции экрана, показывающий отношение интенсивности дифрагированного звука к интенсивности падающего на свободное ребро звука); ПД определяется экспериментально в натуральных условиях;
3. Вводится понятие эффективной высоты шумозащитного экрана – перпендикуляр из вершины свободного ребра на условную линию, соединяющую источники шума и расчётную точку в соответствии с рисунком 3.3;
4. Шумозащитный экран рассматривается как звуконепроницаемая конструкция, звук попадает в РТ путём дифракции через верхнее свободное ребро экрана;
5. Источники шума для транспортных шумозащитных экранов рассматриваются в виде линейных излучателей цилиндрических звуковых волн, а для технологических экранов в виде точечных излучателей сферических звуковых волн;
6. Интерференционные явления в квазидиффузном поле, а также за шумозащитным экраном не учитываются.

Общие допущения при расчётах:

1. Звуковое поле перед звукозащитным экраном квазидиффузное, интенсивность звука убывает с высотой экрана (кроме схемы б).
2. Перед шумозащитным экраном образуется условный объём ограниченный экраном, источниками шума и опорной поверхностью.
3. Свободное ребро шумозащитного экрана принято вторичным линейным излучателем звука.

4. Шумозащитный экран рассматривается как звуконепроницаемая конструкция, звук попадает в РТ путём дифракции через свободное ребро экрана (кроме схемы 8).
5. Длина источника шума для транспортных экранов ($l_{иш}$) принята равной длине шумозащитного экрана ($l_{экp}$).

Граничные условия определяются степенью диффузности звукового поля, которая зависит от частоты. Примем допущение, что звуковое поле диффузно при 10 свободных отражениях. Тогда нижняя граничная частота определяется [6]:

$$f_{гр} = \frac{500}{\sqrt[3]{V_{об}}}, \quad (3.12)$$

где $V_{об}$ – условный объем, образуемый ШЭ, ИШ и опорной поверхностью.

Можно условно принять высоту равной 4м, ширину 10 м, а длина из условий соразмерности условно не должна превышать 20 м. Для выбранных (наиболее типичных) условий, $V_{об} = 800 \text{ м}^3$, тогда $f_{гр} = 60 \text{ Гц}$, т.е. нижняя граница исследований находится на среднегеометрической частоте 63 Гц. Таким образом, частотный диапазон, в котором проводятся исследования ШЭ составляет 63–8000 Гц.

3.2 Выбор и описание расчётных схем

Выбор расчётных схем диктуется условием: охватить всё многообразие конструкций шумозащитных экранов, влияющих на их акустическую эффективность. Всего для анализа было выбрано 10 расчётных схем, из них: 7 схем для транспортных шумозащитных экранов, 2 схемы для технологических экранов и одна общая.

Схема 1 (таблица 3.3): прямой транспортный шумозащитный экран без надстройки на верхнем свободном ребре, через которое звук дифрагирует в РТ.

Схема 2 (таблица 3.3): Г-образный транспортный шумозащитный экран с надстройкой в виде полки, расположенной под углом на свободном ребре, через которую звук дифрагирует в РТ.

Схема 3 (таблица 3.3): транспортный шумозащитный экран с устройством на свободном ребре, называемом антидифрактором (в виде перфорированного цилиндра с расположенным внутри звукопоглощающим материалом) через который звук дифрагирует в РТ.

Схема 4 (таблица 3.3): Т-образный транспортный шумозащитный экран с надстройкой на свободном ребре в виде горизонтальной (по отношению к опорной поверхности) полки, через которую звук дифрагирует в РТ.

Схема 5 (таблица 3.3): прямой транспортный шумозащитный экран, расположенный на эстакаде, что увеличивает значение $h_{\text{экp}}^{\text{эф}}$.

Схема 6 (таблица 3.3): прямой транспортный шумозащитный экран, расположенный в акустически необработанной галерее, где эффект дифракции на свободном ребре практически отсутствует.

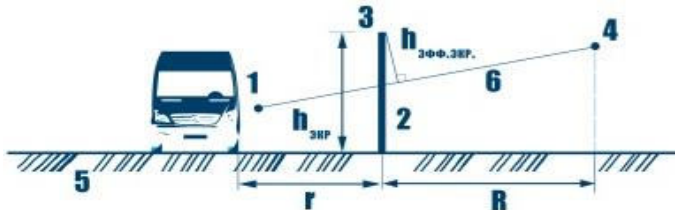
Схема 7 (таблица 3.3): транспортный шумозащитный экран с дифракцией звука на на свободном боковом ребре экрана.

Схема 8 (таблица 3.3): технологический шумозащитный П-образный экран, где звук дифрагирует через фронтальный экран в РТ

Схема 9 (таблица 3.3): технологический шумозащитный экран в виде замкнутой конструкции (вид сверху), звук проходит через фронтальный экран в РТ.

Схема 10 (таблица 3.3): транспортный или технологический шумозащитный экран с щелью по всей длине в нижней части экрана так, что звук частично дифрагирует через верхнее свободное ребро, а частично проходит в РТ через щель.

Таблица 3.3 – Расчётные схемы ШЭ

№п/п	Наименование	Схема
1	Прямой транспортный шумозащитный экран без надстройки на верхнем свободном ребре, через которое звук дифрагирует в РТ	

Продолжение таблицы 3.3

№п/п	Наименование	Схема
2	Экран с Г-образной надстройкой на верхнем свободном ребре	
3	Экран с Т-образной надстройкой на свободном ребре	
4	Шумозащитный экран с антифидрактором на свободном ребре	
5	Вертикальный экран, установленный на эстакаде	

Продолжение таблицы 3.3

№п/п	Наименование	Схема
6	Экран, установленный в акустически необработанной галерее	The diagram illustrates a sound screen (2) of height h_s installed in an untreated gallery. The screen is supported by pillars (6) with a radius R. Vehicles (1) are on the road behind the screen. Sound waves (3) are shown reflecting off the top of the screen (4) and back down (4). A receiver (5) is indicated by a dot to the left of the screen.
7	Шумозащитный прямой экран с дифракцией звука на боковом ребре	The diagram shows a sound screen with sound diffraction on the side edge. A receiver (5) is positioned behind the screen. Sound waves (1) from vehicles diffract over the side edge (2) and reflect (3) towards the receiver (5). The distance R_4 is marked between the side edge and the receiver.

Продолжение таблицы 3.3

№п/п	Наименование	Схема
8	П-образный (в плане) прямой экран	
9	Замкнутый (в плане) прямой экран	
10	Прямой транспортный или технологический экран со щелью или проёмом	

*обозначения к рисункам указаны в п.п. 3.3-3.6

3.3 Правило расчётов составления математических моделей шумозащитных экранов

Алгоритм составления математических моделей шумозащитных экранов выполняется по правилу, предложенному Н. И. Ивановым [6]. В основу расчетов положены основные положения статистической теории акустики (диффузное и квазидиффузное звуковое поле), геометрической (понятие звукового луча и угла дифракции) и волновой (длина звуковой волны, частота) теорий акустики.

Правило расчёта позволяет разрабатывать математические модели сложных систем шумозащиты путём последовательного перехода от акустической мощности к интенсивности звука при каждом изменении характера звукового поля или импеданса препятствия в следующем виде:

$$W_{\text{ист}} \rightarrow I_1 \rightarrow W_1 \rightarrow I_2 \rightarrow W_2 \rightarrow \dots \rightarrow I_n \rightarrow W_n \rightarrow I_{\text{РТ}}, \quad (3.13)$$

где $W_{\text{ист}}$ – акустическая мощность источника шума, Вт;

I_1 – интенсивность звука при первом преобразовании (например, в результате дивергенции или отражения(й) звука), Вт/м²;

W_1 – акустическая мощность при изменении импеданса среды, Вт;

I_2 – интенсивность звука при последующем изменении импеданса препятствия, Вт/м²;

W_2 – акустическая мощность при последующем изменении импеданса среды, Вт;

I_n, W_n – интенсивность звука и акустическая мощность при n–ом изменении импеданса;

$I_{\text{РТ}}$ – интенсивность звука в РТ, Вт/м².

Для создания математической модели выполняется следующая последовательность действий:

- разрабатывается расчётная схема;
- предлагаются некоторые допущения (например, экран звуконепроницаемый);

- выполняется последовательность операций согласно (3.13);
- определяется акустическая эффективность экрана согласно (3.14).

Акустическая эффективность шумозащитного экрана определяется:

$$\Delta L_{\text{экр}} = 10 \lg \frac{I_{\text{рт}}^{6/\varepsilon}}{I_{\text{рт}}^{c/\varepsilon}}, \text{ дБ}, \quad (3.14)$$

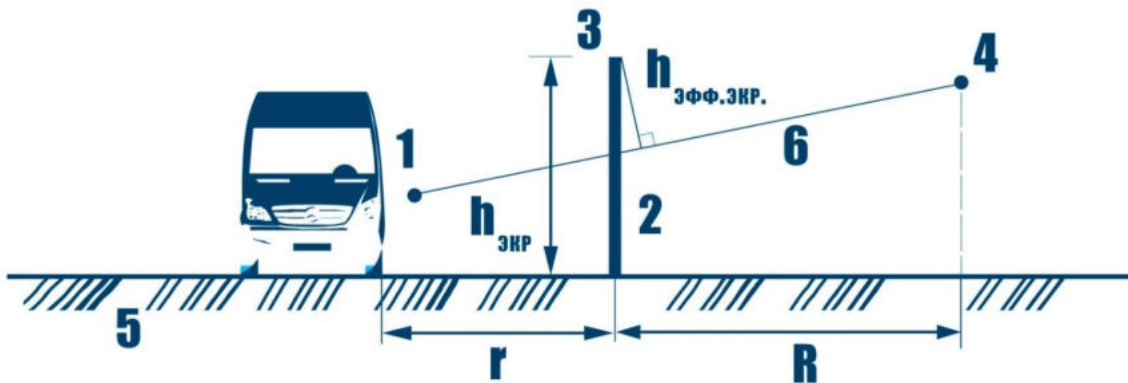
где $I_{\text{рт}}^{6/\varepsilon}$ – интенсивность звука в РТ без экрана, Вт/м²;

$I_{\text{рт}}^{c/\varepsilon}$ – интенсивность звука в РТ с установленным экраном, Вт/м².

3.4 Математические модели и теоретические исследования транспортных шумозащитных экранов

3.4.1 Прямой экран без надстройки на свободном ребре

Расчетная схема показана на рисунке 3.6.



1 – ИШ, 2 – шумозащитный экран, 3 – свободное ребро экрана, 4 – РТ, 5 – опорная поверхность, 6 – условная линия, соединяющая ИШ и РТ

Рисунок 3.6 – Расчётная схема прямого шумозащитного экрана без надстройки на свободном ребре

Основные допущения изложены выше.

Интенсивность звука в РТ от линейного источника снижается в результате дивергенции в отсутствии ШЭ:

$$I_{\text{PT}}^{6/\text{э}} = \frac{W_{\text{ист}}}{2\pi l_{\text{экp}}(R+r)} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2(R+r)}, \quad (3.15)$$

где $W_{\text{ист}}$ – акустическая мощность ИШ, Вт;

$l_{\text{экp}}$ – длина шумозащитного экрана, условно принято: длина ИШ ($l_{\text{иш}}$) равна длине $l_{\text{экp}}$ ($l_{\text{иш}} = l_{\text{экp}}$);

R – расстояние от экрана до РТ, м;

r – расстояние от ИШ до экрана, м.

Как уже было показано выше, звуковое поле перед экраном в условном объёме носит квазифи́ффузный характер и в нижней его части интенсивность падающего на экран звука определяется:

$$I_{\text{пад}} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})}{\Psi_{\text{об}} A_{\text{об}}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (3.16)$$

где $\bar{\alpha}_{\text{об}}$ – средний коэффициент звукопоглощения в условном объёме, определяемый по формуле (3.5);

$\Psi_{\text{об}}$ – коэффициент, показывающий степень диффузности звукового поля в условном объёме (таблица 3.1);

$A_{\text{об}}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения условного объёма, м², согласно формуле(3.4).

Акустическая мощность в нижней части экрана при принятом допущении, что излучение звука происходит условной полосой шириной 1 м:

$$W_{\text{н}} = I_{\text{пад}} l_{\text{экp}} \cdot 1, \text{ Вт}. \quad (3.17)$$

Интенсивность звука на верхнем свободном ребре экрана определяется в предположении дивергенции звука по высоте и определяется с условием излучения звука в $1/4$ пространства:

$$I_{\text{р}} = \frac{W_{\text{н}}}{\pi l_{\text{экp}} h_{\text{экp}}^{\text{эф}}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp}}^{\text{эф}}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.18)$$

где $h_{\text{экp}}^{\text{эф}}$ – эффективная высота шумозащитного экрана, м.

Акустическая мощность на свободном ребре экрана определяется:

$$W_{\text{р}} = I_{\text{р}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}} l_{\text{экp}}, \text{ Вт} \quad (3.19)$$

где λ – длина звуковой волны (таблица 3.4);

$\beta_{\text{экр}}^{\text{эф}}$ – коэффициент дифракции звука на верхнем свободном ребре экрана.

Таблица 3.4 – Зависимость между длиной звуковой волны (λ) и частотой звука

f, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
λ	5,4	2,7	1,36	0,68	0,34	0,17	0,085	0,04

Интенсивность звука в РТ с установленным экраном:

$$I_{\text{РТ}}^{\text{с/э}} = \frac{W_{\text{р}}}{2\pi l_{\text{экр}} R} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2R}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.20)$$

Подставим (3.15)–(3.18) в (3.19)

$$I_{\text{РТ}}^{\text{с/э}} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})l_{\text{экр}}1l_{\text{экр}}\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{экр}}}{\psi_{\text{об}}A_{\text{об}}\pi l_{\text{экр}}h_{\text{экр}}^{\text{эф}}2\pi l_{\text{экр}}R} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2h_{\text{экр}}^{\text{эф}}} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2R}. \quad (3.21)$$

После преобразования и обозначив сомножитель через А:

$$I_{\text{РТ}}^{\text{с/э}} = \frac{2W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{экр}}}{\psi_{\text{об}}A_{\text{об}}\pi h_{\text{экр}}^{\text{эф}}\pi R} A. \quad (3.22)$$

Подставим (3.14) и (3.21) в (3.13), получим акустическую эффективность шумозащитного экрана в виде:

$$\Delta L_{\text{экр1}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}} \psi_{\text{об}} A_{\text{об}} \pi h_{\text{экр}}^{\text{эф}} \pi R \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2(R+r)}}{2\pi l_{\text{экр}}(R+r)2W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{экр}} A (R+r)} \frac{R}{(R+r)}. \quad (3.23)$$

Выполним преобразования:

Подставим вместо $A_{\text{об}}$ (3.4) и после сокращений и других преобразований акустическая эффективность экрана:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{экр1}} = 10 \lg \frac{R}{(R+r)} + 10 \lg \frac{(h_{\text{экр}}\alpha_{\text{экр}} + h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}} + r\alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} + 10 \lg \psi_{\text{об}} + \\ + 10 \lg \frac{h_{\text{экр}}^{\text{эф}}}{\lambda} - 10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}^{\text{экр}}} - 3, \text{ дБ}, \end{aligned} \quad (3.24)$$

где $r_0 = 1 \text{ м}$.

Числовой коэффициент получен:

$$10 \lg \frac{\pi}{4} = -1 \text{ дБ}, -10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp}}^{\text{эф}}} \cong -2 \quad (l_{\text{экp}} \gg h_{\text{экp}}^{\text{эф}})$$

Таким образом, акустическая эффективность экрана зависит от:

- положения экрана в пространстве;
- от геометрических размеров условного объёма и его акустических свойств (второе слагаемое в формуле (3.23));
- степени приближения звукового поля в условном объёме к диффузному ($\Psi_{\text{об}}$);
- эффективной высоты экрана $h_{\text{экp}}^{\text{эф}}$;
- среднего коэффициента звукопоглощения условного объёма ($\bar{\alpha}_{\text{об}}$);
- дифракции звука на свободном ребре, определяемой экспериментально при замене $10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифp}}^{\text{экp}}}$ на ПД, дБ.

Проанализируем второй член полученной формулы.

Значение $10 \lg \frac{(h_{\text{экp}} \bar{\alpha}_{\text{экp}} + h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0}$ может изменяться в зависимости от значений $h_{\text{экp}}^{\text{эф}}$, $\bar{\alpha}_{\text{экp}}$, r примерно в диапазоне от 3 до 9. Эта зависимость приведена в таблице 3.5 и показана на рисунке 3.7.

Таблица 3.5 – Значения $10 \lg \frac{(h_{\text{экp}} \bar{\alpha}_{\text{экp}} + h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0}$

Значения $\frac{(h_{\text{экp}} \bar{\alpha}_{\text{экp}} + h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0}$	r_0							
	3	4	5	6	7	8	9	10
$10 \lg \frac{(h_{\text{экp}} \bar{\alpha}_{\text{экp}} + h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0}$, дБ	5	6	7	8	8,5	9	9,5	10

Этот член в формуле (3.23) может давать прибавку к эффективности ШЭ в пределах от 5 до 10 дБ, увеличиваясь при возрастании коэффициента звукопоглощения ($\bar{\alpha}_{\text{экр}}$) и высоты экрана ($h_{\text{экр}}$).

Зависимость $10 \lg \Psi_{\text{об}}$ показана на рисунке 3.8 для пределов практических значений $\bar{\alpha}_{\text{об}}$ от 0,2 до 0,6. Этот член обеспечивает прибавку эффективности экрана от 1 (при $\bar{\alpha}_{\text{об}} = 0,2$) до 4 дБ (при $\bar{\alpha}_{\text{об}} = 0,6$).

Для члена формулы $10 \lg \frac{h_{\text{экр}}^{\text{эф}}}{\lambda}$ зависимость от значений $h_{\text{экр}}^{\text{эф}}$ в пределах от 2 до 6 м приведены в таблице 3.7 и показаны на рисунках 3.9 и 3.10. При изменении частоты теоретически эффективность экрана возрастает на 21 дБ, например, от 0,5 (63 Гц) дБ до 21 дБ (8000 Гц) с наклоном зависимости 3 дБ на октаву (рисунок 3.9).

Таблица 3.6 – Значения $10 \lg \frac{h_{\text{экр}}^{\text{эф}}}{\lambda}$ в зависимости от $h_{\text{экр}}^{\text{эф}}$

Высота $h_{\text{экр}}^{\text{эф}}$ м	Вычисленные значения, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
2	–4	–1,3	1,7	4,7	7,6	10,6	13,7	16,7
3	–2,5	0,5	3,4	6,4	9,4	12,4	15,4	18,4
4	–1,3	1,7	4,6	7,6	10,6	13,6	16,7	19,7
5	–0,3	2,6	5,6	8,6	11,6	14,7	17,7	20,7
6	0,4	3,4	6,4	9,4	12,4	15,5	18,5	21,5

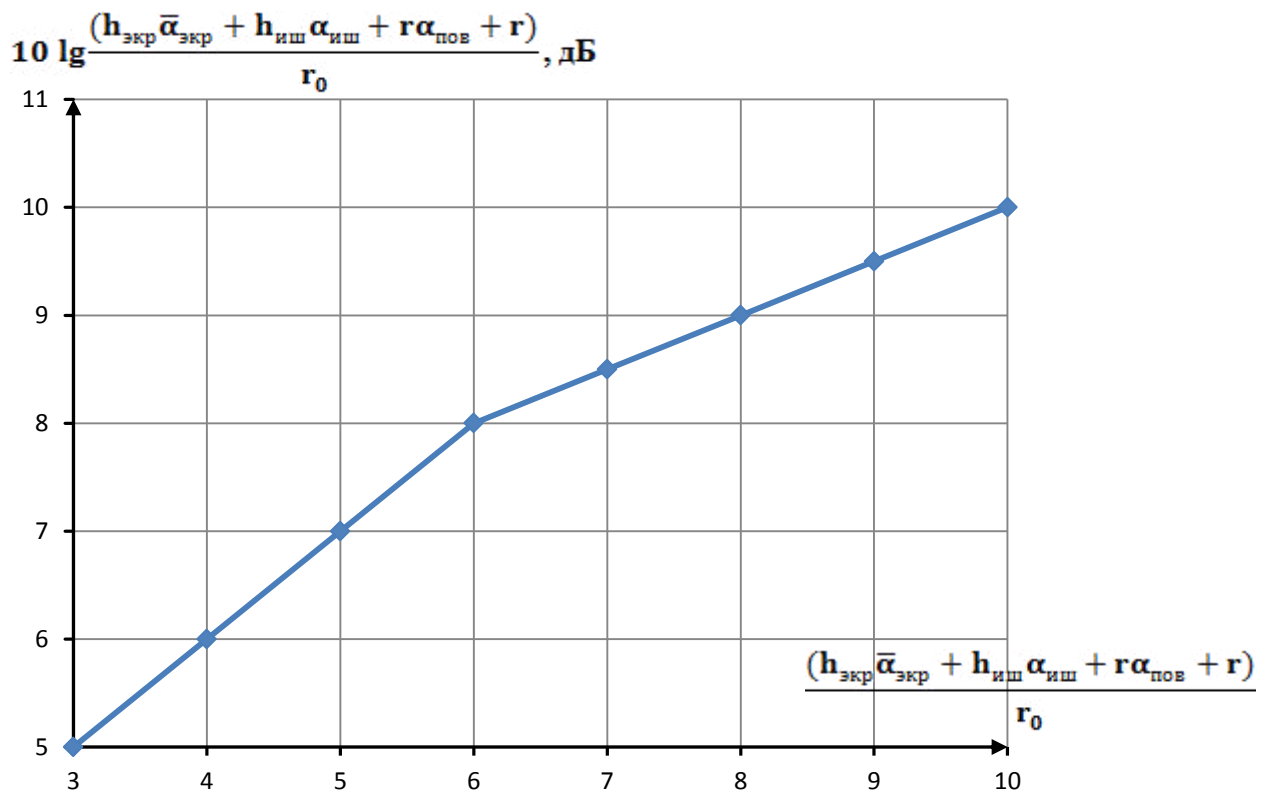


Рисунок 3.7 – Влияние геометрических свойств условного объёма

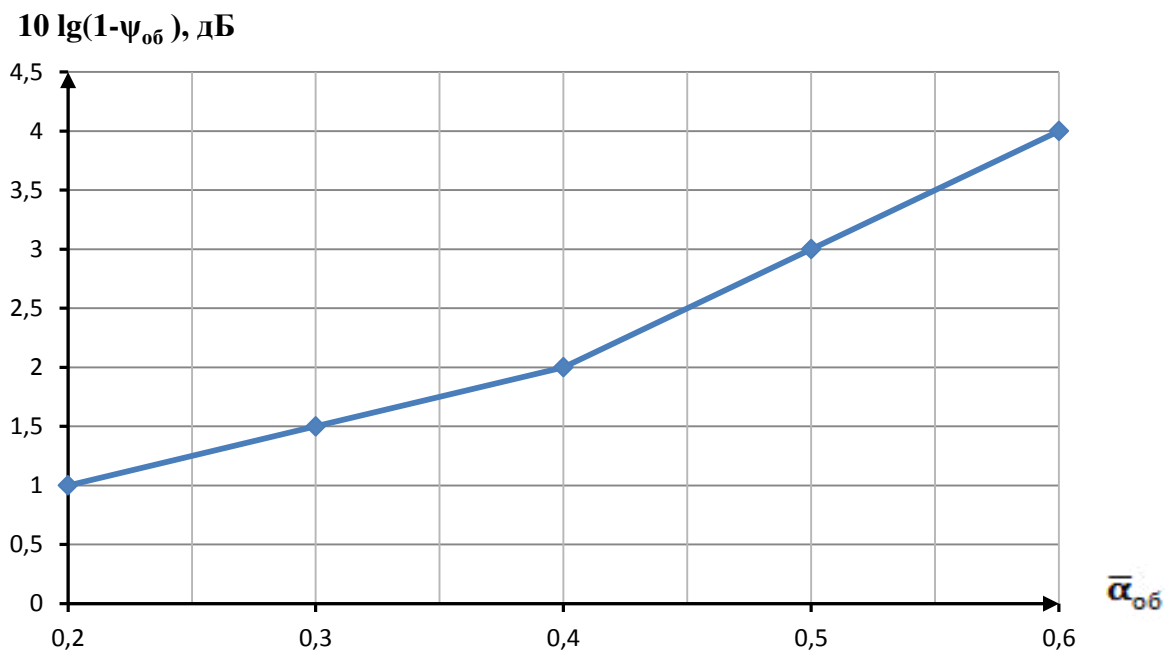


Рисунок 3.8 – Влияние акустических свойств условного объёма

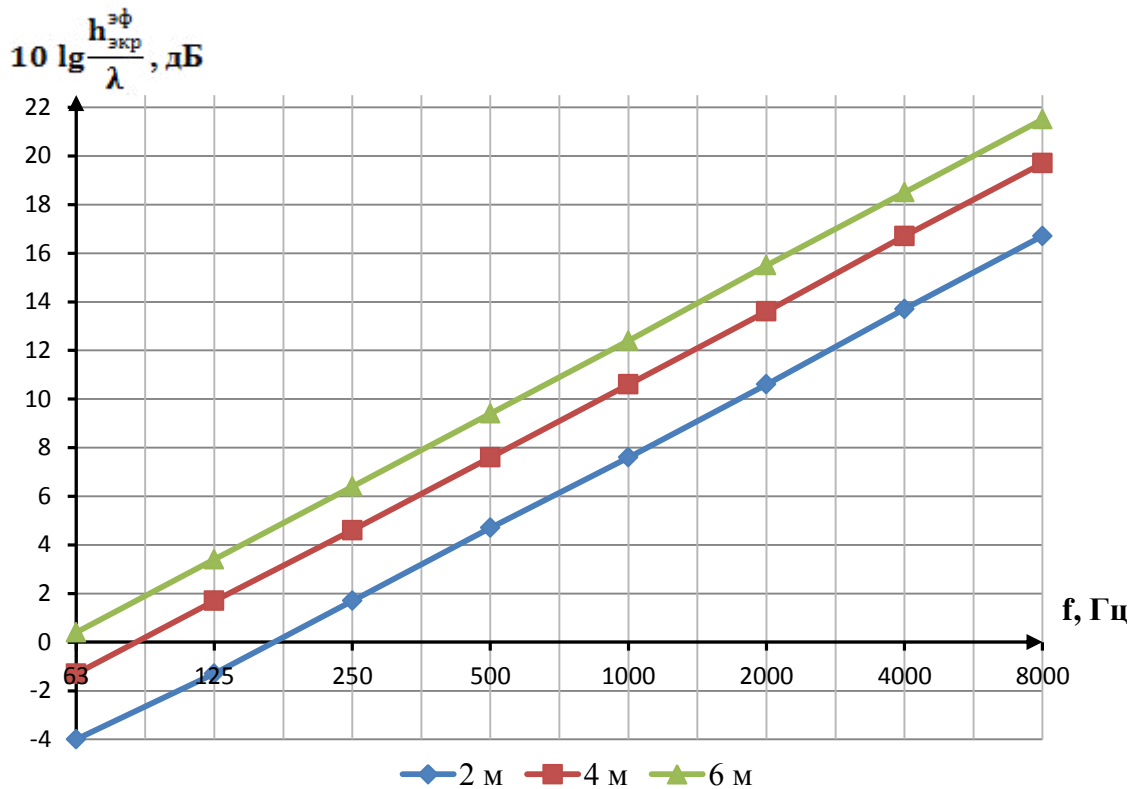


Рисунок 3.9 – Влияние $h_{\text{экр}}^{\text{эф}}$ на акустическую эффективность

Изменение эффективности с высотой имеет сложный характер. Кривая зависимости $10 \lg \frac{h_{\text{экр}}^{\text{эф}}}{\lambda}$ от $h_{\text{экр}}^{\text{эф}}$ на частоте 1000 Гц имеет вид параболы (рисунок 3.10). При изменении эффективной высоты экрана с 2 до 6 м эффективность возрастает примерно всего на 5 дБ. При этом изменении высоты от 2 до 4 м (удвоение высоты) на 3 дБ, а с 4 до 6 м всего на 2 дБ, и чем больше высота, тем меньше рост эффективности экрана (рисунок 3.10).

Результаты расчётов члена формулы $10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{06})$ приведены на рисунке 3.10. при изменении $\bar{\alpha}_{06}$ от $\bar{\alpha}_{06} = 0,2$ до $\bar{\alpha}_{06} = 0,6$ значение этого члена формулы изменяется от 1 до 4 дБ, дополнительно увеличивая акустическую эффективность шумозащитного экрана.

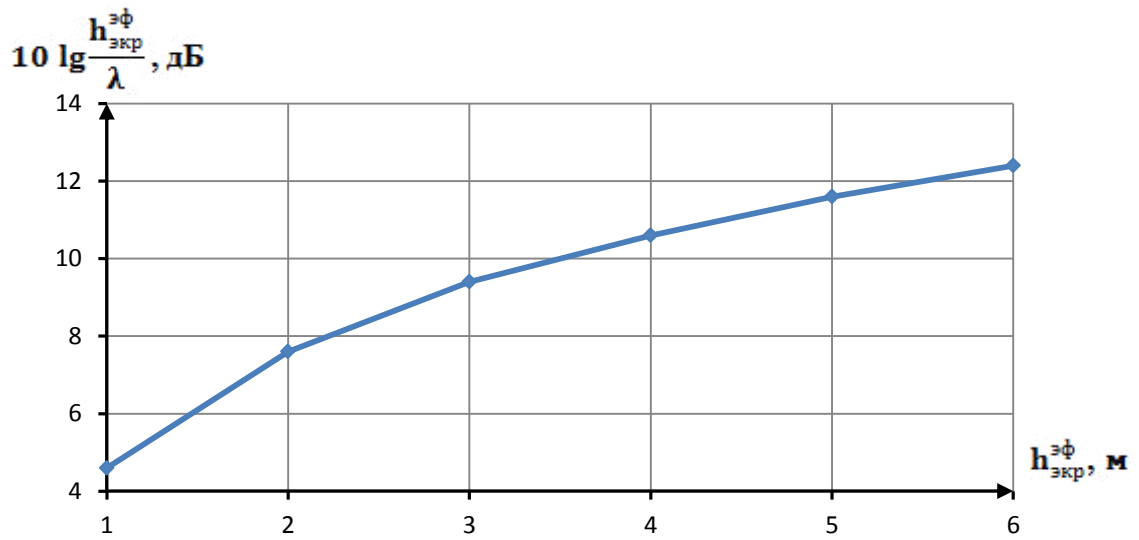


Рисунок 3.10 – Зависимость $10 \lg \frac{h_{\text{эф}}}{\lambda}$ от высоты $h_{\text{эф}}$ на частоте 1000 Гц

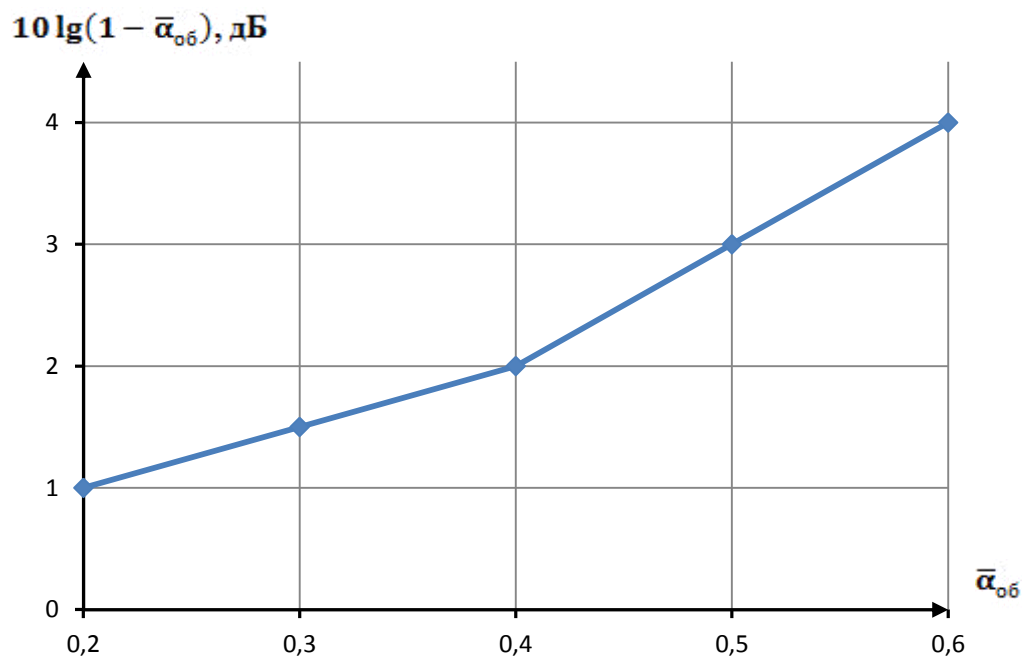
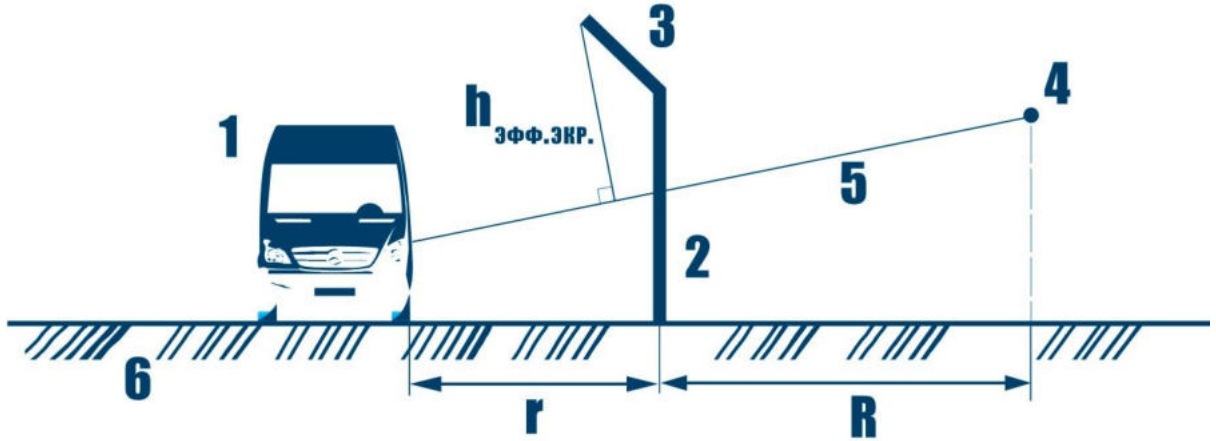


Рисунок 3.11 – Зависимость $10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}})$ от значений $\bar{\alpha}_{\text{об}}$.

3.4.2 Экран с Г-образной надстройкой на верхнем свободном ребре

Расчётная схема показана на рисунке 3.12



1 – ИШ, 2 – вертикальная часть ШЭ, 3 – полка, расположенная под углом к вертикальной части, 4 – РТ, 5 – условная линия, соединяющая ИШ и РТ, 6 – опорная поверхность

Рисунок 3.12 – Расчётная схема Г-образного шумозащитного экрана

Интенсивность звука, падающего на экран в его нижней части:

$$I_{\text{пад2}} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}'_{\text{об}})}{\Psi'_{\text{об}} A'_{\text{об}}}, \quad (3.25)$$

$$\bar{\alpha}'_{\text{об}} = \frac{l_{\text{экр}}(h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экр}}\bar{\alpha}_{\text{экр}} + b_{\text{п}}\alpha_{\text{экр}} + r\alpha_{\text{пов}} + r)}{l_{\text{экр}}(h_{\text{экр}} + h_{\text{иш}} + b_{\text{п}} + r)}, \quad (3.26)$$

$$A'_{\text{об}} = l_{\text{экр}}(h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экр}}\bar{\alpha}_{\text{экр}} + b_{\text{п}}\alpha_{\text{экр}} + r\alpha_{\text{пов}} + r), \quad (3.27)$$

где $b_{\text{п}}$ – ширина полки, м.

Акустическая мощность в нижней части экрана:

$$W_{\text{н}} = I_{\text{пад1}} l_{\text{экр}} \cdot 1. \quad (3.28)$$

Интенсивность звука на верхнем ребре – конце полки Г-образного экрана:

$$I'_{\text{р}} = \frac{W_{\text{н}}}{2\pi l_{\text{экр}} h_{\text{экр1}}^{\text{эф}}} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2h_{\text{экр1}}^{\text{эф}}}. \quad (3.29)$$

где $h_{\text{экр1}}^{\text{эф}}$ – перпендикуляр, опущенный из свободной части полки (новое свободное ребро экрана) на условную линию, соединяющую ИШ и РТ.

Звуковая мощность на свободном ребре:

$$W'_{\text{р}} = I'_{\text{р}} \lambda \beta_{\text{дифр1}}^{\text{экр}}, \quad (3.30)$$

где $\beta_{\text{дифр1}}^{\text{экр}}$ – коэффициент дифракции на новом свободном ребре – конце полки Г-образного экрана.

Интенсивность звука в РТ:

$$I_{\text{PT}2}^{c/\varepsilon} = \frac{W'_p}{2\pi l_{\text{экp}} R_1} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R_1}, \quad (3.31)$$

где R_1 – расстояние от ребра – конца полки до РТ, м.

Подставим (3.24), (3.27)–(3.29) в (3.30)

$$I_{\text{PT}}^{c/\varepsilon} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}'_{\text{об}})l_{\text{экp}}1l_{\text{экp}}\lambda\beta_{\text{дифр1}}^{\text{экp}}}{\Psi'_{\text{об}}A'_{\text{об}}\pi l_{\text{экp}}h_{\text{экp1}}^{\text{эф}}2\pi l_{\text{экp}}R_1} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp1}}^{\text{эф}}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R_1} \quad (3.32)$$

После преобразования и обозначив A_1 , сомножитель:

$$I_{\text{PT}}^{c/\varepsilon} = \frac{2W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}'_{\text{об}})\lambda\beta_{\text{дифр1}}^{\text{экp}}}{\Psi'_{\text{об}}A'_{\text{об}}\pi h_{\text{экp1}}^{\text{эф}}\pi R_1} A_1. \quad (3.33)$$

Подставим (3.15) и (3.33) в (3.14), получим акустическую эффективность шумозащитного экрана

$$\Delta L_2^{\text{экp}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}} \Psi'_{\text{об}} A'_{\text{об}} \pi h_{\text{экp1}}^{\text{эф}} \pi R_1 \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2(R+r)}}{2\pi l_{\text{экp}}(R+r)4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}'_{\text{об}})\lambda\beta_{\text{дифр1}}^{\text{экp}} A_1} \text{ дБ} \quad (3.34)$$

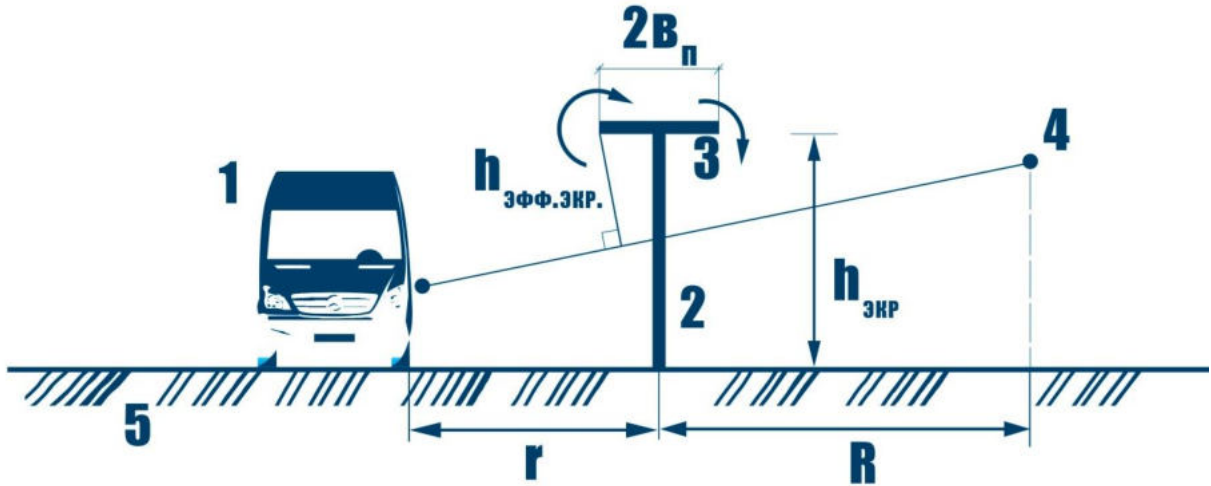
После преобразований подставим вместо $A'_{\text{об}}$ значения (3.27) и логарифмирования:

$$\begin{aligned} \Delta L_2^{\text{экp}} = & 10 \lg \frac{R}{(R+r)} + 10 \lg \frac{(h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экp}}\alpha_{\text{экp}} + b_{\text{п}}\alpha_{\text{экp}} + r\alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} + \\ & + 10 \lg \Psi'_{\text{об}} + 10 \lg \frac{h_{\text{экp1}}^{\text{эф}}}{\lambda} - 10 \lg(1 - \bar{\alpha}'_{\text{об}}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр1}}^{\text{экp}}} - 3. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Анализ формулы (3.33) показывает, что дополнительное увеличение эффективности экрана за счёт увеличения $h_{\text{экp}}^{\text{эф}}$ приблизительно в пределах 0,3–1 м в зависимости от длины полки и угла её наклона. Это обеспечивает дополнительную эффективность Г-образных экранов от 0,5 до 2,0 дБ за счёт увеличения эффективной высоты Г-образного экрана.

3.4.3 Экран с Т-образной надстройкой на свободном ребре

Расчётная схема приведена на рисунке 3.13



1 – ИШ, 2 – вертикальный экран, 3 – надстройка в виде горизонтальной полки, симметричной по отношению к вертикальному экрану, 4 – РТ, 5 – опорная поверхность

Рисунок 3.13 – Расчётная схема экрана с Т-образной надстройкой на верхнем ребре

Принимаем дополнительное допущение, что звук, дифрагировав через свободную часть полки (со стороны ИШ), проходит наружную часть полки (интенсивность звука уменьшается за счёт дивергенции), а затем дифрагируя через противоположное свободное ребро полки, излучается в РТ.

Формулы, описывающие преобразование звука до первого процесса дифракции на свободном ребре полки со стороны ИШ (3.25)–(3.29).

Звуковая мощность на этом ребре:

$$W'_p = I'_p \lambda \beta_{\text{дифр1}}^{\text{экр}} l_{\text{экр}}, \quad (3.36)$$

где $\beta_{\text{дифр1}}^{\text{экр}}$ – коэффициент дифракции на новом свободном ребре со стороны ИШ.

Интенсивность звука на противоположном свободном ребре:

$$I''_{\text{РТ2}} = \frac{W'_p}{\pi 2B_n l_{\text{экр}}} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{4B_n}, \quad (3.37)$$

где $2B_n$ – длина горизонтальной полки, м.

Акустическая мощность на противоположном свободном ребре:

$$W''_p = I''_p \lambda \beta_{\text{дифр2}}^{\text{экр}}, \quad (3.38)$$

где $\beta_{\text{дифр2}}^{\text{экр}}$ – коэффициент дифракции на втором свободном ребре.

Интенсивность звука в РТ с экраном:

$$I_{\text{РТЗ}}^{c/\text{э}} = \frac{W''_{\text{р}}}{2\pi l_{\text{экp}} R} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R}, \quad (3.39)$$

где R – расстояние от экрана до РТ, м.

Подставим (3.24), (3.27), (3.28), (3.35)–(3.37) в (3.38):

$$I_{\text{РТЗ}}^{c/\text{э}} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}'_{\text{об}})l_{\text{экp}}\lambda\beta_{\text{дифр1}}^{\text{экp}}l_{\text{экp}}\lambda\beta_{\text{дифр2}}^{\text{экp}}}{\Psi'_{\text{об}}A'_{\text{об}}\pi l_{\text{экp}}h_{\text{экp1}}^{\text{эф}}2\pi l_{\text{экp}}R\pi 2v_{\text{п}}l_{\text{экp}}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp1}}^{\text{эф}}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{4v_{\text{п}}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R}. \quad (3.40)$$

Выполнив упрощения и обозначив сомножитель через A_2 :

$$I_{\text{РТЗ}}^{c/\text{э}} = \frac{W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}'_{\text{об}})\lambda\beta_{\text{дифр1}}^{\text{экp}}\lambda\beta_{\text{дифр2}}^{\text{экp}}}{\Psi'_{\text{об}}A'_{\text{об}}\pi h_{\text{экp1}}^{\text{эф}}\pi R\pi v_{\text{п}}} A_2. \quad (3.41)$$

Подставим (3.13) и (3.39) в (3.1):

$$\Delta L_3^{\text{экp}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}} \Psi'_{\text{об}} l_{\text{экp}} (h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экp}} \alpha_{\text{экp}} + v_{\text{п}} \alpha_{\text{экp}} + r \alpha_{\text{пов}} + r) \pi h_{\text{экp1}}^{\text{эф}} \pi^2 R v_{\text{п}}}{2\pi l_{\text{экp}} (R+r) 4W_{\text{ист}} (1-\bar{\alpha}'_{\text{об}}) \lambda \beta_{\text{дифр1}}^{\text{экp}} \lambda \beta_{\text{дифр2}}^{\text{экp}} A_2} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2(R+r)}, \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} \Delta L_3 = 10 \lg \frac{R}{(R+r)} + 10 \lg \frac{(h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экp}} \alpha_{\text{экp}} + v_{\text{п}} \alpha_{\text{экp}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} + \\ + 10 \lg \Psi'_{\text{об}} + 10 \lg \frac{h_{\text{экp1}}^{\text{эф}}}{\lambda} + 10 \lg \frac{2v_{\text{п}}}{\lambda} + \\ + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр1}}^{\text{экp}}} + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр2}}^{\text{экp}}} - 10 \lg (1 - \bar{\alpha}'_{\text{об}}) + 3, \text{ дБ}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$10 \lg \frac{\pi^2}{2} = 7 \text{ дБ};$$

$$10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp1}}^{\text{эф}}} = -2 \text{ дБ};$$

$$10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{4v_{\text{п}}} = -2 \text{ дБ}.$$

Эффективность шумозащитного экрана увеличилась за счёт снижения интенсивности звука на горизонтальной полке и увеличения числовой добавки (вместо -3 дБ (3.21) получено $+3$ дБ).

Вычисленные значения $10 \lg \frac{v_{\text{п}}}{\lambda}$ в пределах $v_{\text{п}} = 0,5\text{--}2$ м приведены в таблице 3.7 и показаны на рисунке 3.14.

Таблица 3.7 – Значения $10 \lg \frac{B_{\Pi}}{\lambda}$ в зависимости от B_{Π}

Ширина B_{Π} , м	Вычисленное значение $10 \lg \frac{B_{\Pi}}{\lambda}$ в зависимости от частоты f , Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0,5	–10,3	–7,3	–4,3	–1,3	1,7	4,7	7,7	10,7
1,0	–7,3	–4,3	–1,3	1,6	4,6	7,6	10,7	13,7
2,0	–4,3	–1,4	1,7	4,7	7,6	10,6	13,7	16,7

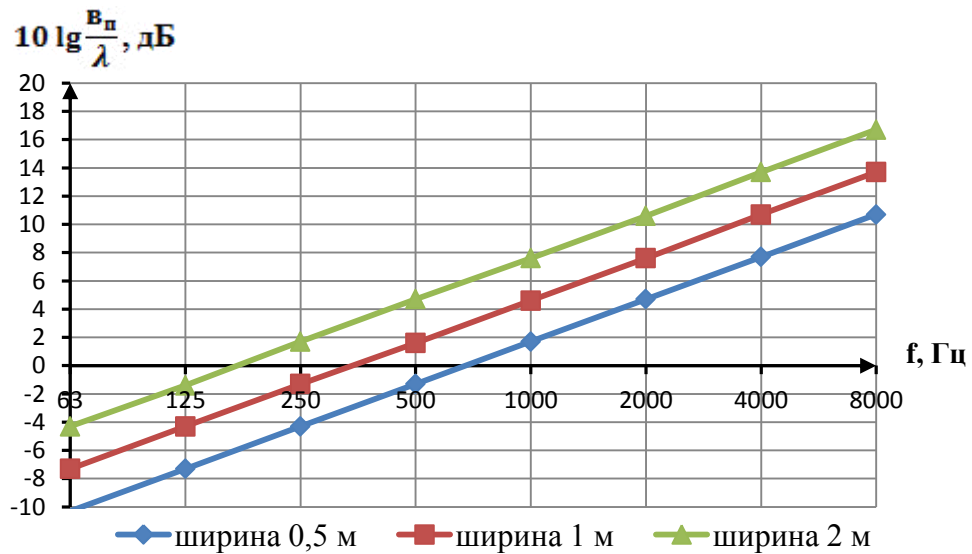
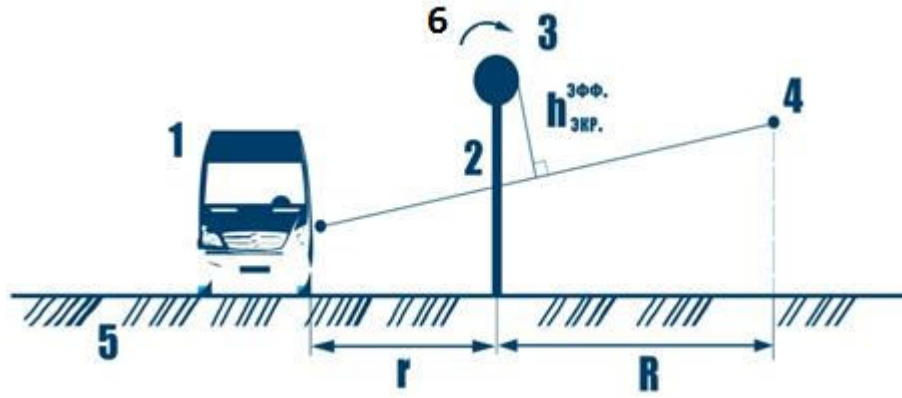


Рисунок 3.14 – Полученные значения $10 \lg \frac{B_{\Pi}}{\lambda}$ в зависимости от ширины B_{Π}

Анализ показывает, что увеличение эффективности шумозащитного экрана за счёт Т-образной надстройки на свободном ребре не превышает 2 дБА при $B_{\Pi}=0,5$ м и 7–8 дБА при $B_{\Pi}=2$ м (на частоте 1000 Гц). Отметим, что отрицательные значения $10 \lg \frac{B_{\Pi}}{\lambda}$ в низкочастотном диапазоне учитывать при расчётах не следует, т.к. они не имеют физического смысла.

3.4.4 Шумозащитный экран с антидифрактором на свободном ребре

Расчётная схема приведена на рисунке 3.15.



1 – ИШ, 2 – экран, 3 – антидифрактор, 4 – РТ, 5 – опорная поверхность; 6 – дифракция на антидифракторе

Рисунок 3.15 – Расчётная схема шумозащитного экрана с антидифрактором на свободном ребре

Принимаем дополнительное допущение, что антидифрактор работает как отдельное звукопоглощающее устройство, имеющее коэффициент звукопоглощения $\alpha_{a/d}$.

Описывая звуковые процессы для антидифрактора, воспользуемся формулами (3.16)–(3.22).

Акустическая мощность на свободном ребре:

$$W_p = I_p \lambda \beta_{\text{дифр}}^{a/d} l_{\text{экр}}, \quad (3.44)$$

где $\beta_{\text{дифр}}^{a/d}$ – коэффициент дифракции с надстройкой свободном ребре в виде антидифрактора.

Интенсивность звука в РТ с учётом дополнительного поглощения звука на свободном ребре экрана:

$$I_{\text{РТ4}}^{c/\varepsilon} = \frac{W_p (1 - \alpha_{a/d})}{2\pi l_{\text{экр}} R} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2R}, \quad (3.45)$$

Подставим (3.11)–(3.14), (3.39), в (3.40):

$$I_{\text{РТ4}}^{c/\varepsilon} = \frac{4W_{\text{ист}}(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}})l_{\text{экр}}l_{\text{экр}}\lambda\beta_{\text{дифр1}}^{a/d}l_{\text{экр}}\lambda\beta_{\text{дифр2}}^{\text{экр}}}{\psi_{\text{об}}A_{\text{об}}\pi l_{\text{экр}}h_{\text{эф}}^{\text{эф}}2\pi l_{\text{экр}}R} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2h_{\text{эф}}^{\text{эф}}} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2R}. \quad (3.46)$$

После упрощений и обозначив сомножитель A_3 :

$$I_{\text{РТ4}}^{c/\varepsilon} = \frac{2W_{\text{ист}}(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}})\lambda\beta_{\text{дифр}}^{a/d}(1 - \alpha_{a/d})}{\psi_{\text{об}}A_{\text{об}}\pi h_{\text{эф}}^{\text{эф}}\pi R} A_3. \quad (3.47)$$

Подставим (3.14) и (3.46) в (3.13):

$$\Delta L_4^{\text{экр}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}} \Psi_{\text{об}} l_{\text{экр}} (h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экр}} \alpha_{\text{экр}} + r \alpha_{\text{пов}} + r) \pi h_{\text{экр}}^{\text{эф}} \pi R}{2 \pi l_{\text{экр}} (R+r) 2 W_{\text{ист}} (1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}) \lambda \beta_{\text{дифр}}^{a/d} (1 - \alpha_{a/d}) A_3} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2(R+r)}. \quad (3.48)$$

Сделав аналогичные преобразования как в (3.23) получим:

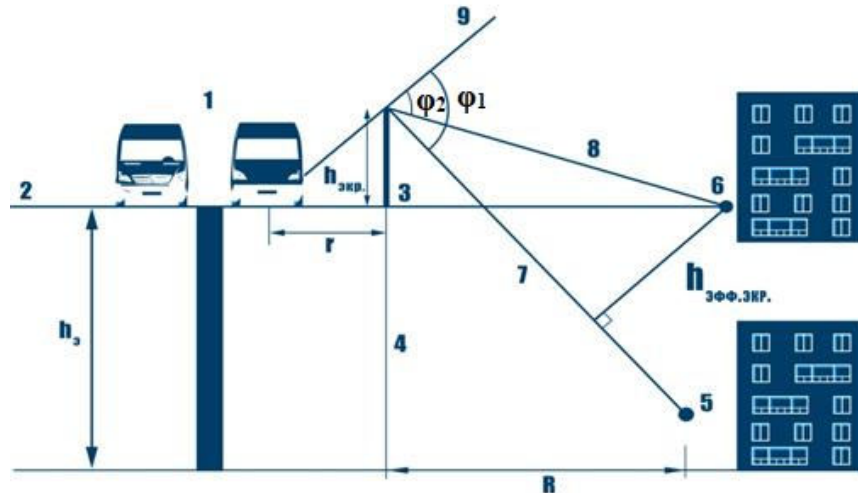
$$\Delta L_4 = 10 \lg \frac{R}{(R+r)} + 10 \lg \frac{(h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экр}} \alpha_{\text{экр}} + \frac{V_a}{D} \alpha_a + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} +$$

$$+ 10 \lg \Psi_{\text{об}} + 10 \lg \frac{h_{\text{экр}}^{\text{эф}}}{\lambda} - 10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}) - 10 \lg(1 - \alpha_{a/d}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}^{a/d}} - 3 \text{ дБ}. \quad (3.49)$$

В формуле (3.48) увеличение эффективности экрана происходит в основном за счёт члена $10 \lg(1 - \alpha_{a/d})$. Для анализа можно воспользоваться данными, приведёнными на рисунке 3.10. Значения $\alpha_{a/d}$ на частоте 1000 Гц составляет 0,4–0,5, поэтому дополнительная эффективность за счёт антидифрактора составляет 2–3 дБА.

3.4.5 Вертикальный экран, установленный на эстакаде

Расчётная схема показана на рисунке 3.16.



- 1 – ИШ, 2 – опорная поверхность на эстакаде, 3 – шумозащитный экран, 4 – эстакада, 5 – расчётная точка, 6 – условная РТ, 7 – линия, соединяющая вершину экрана с РТ, 8 – условная линия, соединяющая вершину экрана с условной РТ, 9 – линия, соединяющая ИШ и вершину экрана, установленного на эстакаде, ϕ_1 – угол между линиями 7 и 9, ϕ_2 – угол между линиями 8 и 9.

Рисунок 3.16 – Расчётная схема экрана, установленного на эстакаде

Дополнительное допущение: значение эффективной высоты экрана определяется с учётом высоты эстакады ($h_э$), на которой он расположен.

Интенсивность звука в РТ без установленного экрана:

$$I_{\text{рт}}^{б/э} = \frac{W_{\text{ист}}}{2\pi l_{\text{экp}}(r + \sqrt{h_э^2 + R_1^2})} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2(r + \sqrt{h_э^2 + R_1^2})}, \quad (3.50)$$

Где $h_э$ – высота эстакады;

R_1 – расстояние от эстакады до РТ.

Интенсивность падающего на экран звука:

$$I_{\text{пад}} = \frac{4W_{\text{ист}}(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}})}{\Psi_{\text{об}} A_{\text{об}}}. \quad (3.51)$$

Акустическая мощность в нижней части экрана:

$$W_{\text{н}} = I_{\text{пад}} l_{\text{экp}}. \quad (3.52)$$

Интенсивность звука на свободно ребре экрана:

$$I_{\text{р}} = \frac{W_{\text{н}}}{2\pi l_{\text{экp}} h_{\text{экp3}}^{\text{эф}}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp3}}^{\text{эф}}}, \quad (3.53)$$

где $h_{\text{экp3}}^{\text{эф}}$ – эффективная высота экрана с учётом высоты эстакады ($h_э$), на которой установлен экран.

$$h_{\text{экp3}}^{\text{эф}} = h_{\text{экp}} + h_э \sin(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (3.54)$$

где φ_1 – угол между лучом от ИШ до свободного ребра ШЭ и от свободного ребра ШЭ до РТ;

φ_2 – угол между лучом от ИШ до свободного ребра ШЭ и лучом от свободного ребра до условной РТ, которая бы находилась вблизи защищаемого объекта, если бы эстакада отсутствовала бы.

Акустическая мощность на свободном ребре:

$$W_{\text{р}} = I_{\text{р}} l_{\text{экp}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}}. \quad (3.55)$$

Интенсивность звука в РТ с экраном:

$$I_{\text{рт5}}^{с/э} = \frac{W_{\text{р}}}{\pi l_{\text{экp}} \sqrt{(h_э + h_{\text{экp}})^2 + R^2}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2\sqrt{(h_э + h_{\text{экp}})^2 + R^2}}. \quad (3.56)$$

Подставим (3.50)–(3.54) в (3.55):

$$I_{\text{рт5}}^{c/\varepsilon} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})l_{\text{экp}}1l_{\text{экp}}\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}}}{\Psi_{\text{об}}A_{\text{об}}\pi l_{\text{экp}}[h_{\text{экp}}+h_{\text{э}}\sin(\varphi_1-\varphi_2)]2\pi l_{\text{экp}}\sqrt{(h_{\text{э}}+h_{\text{экp}})^2+R^2}} \times$$

$$\times \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2[h_{\text{экp}}+h_{\text{э}}\sin(\varphi_1-\varphi_2)]} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2\sqrt{(h_{\text{э}}+h_{\text{экp}})^2+R^2}}. \quad (3.57)$$

После преобразований и обозначив сомножитель A_4 :

$$I_{\text{рт5}}^{c/\varepsilon} = \frac{2W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}}A_4}{\Psi_{\text{об}}A_{\text{об}}\pi[h_{\text{экp}}+h_{\text{э}}\sin(\varphi_1-\varphi_2)]\pi\sqrt{(h_{\text{э}}+h_{\text{экp}})^2+R^2}} \quad (3.58)$$

Подставим (3.50) и (3.51) в (3.14), получим акустическую эффективность шумозащитного экрана:

$$\Delta L_{\text{экp5}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}}\Psi_{\text{об}}l_{\text{экp}}(h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}}+h_{\text{экp}}\alpha_{\text{экp}}+r\alpha_{\text{пов}}+r)}{2\pi l_{\text{экp}}(r+\sqrt{h_{\text{э}}^2+R^2})2W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})} \times$$

$$\times \frac{\pi[h_{\text{экp}}+h_{\text{э}}\sin(\varphi_1-\varphi_2)]\pi\sqrt{(h_{\text{э}}+h_{\text{экp}})^2+R^2}}{\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}}A_4} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2(r+\sqrt{h_{\text{э}}^2+R^2})}. \quad (3.59)$$

Проведя упрощения и прологарифмировав получим:

$$\Delta L_{\text{экp5}} = 10 \lg \frac{(h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экp}}\alpha_{\text{экp}} + r\alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} + 10 \lg \Psi_{\text{об}} +$$

$$+ 10 \lg \frac{h_{\text{экp}}+h_{\text{э}}\sin(\varphi_1-\varphi_2)}{\lambda} - 10 \lg(1-\bar{\alpha}_{\text{об}}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}}} - 3, \text{ дБ}. \quad (3.60)$$

При этом принято: $10 \lg \frac{\pi}{4} = -1 \text{ дБ}$

$$10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2[h_{\text{экp}}+h_{\text{э}}\sin(\varphi_1-\varphi_2)]} = -2 \text{ дБ};$$

$$r + \sqrt{h_{\text{э}}^2 + R^2} \approx \sqrt{(h_{\text{э}} + h_{\text{экp}})^2 + R_1^2}, \text{ так как } R \gg r, h_{\text{э}} \gg h_{\text{экp}}$$

Основной член, влияющий на дополнительную эффективность сооружения эстакада-шумозащитный экран – это третий член в формуле $10 \lg \frac{h_{\text{экp}}+h_{\text{э}}\sin(\varphi_1-\varphi_2)}{\lambda}$. Проанализируем его значения в пределах разницы углов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ от 10° до 60° , приняв значения эффективной высоты экрана $h_{\text{экp}} + h_{\text{э}}\sin(\varphi_1 - \varphi_2)$ от 5 до 50 м. Данные расчётов приведены в таблице 3.8 и на рисунках 3.17, 3.18.

Таблица 3.8 – Вычисленные значения $10 \lg \frac{h_{\text{экp}} + h_3 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\lambda}$

Значения $h_{\text{экp}} + h_3 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$	Вычисленное значение, в дБ, в зависимости от частоты f, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
5	−0,3	2,6	5,6	8,7	11,7	14,7	17,7	20,7
10	2,7	5,7	8,7	11,7	14,7	17,7	20,7	23,7
15	4,4	7,4	10,4	13,4	16,4	19,4	22,4	25,4
20	5,7	8,7	11,7	14,7	17,7	20,7	23,7	26,7
30	7,4	10,4	13,4	16,4	19,4	22,4	25,4	28,4
40	8,7	11,7	14,7	17,7	20,7	23,7	26,7	29,7
50	9,7	12,7	15,7	18,7	21,7	24,7	27,7	30,7

Анализ рисунков 3.17, 3.18 показывает, что третий член в формуле (3.49) при изменении $h_{\text{экp}} + h_3 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$ от 5 до 50 м, то есть при увеличении в 10 раз увеличивается на 10 дБ. При этом закономерность увеличения на 3 дБ (дБА) при каждом удвоении эффективной высоты экрана. В практических пределах эффективной высоты (до 50 м) максимальное увеличение не свыше 10 дБ (дБА).

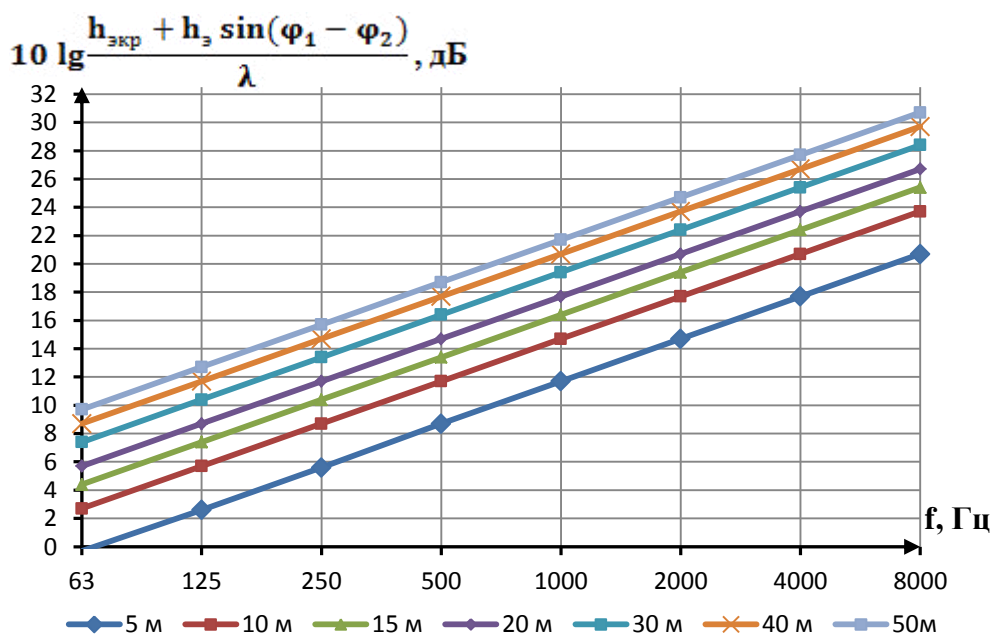


Рисунок 3.17 – Зависимость $10 \lg \frac{h_{\text{экp}} + h_3 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\lambda}$ от значений $h_{\text{экp}} + h_3 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$

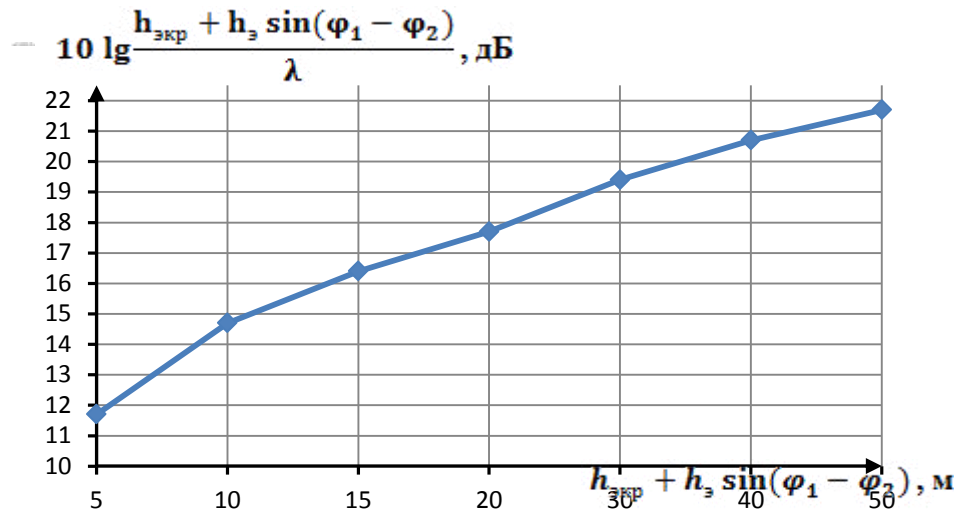


Рисунок 3.18 – Зависимость $10 \lg \frac{h_{\text{экp}} + h_{\text{э}} \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\lambda}$ в зависимости от значений $h_{\text{экp}} + h_{\text{э}} \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$ на частоте 1000 Гц

Анализ показывает нелинейный характер увеличения эффективности экрана в дБА (рисунок 3.18) при увеличении эффективной высоты. Полученная кривая имеет вид параболы. При увеличении $h_{\text{экp}} + h_{\text{э}} \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$ от 5 до 50 м эффективность экранов возрастет на 10 дБ. Представляет интерес отдельно рассмотреть зависимость третьего члена формулы в зависимости от разницы углов φ_1 и φ_2 , то есть $\sin(\varphi_1 - \varphi_2)$ (таблица 3.9). Эффективность экрана увеличивается при увеличении разницы углов $\varphi_1 - \varphi_2$ в пределах выбранных значений от 3,5 дБА (10°) до 6 дБА (60°). Наибольшие изменения получены в диапазоне разницы углов 10° – 40° (рост от 4 дБА до 5 дБА), а при дальнейшем увеличении угла этот рост не превышает 1 дБА (рисунок 3.19). Полученные выводы имеют важное практическое значение при установке шумозащитных экранов на эстакаде.

Таблица 3.9 – Вычисленные значения $10 \lg \frac{h_{\text{экp}} + h_{\text{э}} \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\lambda}$ при изменении $\varphi_1 - \varphi_2$ для разных $h_{\text{э}}$

Высота $h_{\text{э}}$, м	Вычисленное значение для частоты 1000 Гц, в дБА					
	10°	20°	30°	40°	50°	60°
5	9,2	10,4	11,2	11,8	12,3	12,7

Продолжение таблицы 3.9

Высота h_3 , м	Вычисленное значение для частоты 1000 Гц, в дБА					
	10°	20°	30°	40°	50°	60°
15	11,2	13,1	14,5	15,3	16,0	16,5
25	12,6	14,9	16,3	17,2	17,9	18,4
50	14,9	17,5	19,0	20,0	20,7	21,3

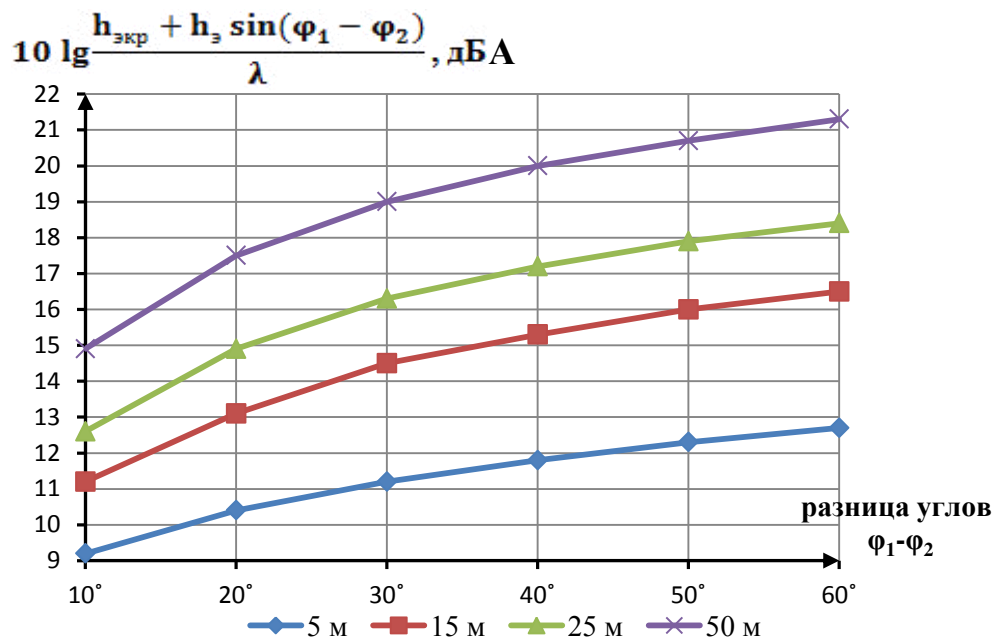
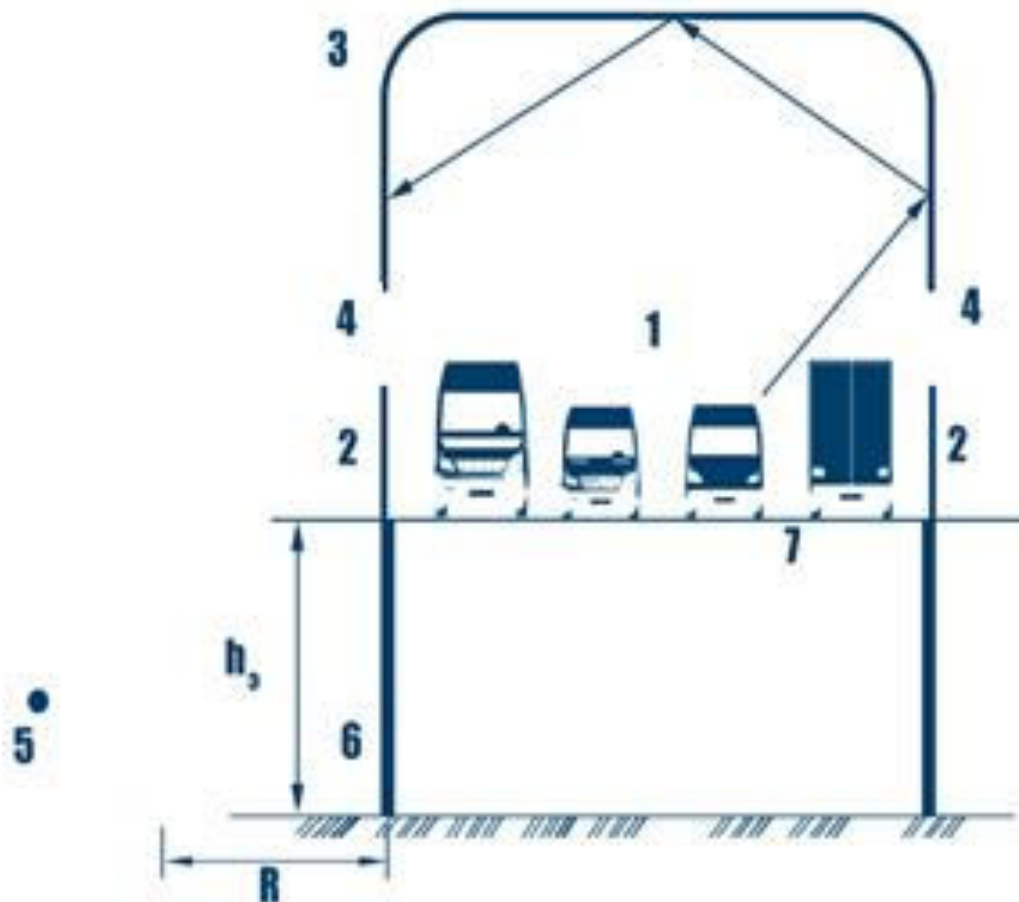


Рисунок 3.19 – Вычисленная зависимость $10 \lg \frac{h_{\text{экp}} + h_3 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\lambda}$ на частоте 1000 Гц при различной разнице углов $\varphi_1 - \varphi_2$ при различных значениях высоты эстакады (h_3)

Анализ полученных данных позволяет оценить роль эстакады и её расположения по отношению к расчётной точке. Эффективность экрана увеличивается при увеличении разницы углов $\varphi_1 - \varphi_2$ в пределах выбранных значений от 3,5 дБА (10°) до 6 дБА (60°). Наибольшие изменения получены в диапазоне разницы углов 10°–40° (рост от 4 дБА до 5 дБА), а при дальнейшем увеличении угла этот рост не превышает 1 дБА. Полученные выводы имеют важное практическое значение при установке шумозащитных экранов на эстакаде.

3.4.6 Экран, установленный в акустически необработанной галерее

Расчётная схема приведена на рисунке 3.20.



1 – ИШ, 2 – экран, 3 – акустически необработанная галерея, 4 – проём,
5 – расчётная точка, 6 – эстакады, 7 – опорная поверхность

Рисунок 3.20 – Расчётная схема экрана, установленного в галерее

Основное допущение состоит в том, что в акустически необработанной галерее создаётся диффузное звуковое поле (однородное и изотропное) вместо, рассматриваемого ранее, квазидиффузного, где имеет место изотропность звука, а интенсивность звукового поля снижается с ростом высоты экрана. В диффузном звуковом поле звук не дифрагирует через верхнее свободное ребро экрана, а излучается наружу через проём.

Интенсивность падающего на проём высотой $h_{\text{пр}}^{6/3}$ в отсутствии экрана:

$$I_{\text{пад}}^{\delta/\varepsilon} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon})}{\Psi_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon} A_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon}}, \quad (3.61)$$

В формуле (3.61) члены $A_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon}$ и $\bar{\alpha}_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon}$ представляют собой следующие выражения:

$$A_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon} = l_{\text{экp}}(h_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\text{пов}} + 2h_{\text{пр}}^{\delta/\varepsilon}), \quad (3.62)$$

$$\bar{\alpha}_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon} = \frac{l_{\text{экp}}(2h_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\text{пов}} + 2h_{\text{пр}}^{\delta/\varepsilon})}{2l_{\text{экp}}(h_{\Gamma} + b_{\Gamma} + h_{\text{пр}}^{\delta/\varepsilon})}, \quad (3.63)$$

где h_{Γ} – высота части галереи под проёмом, м;

α_{Γ} – коэффициент звукопоглощения материала галереи;

b_{Γ} – ширина галереи;

$\alpha_{\text{пов}}$ – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности;

$h_{\text{пр}}^{\delta/\varepsilon}$ – высота проёма без установленного экрана, м.

Акустическая мощность проёма:

$$W_{\text{пад}}^{\delta/\varepsilon} = I_{\text{пад}}^{\delta/\varepsilon} l_{\text{экp}} h_{\text{пр}}^{\delta/\varepsilon}. \quad (3.64)$$

Интенсивность звука в РТ без установленного экрана:

$$I_{\text{рт}}^{\delta/\varepsilon} = \frac{W_{\text{пр}}^{\delta/\varepsilon}}{2\pi l_{\text{экp}} \sqrt{h_{\varepsilon}^2 + R_2^2}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2\sqrt{h_{\varepsilon}^2 + R_2^2}}. \quad (3.65)$$

где h_{ε} – высота эстакады, м;

R – расстояние от основания эстакады до РТ, м.

Подставим (3.61), (3.62) в (3.65)

$$I_{\text{рт}}^{\delta/\varepsilon} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon})l_{\text{экp}}h_{\text{пр}}^{\delta/\varepsilon}}{\Psi_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon} A_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon} 2\pi l_{\text{экp}} \sqrt{h_{\varepsilon}^2 + R_2^2}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2\sqrt{h_{\varepsilon}^2 + R_2^2}}. \quad (3.66)$$

После сокращений:

$$I_{\text{рт}}^{\delta/\varepsilon} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon})h_{\text{пр}}^{\delta/\varepsilon}}{\Psi_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon} A_{\text{об}}^{\delta/\varepsilon} 2\pi \sqrt{h_{\varepsilon}^2 + R_2^2}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2\sqrt{h_{\varepsilon}^2 + R_2^2}}. \quad (3.67)$$

Интенсивность звука падающего на экран при его установке выражается следующей формулой:

$$I_{\text{пад}}^{c/\varepsilon} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\alpha_{\text{об}}^{c/\varepsilon})}{\Psi_{\text{об}}^{c/\varepsilon} A_{\text{об}}^{c/\varepsilon}}, \quad (3.68)$$

в которой:

$$A_{об}^{c/э} = l_{экр}(h_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{пов} + 2l_{экр}\alpha_{экр} + 2(h_{пр}^{6/э} - h_{э})), \quad (3.69)$$

$$\alpha_{об}^{c/э} = \frac{l_{экр}(2h_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{пов} + 2(h_{пр}^{6/э} - h_{э}))}{2l_{экр}(h_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{пов} + (h_{пр}^{6/э} - h_{э}))}, \quad (3.70)$$

где $\alpha_{экр}$ – коэффициент звукопоглощения экрана;

$h_{экр}$ – высота шумозащитного экрана, м.

Акустическая мощность проёма:

$$W_{пад}^{c/э} = I_{пад}^{c/э} l_{экр}(h_{пр}^{6/э} - h_{э}). \quad (3.71)$$

Интенсивность звука в РТ:

$$I_{рт}^{c/э} = \frac{W_{пад}^{c/э}}{2\pi l_{экр} \sqrt{(h_{э} + h_{экр})^2 + R^2}} \arctg \frac{l_{экр}}{2 \sqrt{(h_{э} + h_{экр})^2 + R^2}}. \quad (3.72)$$

Подставим (3.68), (3.69) в (3.72):

$$I_{рт}^{c/э} = \frac{4W_{ист}(1 - \alpha_{об}^{c/э})l_{экр}(h_{пр}^{6/э} - h_{э})}{\Psi_{об}^{c/э} A_{об}^{c/э} 2\pi l_{экр} \sqrt{(h_{э} + h_{экр})^2 + R^2}} \arctg \frac{l_{экр}}{2 \sqrt{(h_{э} + h_{экр})^2 + R^2}}. \quad (3.73)$$

После сокращений:

$$I_{рт}^{c/э} = \frac{4W_{ист}(1 - \alpha_{об}^{c/э})(h_{пр}^{6/э} - h_{э})}{\Psi_{об}^{c/э} A_{об}^{c/э} 2\pi \sqrt{(h_{э} + h_{экр})^2 + R^2}} \arctg \frac{l_{экр}}{2 \sqrt{(h_{э} + h_{экр})^2 + R^2}}. \quad (3.74)$$

Подставим (3.65) и (3.73) в (3.13):

$$\Delta L_{экр6} = 10 \lg \frac{4W_{ист}(1 - \bar{\alpha}_{об}^{6/э})h_{пр}^{6/э}\Psi_{об}^{c/э}A_{об}^{c/э}2\pi \sqrt{(h_{э} + h_{экр})^2 + R^2}}{\Psi_{об}^{6/э}A_{об}^{6/э}2\pi \sqrt{h_{э}^2 + R^2}} \frac{\arctg \frac{l_{экр}}{2 \sqrt{h_{э}^2 + R^2}}}{\arctg \frac{l_{экр}}{2 \sqrt{(h_{э} + h_{экр})^2 + R^2}}}. \quad (3.75)$$

Проведя сокращения, с учётом (3.62), (3.69) выполнив логарифмирование получим:

$$\begin{aligned} \Delta L_{экр6} = & 10 \lg \frac{\sqrt{(h_{э} + h_{экр})^2 + R^2}}{2 \sqrt{h_{э}^2 + R^2}} + 10 \lg \frac{\Psi_{об}^{c/э}}{\Psi_{об}^{6/э}} + 10 \lg \frac{(1 - \bar{\alpha}_{об}^{c/э})}{(1 - \bar{\alpha}_{об}^{6/э})} + 10 \lg \frac{h_{пр}^{6/э}}{(h_{пр}^{6/э} - h_{э})} + \\ & + 10 \lg \frac{l_{экр}(2h_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{пов} + 2h_{экр}\alpha_{экр} + 2(h_{пр}^{6/э} - h_{э}))}{l_{экр}(2h_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{пов} + 2h_{пр}^{6/э})} + \end{aligned}$$

$$+10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{экp}}}{2\sqrt{h_{\text{э}}^2 + R^2}} + \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{экp}}}{2\sqrt{(h_{\text{э}} + h_{\text{экp}})^2 + R^2}}. \quad (3.76)$$

Приняв, что $h_{\text{э}} \gg h_{\text{экp}}$ сделали упрощение:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{экpб}} = & 10 \lg \frac{\Psi_{\text{об}}^{c/\text{э}}}{\Psi_{\text{об}}^{6/\text{э}}} + 10 \lg \frac{(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}^{c/\text{э}})}{(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}^{6/\text{э}})} + 10 \lg \frac{h_{\text{пр}}^{6/\text{э}}}{(h_{\text{пр}}^{6/\text{э}} - h_{\text{э}})} + \\ & + 10 \lg \frac{(2h_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\text{пов}} + 2h_{\text{экp}}\alpha_{\text{экp}} + 2(h_{\text{пр}}^{6/\text{э}} - h_{\text{э}}))}{(2h_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\Gamma} + b_{\Gamma}\alpha_{\text{пов}} + 2h_{\text{пр}}^{6/\text{э}})}. \end{aligned} \quad (3.77)$$

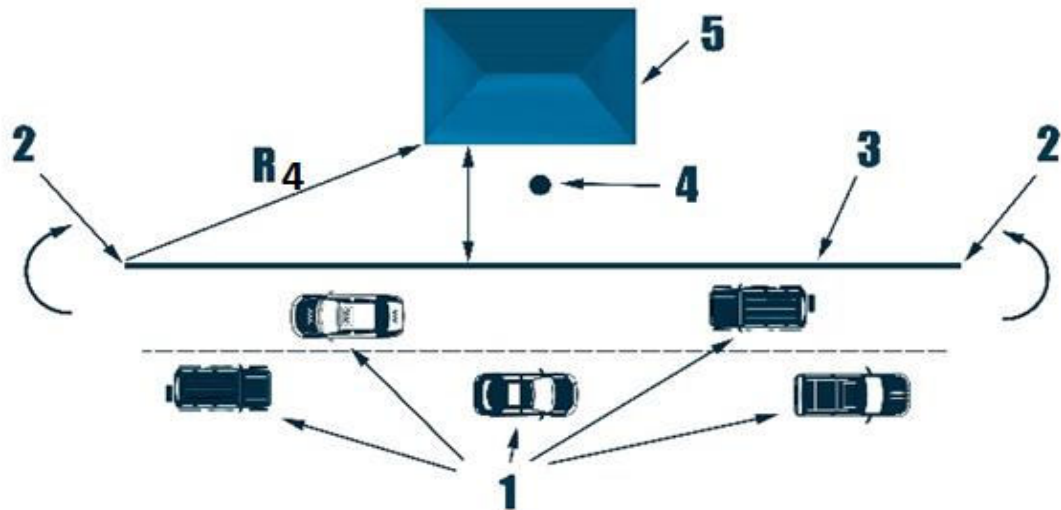
Анализ формулы (3.73) показал, что снижение шума при установке экрана определяется двумя факторами:

- снижением площади излучения проёмом;
- некоторым увеличением звукопоглощающих свойств объёма при установке отражающе-поглощающего экрана.

Проанализируем третий член формулы (3.77). При разных значениях высоты $h_{\text{пр}}^{6/\text{э}}$ и $h_{\text{экp}}$ соотношение на практике может лежать в пределах 1,3–3 и снижение шума за счёт установки экрана и уменьшения площади проёма может достигать 1–5 дБ. Анализ остальных членов формулы позволяет утверждать, что изменение акустических свойств объёма увеличит акустическую эффективность экрана не более чем на 1–2 дБ. Таким образом, эффективность экрана не превысит 2–6 дБ при разной его высоте, т.к. его свойства создавать звуковую тень в диффузном звуковом поле не реализуется.

3.4.7 Шумозащитный прямой экран с дифракцией звука на боковом ребре

Расчётная схема шумозащитного прямого экрана с дифракцией звука на боковом ребре представлена на рисунке 3.21.



1 – ИШ, 2 – боковое ребро, через которое звук дифрагирует, 3 – шумозащитный экран, 4 – РТ, 5 – защищаемый объект

Рисунок 3.21 – Расчётная схема прямого экрана с дифракцией на боковом ребре

Примем основное допущение, что звук проходит только через боковое свободное ребро – линейный вторичный источник звука длиной $h_{\text{экр}}$. Защищаемый объект находится в середине шумозащитного экрана. Звук на свободном ребре распределён равномерно, то есть не снижается по высоте (ввиду большого близлежащего проёма).

Интенсивность падающего на свободное боковое ребро звука:

$$I_{\text{пад}}^p = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})}{\Psi_{\text{об}} A_{\text{об}}} \quad (3.78)$$

Акустическая мощность на свободном ребре экрана определяется:

$$W_{\text{р}}^{\text{бок}} = I_{\text{р}} h_{\text{экр}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{бок}} \quad (3.79)$$

где $h_{\text{экр}}$ – высота экрана, м;

$\beta_{\text{дифр}}^{\text{бок}}$ – коэффициент дифракции звука на боковом свободном ребре.

Интенсивность звука в РТ:

$$I_{\text{РТ7}}^{c/\varepsilon} = \frac{W_{\text{р}}^{\text{бок}}}{2\pi h_{\text{экр}} R_4} \arctg \frac{h_{\text{экр}}}{2R_4} \quad (3.80)$$

где R_4 – расстояние от бокового ребра до РТ, м.

Подставим (3.78), (3.79) в (3.80):

$$I_{\text{рт7}}^{c/\varepsilon} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})h_{\text{экp}}\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{бок}}}{\Psi_{\text{об}}A_{\text{об}}2\pi h_{\text{экp}}R_4} \arctg \frac{h_{\text{экp}}}{2R_4} \quad (3.81)$$

После сокращений в (3.81) подставим (3.15) и (3.81) в (3.3) и с учётом (3.4):

$$\Delta L_{\text{экp7}} = 10 \lg \frac{4W_{\text{ист}}\Psi_{\text{об}}l_{\text{экp}}(h_{\text{экp}}\alpha_{\text{экp}}+h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}}+r\alpha_{\text{пов}}+r)R_1}{2\pi l_{\text{экp}}4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{бок}}} \frac{\arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2(R+r)}}{\arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R_4}} \quad (3.82)$$

После сокращений прологарифмировав и заменив $R_4 = \sqrt{\left(\frac{l_{\text{экp}}}{2}\right)^2 + R_2^2}$ получим:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{экp7}} = & 10 \lg \frac{\sqrt{\left(\frac{l_{\text{экp}}}{2}\right)^2 + R_4^2}}{(R_4+r)} + 10 \lg \frac{(h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}}+h_{\text{экp}}\alpha_{\text{экp}}+r\alpha_{\text{пов}}+r)}{\lambda} + 10 \lg \Psi_{\text{об}} - \\ & -10 \lg(1-\bar{\alpha}_{\text{об}}) + 10 \lg \frac{h_{\text{пр}}^{\frac{6}{\varepsilon}}}{(h_{\text{пр}}^{\frac{6}{\varepsilon}}-h_{\varepsilon})} + 10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2(R_4+r)} - -10 \lg \arctg \frac{h_{\text{экp}}}{2R_4} - 14, \text{ дБ}. \end{aligned} \quad (3.83)$$

где $-10 \lg 8 + 10 \lg \pi = -14 \text{ дБ}$.

Анализ показывает, что на практике для первого члена формулы (3.82) отношение может быть в пределах 2–20, и этот член даёт в эффективность экрана добавку от 3 до 13 дБ.

Во втором члене в формуле (3.83) числитель может изменяться в пределах примерно от 3 до 10 и этот член даёт добавку в эффективность экрана от 9 до 15 дБА. Вычисленные числительные значения для указанных пределов приведены в таблице 3.10 и показаны на рисунке 3.22.

Таблица 3.10 – Вычисленные значения $10 \lg \frac{(h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}}+h_{\text{экp}}\alpha_{\text{экp}}+r\alpha_{\text{пов}}+r)}{\lambda}$

Числитель в формуле (3.80)	Вычисленное значение, в дБ, в зависимости от частоты f, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
3	–2,5	0,5	3,4	6,4	9,4	12,4	15,4	18,4
6	0,4	3,4	6,4	9,4	12,4	15,5	18,5	21,5
10	2,7	5,7	8,7	11,7	14,7	17,7	20,7	23,7

Отметим характерную для таких графиков картину: подъём на 3 дБ на октаву, так что разница между значениями на частоте 63 Гц и 8000 Гц составляет 20 дБ. При каждом удвоении значения в числителе формулы вычисленные спектры увеличиваются на 3 дБ.

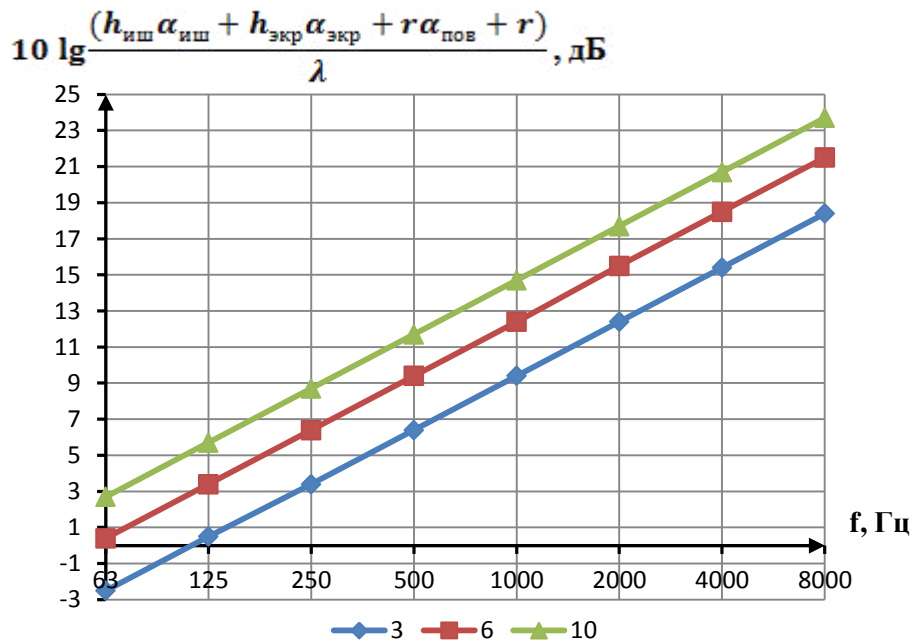


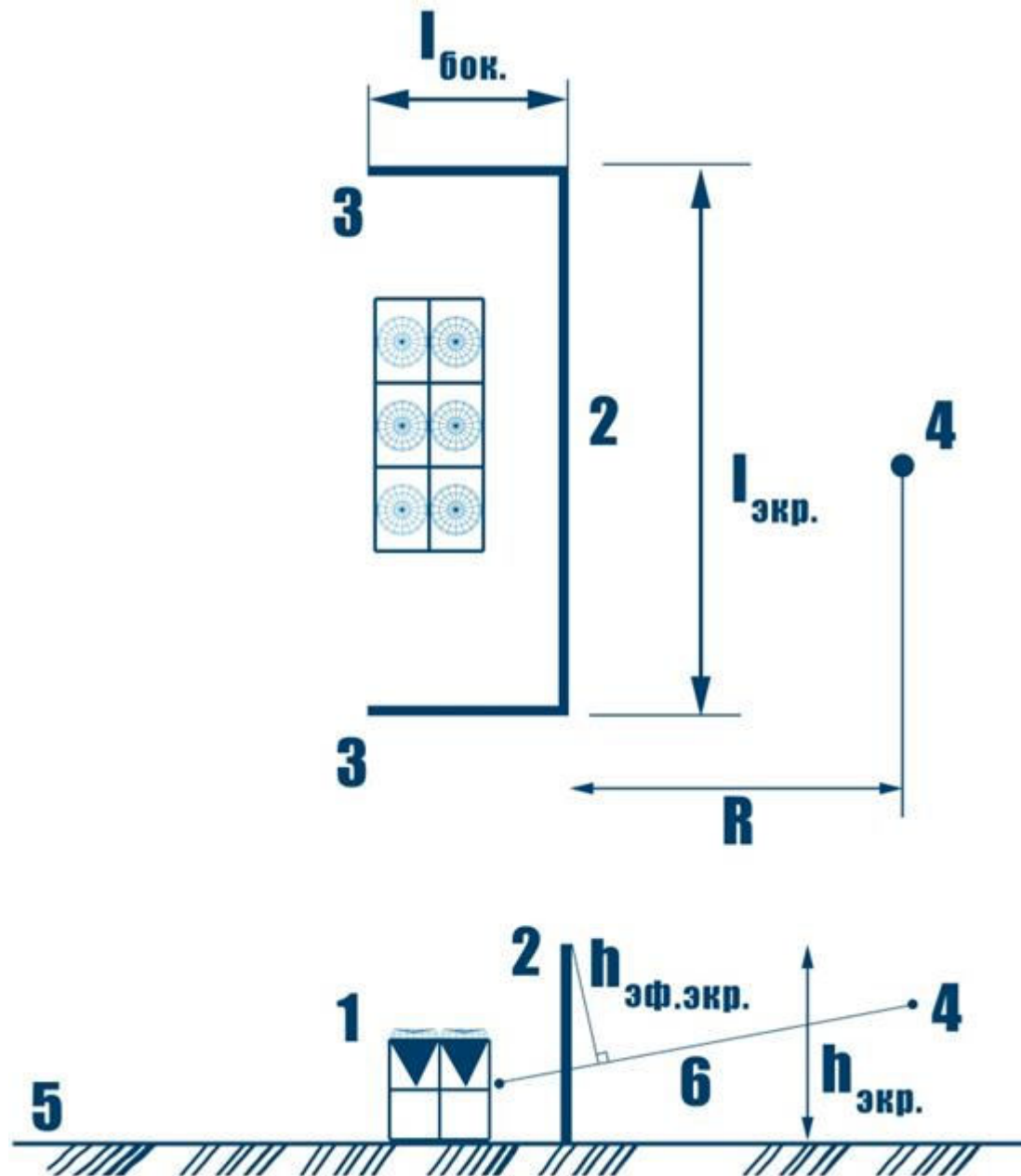
Рисунок 3.22 – Вычисленные значения $10 \lg \frac{(h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экр}}\alpha_{\text{экр}} + r\alpha_{\text{пов}} + r)}{\lambda}$ в зависимости от числителя на разных частотах

3.5 Математические модели технологических экранов

3.5.1 П-образный (в плане) прямой экран

Принимаем дополнительное допущение, что РТ находится напротив фронтального экрана, а звук через закрытые отгонами боковые рёбра фронтального экрана в РТ не попадает, то есть звук проходит в РТ через свободное верхнее ребро фронтального экрана.

Расчетная схема приведена на рисунке 3.23.



1 – ИШ, 2 – фронтальный экран, 3 – боковые экраны (отгоны), 4 – РТ,
5 – опорная поверхность, 6 – условная линия, соединяющая ИШ и РТ, 7 – свободное ребро.

Рисунок 3.23 – Расчётная схема экрана П-образного технологического экрана

Примем, что на расстоянии R источник шума точечный, тогда интенсивность звука в РТ без экрана:

$$I_{\text{РТ}}^{6/\text{э}} = \frac{W_{\text{ист}}}{2\pi(R+r)^2}, \quad (3.84)$$

где R – расстояние от фронтального экрана до РТ, м;

r – расстояние ИШ до фронтального экрана, м.

Интенсивность звука, падающего на фронтальный экран:

$$I_{\text{пад}}^{\text{фр}} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}'_{\text{об}})}{\Psi'_{\text{об}} A'_{\text{об}}}, \quad (3.85)$$

Где:

$$A'_{\text{об}} = h_{\text{экр}} l_{\text{экр}}^{\text{фр}} \alpha_{\text{экр}} + 2h_{\text{экр}} l_{\text{экр}}^{\text{бок}} \alpha_{\text{экр}} + l_{\text{ист}} h_{\text{ист}} \alpha_{\text{ист}} + h_{\text{экр}} l_{\text{экр}}^{\text{фр}} 1 + + l_{\text{экр}}^{\text{фр}} l_{\text{экр}}^{\text{бок}} \alpha_{\text{пов}} + \\ + l_{\text{экр}}^{\text{фр}} l_{\text{экр}}^{\text{бок}} 1, \quad (3.86)$$

$$\bar{\alpha}'_{\text{об}} = \frac{A'_{\text{об}}}{2h_{\text{экр}} l_{\text{экр}}^{\text{фр}} + 2h_{\text{экр}} l_{\text{экр}}^{\text{бок}} + l_{\text{ист}} h_{\text{ист}} + 2l_{\text{экр}}^{\text{фр}} l_{\text{экр}}^{\text{бок}}}, \quad (3.87)$$

где $h_{\text{экр}}$ – высота фронтального и боковых экранов, м;

$l_{\text{экр}}^{\text{фр}}$ – длина фронтального экрана, м;

$\alpha_{\text{экр}}$ – коэффициент звукопоглощения экранов;

$l_{\text{экр}}^{\text{бок}}$ – длина боковых экранов (отгонов), м;

$l_{\text{ист}}$ – длина ИШ, м;

$h_{\text{ист}}$ – высота ИШ, м;

$\alpha_{\text{ист}}$ – коэффициент звукопоглощения ИШ;

$\alpha_{\text{пов}}$ – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности.

Акустическая мощность в нижней части фронтального экрана:

$$W_{\text{н}}^{\text{фр}} = I_{\text{пад}}^{\text{фр}} l_{\text{экр}}^{\text{фр}} 1. \quad (3.88)$$

Интенсивность звука на верхнем свободном ребре фронтального экрана:

$$I_{\text{р}}^{\text{фр}} = \frac{W_{\text{р}}^{\text{фр}}}{2\pi l_{\text{экр}}^{\text{фр}} h_{\text{экр}}^{\text{эфф}}} \arctg \frac{l_{\text{экр}}^{\text{фр}}}{2h_{\text{экр}}^{\text{эфф}}}, \quad (3.89)$$

где $h_{\text{экр}}^{\text{эфф}}$ – эффективная высота экрана (перпендикуляр из вершины на условную линию), м.

Акустическая мощность на свободном ребре:

$$W_{\text{р}} = I_{\text{р}}^{\text{фр}} l_{\text{экр}}^{\text{фр}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{фр}}, \quad (3.90)$$

где $\beta_{\text{дифр}}^{\text{фр}}$ – коэффициент дифракции звука на свободном верхнем ребре фронтального экрана.

Интенсивность звука в РТ с экраном:

$$I_{\text{рт8}}^{c/\varepsilon} = \frac{W_p}{2\pi l_{\text{экр}}^{\text{фр}} R} \arctg g \frac{l_{\text{экр}}^{\text{фр}}}{2R}. \quad (3.91)$$

Подставим (3.84) и (3.87)– (3.90) в (3.91):

$$I_{\text{рт8}}^{c/\varepsilon} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}'_{\text{об}})l_{\text{экр}}^{\text{фр}} 1l_{\text{экр}}^{\text{фр}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{фр}}}{\Psi'_{\text{об}} A'_{\text{об}} \pi l_{\text{экр}}^{\text{фр}} h_{\text{экр}}^{\text{эф}} 2\pi l_{\text{экр}}^{\text{фр}} R} \arctg g \frac{l_{\text{экр}}^{\text{фр}}}{2h_{\text{экр}}^{\text{эф}}} \arctg g \frac{l_{\text{экр}}^{\text{фр}}}{2R}. \quad (3.92)$$

После сокращений приняв сомножитель A_0 :

$$I_{\text{рт8}}^{c/\varepsilon} = \frac{2W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}'_{\text{об}})\lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{фр}}}{\Psi'_{\text{об}} A'_{\text{об}} \pi h_{\text{экр}}^{\text{эф}} \pi R} A_0. \quad (3.93)$$

Подставим (3.84) и (3.93) в (3.14)

$$\Delta L_{\text{экр8}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}} \Psi'_{\text{об}} A'_{\text{об}} \pi h_{\text{экр}}^{\text{эф}} \pi R}{2\pi(R+r)^2 2W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}'_{\text{об}})\lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{фр}} A_0}. \quad (3.94)$$

Проведём сокращения, раскроем A_0 и прологарифмируем. Акустическая эффективность П-образного экрана:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{экр8}} = & 10 \lg \frac{A'_{\text{об}}}{A_0} + 10 \lg \Psi'_{\text{об}} + 10 \lg \frac{h_{\text{экр}}^{\text{эф}}}{\lambda} - 10 \lg \frac{R}{R_0} - 10 \lg(1 - \bar{\alpha}'_{\text{об}}) + \\ & + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}^{\text{фр}}} - 10 \lg \arctg g \frac{l_{\text{экр}}^{\text{фр}}}{2h_{\text{экр}}^{\text{эф}}} - 10 \lg \arctg g \frac{l_{\text{экр}}^{\text{фр}}}{2R} - 1, \text{ дБ}, \end{aligned} \quad (3.95)$$

где принято $R \gg r$:

$$R_0 = 1 \text{ м},$$

$$A_0 = 1 \text{ м}^2,$$

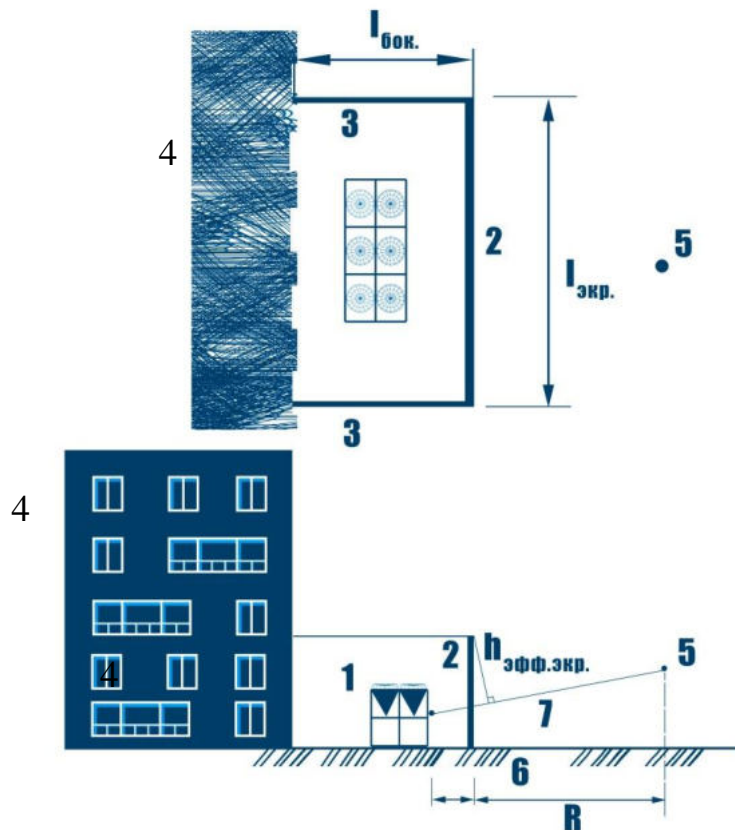
$$10 \lg \frac{\pi}{4} = -1 \text{ дБ}.$$

Проанализируем полученную формулу (3.94). Первый член в формуле изменяется в пределах от 30 до 180 м², поэтому вклад в эффективность экрана составляет от 15 до 22 дБ.

Значения $\bar{\alpha}'_{\text{об}}$ при этом изменяются от 0,4 до 0,6, поэтому вклад второго члена формулы от 2 до 4 дБ, а пятого ($10 \lg(1 - \bar{\alpha}'_{\text{об}})$) составляет также от 2 до 4 дБ.

3.5.2 Замкнутый (в плане) прямой экран

Расчётная схема замкнутого в плане прямого экрана приведена на рисунке 3.24.



1 – ИШ, 2 – фронтальный экран, 3 – боковые экраны,
4 – примыкающая конструкция (стена), 5 – РТ, 6 – опорная поверхность,
7 – условная линия, соединяющая ИШ и РТ

Рисунок 3.24 – Расчётная схема технологического замкнутого в плане экрана

Рассмотрено условие отражающих свойств примыкающей поверхности.

Значения (3.80) и (3.81) изменяются в этой схеме:

$$A''_{об} = h_{экр} l_{экр}^{\text{фр}} \alpha_{экр} + 2h_{экр} l_{экр}^{\text{бок}} \alpha_{экр} + l_{ист} h_{ист} \alpha_{ист} + h_{ст} l_{экр}^{\text{фр}} \alpha_{ст} + \\ + l_{экр}^{\text{фр}} l_{экр}^{\text{бок}} \alpha_{пов} + l_{экр}^{\text{фр}} l_{экр}^{\text{бок}} 1, \quad (3.96)$$

где $h_{ст}$ – высота примыкающей конструкции, м;

$\alpha_{ст}$ – коэффициент звукопоглощения примыкающей конструкции.

$$\bar{\alpha}''_{об} = \frac{A''_{об}}{2h_{экр}l_{фр} + 2h_{экр}l_{экр}^{бок} + l_{ист}h_{ист} + h_{ст}l_{фр} + 2l_{экр}^{фр}l_{экр}^{бок}}. \quad (3.97)$$

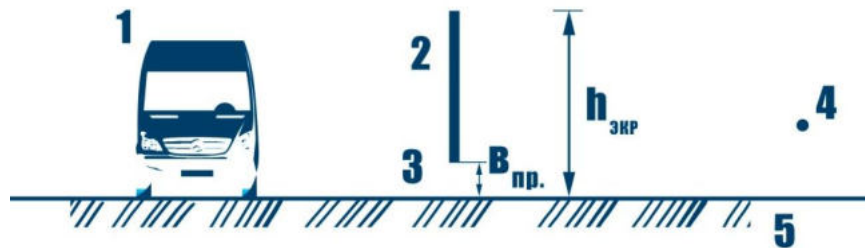
Формула (3.94) с учётом (3.95) и (3.96) запишется в виде:

$$\begin{aligned} \Delta L_{экр9} = 10 \lg \frac{h_{экр}l_{экр}^{фр}\alpha_{экр}^{фр} + 2h_{экр}l_{экр}^{бок}\alpha_{экр}^{бок} + l_{ист}h_{ист}\alpha_{ист} + h_{ст}l_{ст}\alpha_{ст}}{A_0} + 10 \lg \Psi''_{об} + \\ + 10 \lg \frac{h_{экр}^{эф}}{\lambda} - 10 \lg \frac{R}{R_0} - 10 \lg (1 - \bar{\alpha}'_{об}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{дифр}^{фр}} - \\ - 10 \lg \arctg \frac{l_{экр}^{фр}}{2h_{экр}^{эф}} - 10 \lg \arctg \frac{l_{экр}}{2R} - 1, \text{ дБ}. \end{aligned} \quad (3.98)$$

Анализ формулы показывает, что при отражающих свойствах примыкающей конструкции и её большой площади акустическая эффективность экрана может уменьшиться на 3–4 дБА, за счет снижения звукопоглощающих свойств объема.

3.6 Прямой транспортный или технологический экран со щелью или проёмом

Расчётная схема экрана со щелью приведена на рисунке 3.25.



1 – ИШ, 2 – экран, 3 – щель, 4 – РТ, 5 – опорная поверхность

Рисунок 3.25 – Расчётная схема прямого экрана со щелью

Выполним оценку снижения эффективности шумозащитного экрана при наличии щели (проёма) в виде:

$$\Delta L_{\text{экp}}^{\text{ш}} = 10 \lg \frac{I_{\text{pт}}^{c/\text{э}}}{I_{\text{pт}}^{c/\text{ш}}}, \quad (3.99)$$

где $I_{\text{pт}}^{c/\text{э}}$ – интенсивность звука, дифрагирующего в РТ через верхнее свободное ребро экрана (определяется по формуле (3.20);

$I_{\text{pт}}^{c/\text{ш}}$ – интенсивность составляющей звука, дифрагирующей в РТ через щель, которая определяется следующим образом:

$$I_{\text{пад}} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})}{\Psi_{\text{об}} A_{\text{об}}}. \quad (3.100)$$

Мощность звука, излучаемого через щель:

$$W_{\text{ш}} = I_{\text{пад}} l_{\text{экp}} b_{\text{ш}} \beta_{\text{дифр}}^{\text{ш}}, \quad (3.101)$$

где $b_{\text{ш}}$ – ширина щели, м;

$\beta_{\text{дифр}}^{\text{ш}}$ – коэффициент дифракции щели.

Интенсивность звука в РТ, прошедшего через щель:

$$I_{\text{pт}}^{c/\text{ш}} = \frac{W_{\text{ш}}}{2\pi l_{\text{экp}} R} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R} \quad (3.102)$$

Подставим (3.99), (3.100) в (3.101)

$$I_{\text{pт}}^{c/\text{ш}} = \frac{4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})l_{\text{экp}}b_{\text{ш}}\beta_{\text{дифр}}^{\text{ш}}}{\Psi_{\text{об}} A_{\text{об}} 2\pi l_{\text{экp}} R} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R}. \quad (3.103)$$

После сокращений в (3.99) подставим (3.99), (3.19) в (3.95)

$$\Delta L_{\text{экp}}^{\text{ш}} = 10 \lg \frac{2W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}}\Psi_{\text{об}} A_{\text{об}} 2\pi R A}{\Psi_{\text{об}} A_{\text{об}} \pi h_{\text{экp}}^{\text{эф}} \pi R 4W_{\text{ист}}(1-\bar{\alpha}_{\text{об}})b_{\text{ш}}\beta_{\text{дифр}}^{\text{ш}}}, \quad (3.104)$$

$$\frac{\arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp}}^{\text{эф}}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R}}{\arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R}}, \text{ дБ.}$$

После сокращений и логарифмирования:

$$\Delta L_{\text{экp}}^{\text{ш}} = -10 \lg \frac{h_{\text{экp}}^{\text{эф}} b_{\text{ш}}}{\lambda}, \quad (3.105)$$

где $\beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}}$ принято условно равным $\beta_{\text{дифр}}^{\text{ш}}$ ($\beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}} = \beta_{\text{дифр}}^{\text{ш}}$).

$$10 \lg \frac{1}{\pi} = -5 \text{ дБ} \quad 10 \lg 2 = 3 \text{ дБ} \quad 10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp}}^{\text{эф}}} = 2 \text{ дБ.}$$

Таким образом, акустическая эффективность экрана со щелью запишется в виде:

$$\Delta L_{\text{экp}}^{\text{ш}} = 10 \lg \frac{(h_{\text{экp}} \alpha_{\text{экp}} + h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} + 10 \lg \Psi_{\text{об}} +$$

$$+ 10 \lg \frac{h_{\text{экp}}^{\text{эф}}}{\lambda} - 10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}}} - 3 - 10 \lg \frac{h_{\text{экp}}^{\text{эф}} b_{\text{ш}}}{\lambda \lambda_0}, \text{ дБ} \quad (3.106)$$

где $\lambda_0 = 1\text{ м}$.

Результаты расчётов $\Delta L_{\text{экp}}^{\text{ш}}$ для экранов различной высоты и с различной шириной щели приведены в таблице 3.11 и показаны на рисунке 3.26.

Таблица 3.11 – Вычисленные значения $10 \lg \frac{h_{\text{экp}}^{\text{эф}} b_{\text{ш}}}{\lambda}$

Принятые значения			Вычисленное значение, в дБ, в зависимости от частоты f, Гц							
$h_{\text{экp}}^{\text{эф}}$	$b_{\text{ш}}$	$h_{\text{экp}}^{\text{эф}} b_{\text{ш}}$	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
2,0	0,1	0,2	−14,3	−11,3	−8,3	−5,3	−2,3	0,7	3,7	6,7
	0,2	0,4	−11,3	−8,3	−5,3	−2,3	0,7	3,7	6,7	9,7
	0,3	0,6	−9,5	−6,5	−3,5	−0,5	2,5	5,5	8,5	11,5
	0,5	1,0	−7,3	−4,3	−1,3	1,6	4,7	7,7	10,7	13,7
4,0	0,1	0,4	−0,3	−8,3	−5,3	−2,3	0,7	3,7	6,7	9,7
	0,2	0,8	−8,3	−5,5	−2,3	0,7	3,7	6,7	9,7	12,7
	0,3	1,2	−6,5	−3,5	−0,5	2,5	5,5	8,5	11,5	14,5
	0,5	2,0	−4,3	−1,3	1,7	4,7	7,3	10,7	13,7	16,7
6,0	0,1	0,6	−9,5	−6,5	−3,5	−0,5	2,5	5,5	8,5	11,5
	0,2	1,2	−6,5	−3,5	−0,5	2,5	5,5	8,5	11,5	14,5
	0,3	1,8	−4,8	−1,8	1,3	4,2	7,2	10,2	13,2	16,2
	0,5	3,0	−2,5	0,5	3,5	6,5	9,5	12,5	15,5	18,5
10,0	0,1	1,0	−7,3	−4,3	−1,3	1,6	4,7	7,7	10,7	13,7
	0,2	2,0	−4,3	−1,3	1,7	4,7	7,3	10,3	13,3	16,3
	0,3	3,0	−2,5	0,5	3,5	6,5	9,5	12,5	15,5	18,5
	0,5	5,0	−0,3	2,7	5,7	8,7	11,7	14,7	17,7	20,7

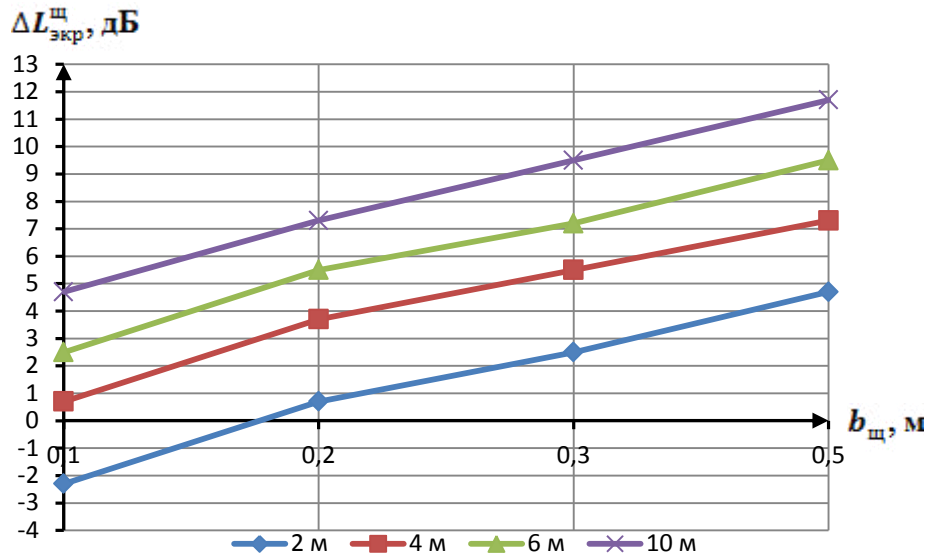


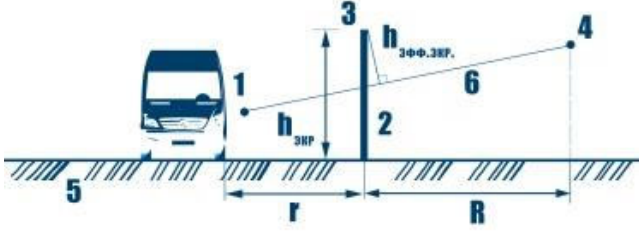
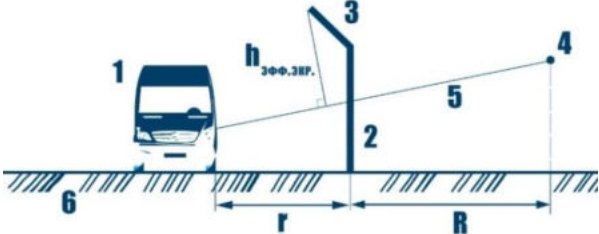
Рисунок 3.26 – Зависимость $10 \lg \frac{h_{экран}^{эф} b_{щ}}{\lambda}$ от $b_{щ}$ при разных $h_{экран}^{эф}$ на частоте 1000 Гц

Анализ показывает, что увеличение ширины щели от 0,1 до 0,5 м снижает акустическую эффективность шумозащитного экрана на 5–6 дБ. Снижение эффективности экранов по интегральному значению может достигать от 5 до 12 дБА.

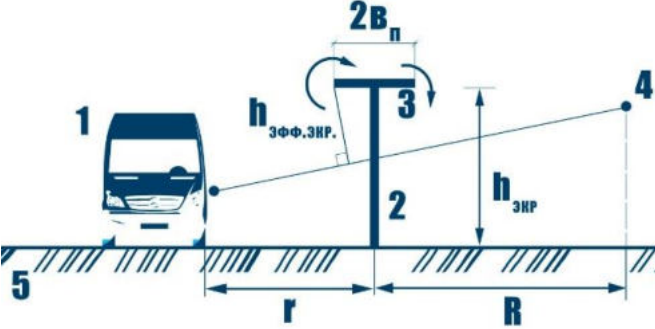
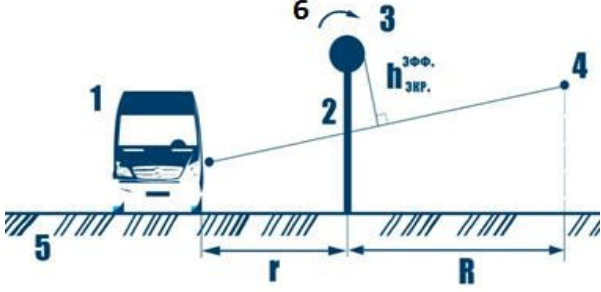
Полученные математические модели для 10 расчётных схем сведены в таблицу 3.12.

Таблица 3.12 –

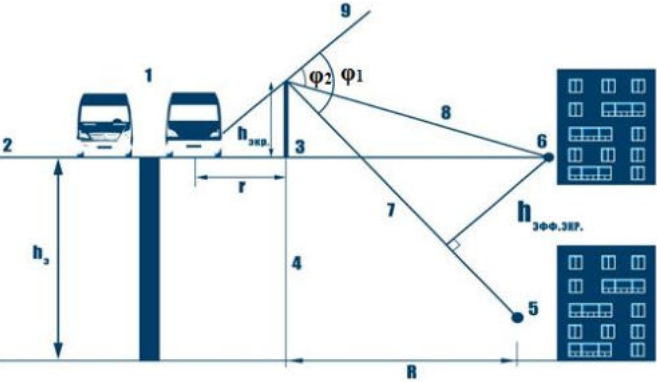
Расчётные схемы и математические модели ШЭ

№ п/п	Наименование	Схема	Формула
1	Прямой транспортный шумозащитный экран без надстройки на верхнем свободном ребре, через которое звук дифрагирует в РТ	 1 – ИШ, 2 – шумозащитный экран, 3 – свободное ребро экрана, 4 – РТ, 5 – опорная поверхность, 6 – условная линия, соединяющая ИШ и РТ	$\Delta L_{\text{экp1}} = 10 \lg \frac{R}{(R+r)} + 10 \lg \frac{(h_{\text{экp}} \alpha_{\text{экp}} + h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} + 10 \lg \Psi_{\text{об}} +$ $+ 10 \lg \frac{h_{\text{эф}}}{\lambda} - 10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{диф}}^{\text{экp}}} - 3, \text{ дБ},$ где R – расстояние от экрана до РТ, м; r – расстояние от ИШ до экрана, м; $h_{\text{экp}}$ – высота шумозащитного экрана, м; $\alpha_{\text{экp}}$ – частотнозависимый коэффициент звукопоглощения экрана, полученный натурными измерениями на реальных экранах; $h_{\text{иш}}$ – условная высота ИШ, м; $\alpha_{\text{иш}}$ – коэффициент звукопоглощения ИШ (транспортный поток или поезд), $\alpha_{\text{пов}}$ – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности; $r_0 = 1$ м; $\Psi_{\text{об}}$ – коэффициент, показывающий степень диффузности звукового поля в условном объёме; $h_{\text{эф}}$ – эффективная высота шумозащитного экрана; $\bar{\alpha}_{\text{об}}$ – средний коэффициент звукопоглощения объёма; $\beta_{\text{диф}}^{\text{экp}}$ – коэффициент дифракции ШЭ (отношение интенсивности звука дифрагированного на свободном ребре ШЭ к интенсивности падающего звука)
2	Экран с Г-образной надстройкой на верхнем свободном ребре	 1 – ИШ, 2 – вертикальная часть ШЭ, 3 – полка, расположенная под углом к вертикальной части, 4 – РТ, 5 – условная линия, соединяющая ИШ и РТ, 6 – опорная поверхность	$\Delta L_2^{\text{экp}} = 10 \lg \frac{R}{(R+r)} + 10 \lg \frac{(h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экp}} \alpha_{\text{экp}} + b_{\text{п}} \alpha_{\text{экp}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} + 10 \lg \Psi'_{\text{об}} +$ $10 \lg \frac{h_{\text{эф}}}{\lambda} - 10 \lg(1 - \bar{\alpha}'_{\text{об}}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифp1}}^{\text{экp}}} - 3,$ где $b_{\text{п}}$ – ширина полки, м; $h_{\text{эф}}$ – перпендикуляр, опущенный из свободной части полки (новое свободное ребро экрана) на условную линию, соединяющую ИШ и РТ; $\bar{\alpha}'_{\text{об}}$ – коэффициент звукопоглощения условного объёма с учетом полки; $\beta_{\text{дифp1}}^{\text{экp}}$ – коэффициент дифракции на новом свободном ребре – конце полки Г-образного экрана

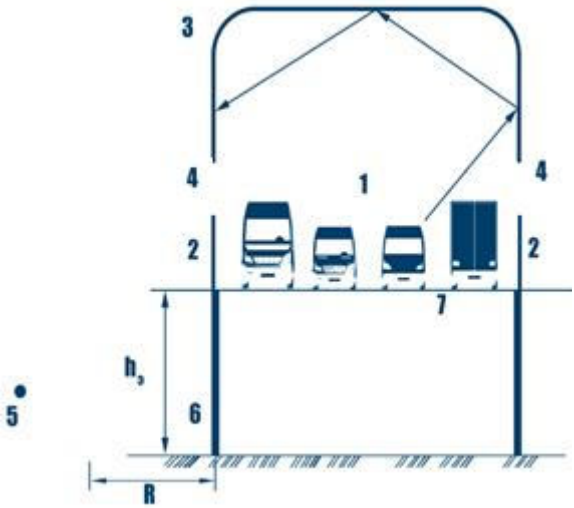
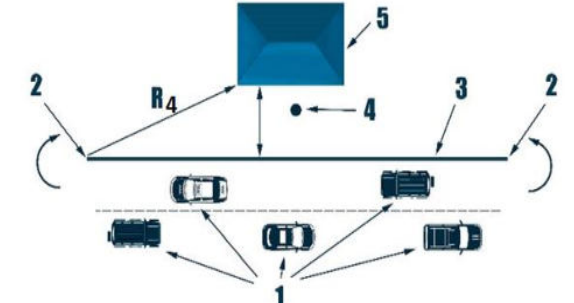
Продолжение таблицы 3.12

№ п/п	Наименование	Схема	Формула
3	Экран с Т-образной надстройкой на свободном ребре	 1 – ИШ, 2 – вертикальный экран, 3 – надстройка в виде горизонтальной полки, симметричной по отношению к вертикальному экрану, 4 – РТ, 5 – опорная поверхность	$\Delta L_3 = 10 \lg \frac{R}{(R+r)} + 10 \lg \frac{(h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экр}} \alpha_{\text{экр}} + B_{\text{п}} \alpha_{\text{экр}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} +$ $+ 10 \lg \Psi'_{\text{об}} + 10 \lg \frac{h_{\text{экр}}^{\text{эф}}}{\lambda} + 10 \lg \frac{2B_{\text{п}}}{\lambda} +$ $+ 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр1}}^{\text{экр}}} + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр2}}^{\text{экр}}} - 10 \lg (1 - \bar{\alpha}'_{\text{об}}) + 3, \text{ дБ},$ где $\beta_{\text{дифр2}}^{\text{экр}}$ – коэффициент дифракции на втором свободном ребре
4	Шумозащитный экран с антидифрактором на свободном ребре	 1 – ИШ, 2 – экран, 3 – антидифрактор, 4 – РТ, 5 – опорная поверхность; 6 – дифракция на антидифракторе	$\Delta L_4 = 10 \lg \frac{R}{(R+r)} + 10 \lg \frac{(h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экр}} \alpha_{\text{экр}} + B_{\text{а/д}} \alpha_{\text{а/д}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} + 10 \lg \Psi_{\text{об}} +$ $10 \lg \frac{h_{\text{экр}}^{\text{эф}}}{\lambda} - 10 \lg (1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}) - 10 \lg (1 - \alpha_{\text{а/д}}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}^{\text{а/д}}} - 3 \text{ дБ},$ где $B_{\text{а/д}}$ – ширина антидифрактора; $\alpha_{\text{а/д}}$ – коэффициент звукопоглощения антидифрактора; $\beta_{\text{дифр}}^{\text{а/д}}$ – коэффициент дифракции с надстройкой свободном ребре в виде антидифрактора

Продолжение таблицы 3.12

№ п/п	Наименование	Схема	Формула
5	Вертикальный экран, установленный на эстакаде	 1 – ИШ, 2 – опорная поверхность на эстакаде, 3 – шумозащитный экран, 4 – эстакада, 5 – расчётная точка, 6 – условная РТ, 7 – линия, соединяющая вершину экрана с РТ, 8 – условная линия, соединяющая вершину экрана с условной РТ, 9 – линия, соединяющая ИШ и вершину экрана, установленного на эстакаде, φ_1 – угол между линиями 7 и 9, φ_2 – угол между линиями 8 и 9	$\Delta L_{\text{экр5}} = 10 \lg \frac{(h_{\text{иш}} \alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экр}} \alpha_{\text{экр}} + r \alpha_{\text{пов}} + r)}{r_0} + 10 \lg \Psi_{\text{об}} +$ $+ 10 \lg \frac{h_{\text{экр}} + h_{\text{э}} \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\lambda} - 10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}^{\text{экр}}} - 3, \text{ дБ},$ где $h_{\text{э}}$ – высота эстакады; φ_1 – угол между лучом от ИШ до свободного ребра ШЭ и от свободного ребра ШЭ до РТ; φ_2 – угол между лучом от ИШ до свободного ребра ШЭ и лучом от свободного ребра до условной РТ, которая бы находилась вблизи защищаемого объекта, если бы эстакада отсутствовала бы

Продолжение таблицы 3.12

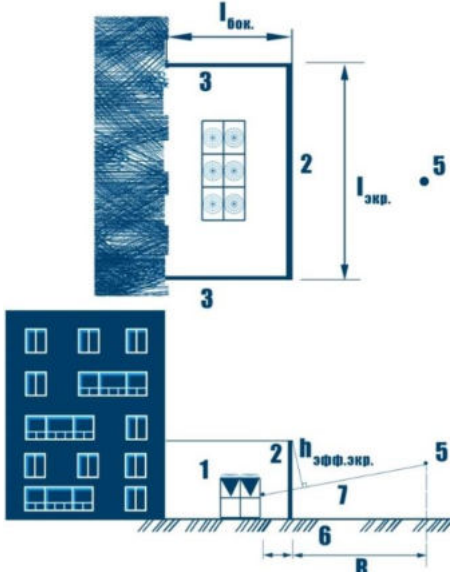
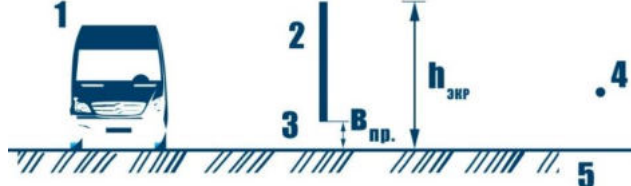
№ п/п	Наименование	Схема	Формула
6	Экран, установленный в акустически необработанной галерее	 1 – ИШ, 2 – экран, 3 – акустически необработанная галерея, 4 – проём, 5 – расчётная точка, 6 – эстакады, 7 – опорная поверхность	$\Delta L_{\text{экр6}} = 10 \lg \frac{\Psi_{\text{об}}^{c/\text{э}}}{\Psi_{\text{об}}^{6/\text{э}}} + 10 \lg \frac{(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}^{c/\text{э}})}{(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}^{6/\text{э}})} + 10 \lg \frac{h_{\text{пр}}^{6/\text{э}}}{(h_{\text{пр}}^{6/\text{э}} - h_{\text{э}})} +$ $+ 10 \lg \frac{(2h_{\text{г}}\alpha_{\text{г}} + b_{\text{г}}\alpha_{\text{г}} + b_{\text{г}}\alpha_{\text{пов}} + 2h_{\text{экр}}\alpha_{\text{экр}} + 2(h_{\text{пр}}^{6/\text{э}} - h_{\text{э}}))}{(2h_{\text{г}}\alpha_{\text{г}} + b_{\text{г}}\alpha_{\text{г}} + b_{\text{г}}\alpha_{\text{пов}} + 2h_{\text{пр}}^{6/\text{э}})}$ где $h_{\text{г}}$ – высота части галереи над проёмом, м; $\alpha_{\text{г}}$ – коэффициент звукопоглощения материала галереи; $b_{\text{г}}$ – ширина галереи; $\alpha_{\text{пов}}$ – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности; $h_{\text{пр}}^{6/\text{э}}$ – высота проёма без установленного экрана, м
7	Шумозащитный прямой экран с дифракцией звука на боковом свободном ребре	 1 – ИШ, 2 – боковое ребро, через которое звук дифрагирует, 3 – шумозащитный экран, 4 – РТ, 5 – расчётная точка	$\Delta L_{\text{экр7}} = 10 \lg \frac{\sqrt{\left(\frac{l_{\text{экр}}}{2}\right)^2 + R_4^2}}{(R_4 + r)} + 10 \lg \frac{(h_{\text{иш}}\alpha_{\text{иш}} + h_{\text{экр}}\alpha_{\text{экр}} + r\alpha_{\text{пов}} + r)}{\lambda} +$ $+ 10 \lg \Psi_{\text{об}} - 10 \lg (1 - \bar{\alpha}_{\text{об}}) + 10 \lg \frac{h_{\text{пр}}^{6/\text{э}}}{(h_{\text{пр}}^{6/\text{э}} - h_{\text{э}})} +$ $+ 10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2(R_4 + r)} - 10 \lg \arctg \frac{h_{\text{экр}}}{2R_4} - 14$ где R_4 – расстояние от бокового ребра до РТ, м; $\beta_{\text{дифр}}^{\text{бок}}$ – коэффициент дифракции звука на боковом свободном ребре

5 – защищаемый объект

Продолжение таблицы 3.12

№ п/п	Наименование	Схема	Формула
8	П-образный (в плане) прямой технологический экран	1 – ИШ, 2 – фронтальный экран, 3 – боковые экраны (отгоны), 4 – РТ, 5 – опорная поверхность, 6 – условная линия, соединяющая ИШ и РТ, 7 – свободное ребро	$\Delta L_{\text{экр8}} = 10 \lg \frac{A'_{\text{об}}}{A_0} + 10 \lg \Psi'_{\text{об}} + 10 \lg \frac{h_{\text{экр}}^{\text{эф}}}{\lambda} - 10 \lg \frac{R}{R_0} - 10 \lg (1 - \bar{\alpha}'_{\text{об}}) +$ $+ 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}^{\text{фр}}} - 10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экр}}^{\text{фр}}}{2h_{\text{экр}}^{\text{эф}}} - 10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экр}}^{\text{фр}}}{2R} - 1, \text{ дБ},$ где $A'_{\text{об}}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения условного объема, м^2; $A_0 = 1 \text{ м}^2$, $\Psi'_{\text{об}}$ – коэффициент, показывающий степень диффузности звукового поля в условном объеме; $R_0 = 1 \text{ м}$, $\bar{\alpha}'_{\text{об}}$ – коэффициент звукопоглощения объема, $l_{\text{экр}}^{\text{фр}}$ – длина фронтального экрана, м

Продолжение таблицы 3.12

№ п/п	Наименование	Схема	Формула
9	Замкнутый (в плане) прямой технологический экран	 1 – ИШ, 2 – фронтальный экран, 3 – боковые экраны, 4 – примыкающая конструкция (стена), 5 – РТ, 6 – опорная поверхность, 7 – условная линия, соединяющая ИШ и РТ	$\Delta L_{\text{экp9}} = 10 \lg \frac{h_{\text{экp}} l_{\text{экp}}^{\text{фр}} \alpha_{\text{экp}} + 2 h_{\text{экp}} l_{\text{экp}}^{\text{бок}} \alpha_{\text{экp}} + l_{\text{ист}} h_{\text{ист}} \alpha_{\text{ист}} + h_{\text{ст}} l_{\text{ст}} \alpha_{\text{ст}}}{A_0} +$ $+ 10 \lg \Psi'_{\text{об}} + 10 \lg \frac{h_{\text{экp}}^{\text{эф}}}{\lambda} - 10 \lg \frac{R}{R_0} - 10 \lg (1 - \bar{\alpha}'_{\text{об}}) + 10 \lg \frac{1}{\beta_{\text{дифp}}^{\text{фр}}} -$ $- 10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экp}}^{\text{фр}}}{2 h_{\text{экp}}^{\text{эф}}} - 10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2 R} - 1, \text{дБ},$ где $h_{\text{ст}}$ – высота примыкающей конструкции, м; $l_{\text{ст}}$ – длины примыкающей конструкции; $\alpha_{\text{ст}}$ – коэффициент звукопоглощения примыкающей конструкции
10	Прямой транспортный или технологический экран со щелью или проёмом	 1 – ИШ, 2 – экран, 3 – щель, 4 – РТ, 5 – опорная поверхность	$\Delta L_{\text{экp10}} = \Delta L_{\text{экp}} - \Delta L_{\text{щ}}^{\text{щ}},$ где $\Delta L_{\text{щ}}^{\text{щ}} = 10 \lg \frac{h_{\text{экp}}^{\text{эф}} b_{\text{щ}}}{\lambda \lambda_0}$, $b_{\text{щ}}$ – ширина щели, м; $\lambda_0 = 1 \text{ м}$

3.7 Выводы по главе

1. Предложена уточнённая теория шумозащитных экранов, основным положением которой является допущение об образовании квазидиффузного звукового поля множественных отражений в условном объёме, образованном источниками шума, экраном и опорной поверхностью (по признаку изотропности), а также допущении о дивергенции звука по высоте экрана; введено в рассмотрение понятие эффективной высоты экрана. Акустические свойства условного объёма определяются введением понятием средний коэффициент звукопоглощения. Свободное ребро экрана рассматривается как вторичный линейный излучатель звука, а источники звука как линейные излучатели цилиндрических звуковых волн (транспортные экраны) и точечные источники сферической звуковой волны (технологические экраны). Используется понятие показателя дифракции. Интерференционные явления не учитываются.
2. Приняты следующие допущения при разработке математических моделей:
 - звуковое поле перед шумозащитным экраном квазидиффузное, интенсивность звука убывает с высотой экрана (кроме схемы 6);
 - перед шумозащитным экраном образуется условный объём ограниченный экраном, источниками шума и опорной поверхностью;
 - шумозащитный экран рассматривается как звуконепроницаемая конструкция, звук попадает в РТ путём дифракции через верхнее свободное ребро экрана (кроме схемы 8);
 - длина источника шума для транспортных экранов ($l_{\text{иш}}$) принята равной длине шумозащитного экрана ($l_{\text{экр}}$).
3. Предложено 10 расчётных схем: прямой транспортный шумозащитный экран без надстройки на верхнем свободном ребре, через которую звук

дифрагирует в РТ; Г-образный транспортный шумозащитный экран с надстройкой в виде полки, расположенной под углом, на свободном ребре, через которую звук дифрагирует в РТ; транспортный шумозащитный экран с устройством на свободном ребре, называемом антидифрактором (в виде перфорированного цилиндра с расположенным внутри звукопоглощающим материалом) через который звук дифрагирует в РТ; Т-образный транспортный шумозащитный экран с надстройкой на свободном ребре в виде горизонтальной (по отношению к опорной поверхности) полки, через которую звук дифрагирует в РТ; прямой транспортный шумозащитный экран с надстройкой в виде полки, расположенной на эстакаде, что увеличивает значение $h_{\text{экр}}^{\text{эф}}$; прямой транспортный шумозащитный экран с надстройкой в виде полки, расположенной в акустической необработанной галерее, где эффект дифракции практически отсутствует; транспортный шумозащитный экран с дифракцией звука на боковом ребре экрана; технологический шумозащитный экран в виде замкнутой конструкции (вид сверху), звук проходит через фронтальный экран в РТ; технологический шумозащитный П-образный экран, где звук дифрагирует через фронтальный экран в РТ; транспортный или технологический шумозащитный экран с щелью по всей длине нижней части экрана так, что звук частично дифрагирует через верхнее свободное ребро, а частично проходит через щель в РТ.

4. Получены математические модели для рассматриваемых расчётных схем, теоретический анализ которых показал следующее:
 - эффективность шумозащитных экранов определяется акустическими и геометрическими свойствами условного объёма, эффективной высотой экрана, величиной дифракции звука через свободное ребро, степенью приближения звукового поля к диффузионному;
 - член в формулах, связывающий геометрические и акустические свойства объёма, обеспечивают добавку от 3 до 10 дБА, влияние

эффективной высоты составляет от 7 до 12 дБА, коэффициент диффузности от 1 до 4 дБА, средний коэффициент звукопоглощения объёма от 1 до 4 дБА. Эти цифры суммируются, но с учетом показателя дифракции, например, акустическая эффективность прямого экрана высотой 4 м составляет около 11 дБА;

- надстройка на свободном ребре обеспечивает дополнительно от 0,5 до 2 дБА, Т-образная от 2–3 дБА до 7–8 дБА, антифидрактор до 2–3 дБА;
- при установке экрана на эстакаде за счёт существенного увеличения эффективной высоты эффективность шумозащитного экрана возрастает от 10 до 20 дБА по сравнению расположения экрана вне эстакады;
- при расположении экрана в составе акустически необработанной галереи эффективность его не превышает 2–6 дБА;
- появление в конструкции экрана щели может снизить его эффективность на 5–6 дБА в зависимости от размера щели.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ НА СТЕНДАХ И В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

4.1 Цели и задачи исследований

Основная цель экспериментальных исследований экранов – проверка корректности основных допущений и положений теории, а также точности предложенных методов расчёта.

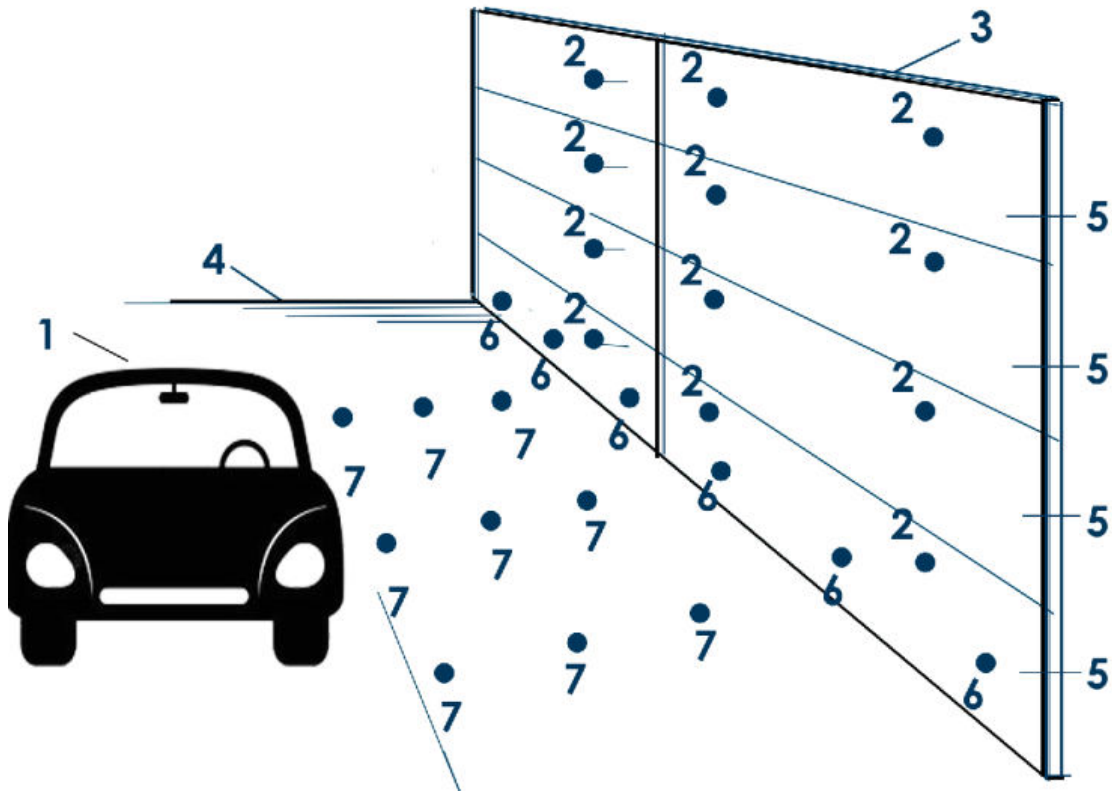
Основные задачи исследования:

- Проверка характера звуковых полей, образованных в условном пространстве между источниками шума и экраном в натурных условиях;
- определение показателя дифракции в натурных условиях и на стендах;
- проверка точности расчётов акустической эффективности ШЭ с использованием стендов;
- подтверждение основных выводов уточнённой теории экранов;
- установление или подтверждение зависимостей акустической эффективности экранов от их конструктивных параметров, технических и акустических свойств и расположения в пространстве.

4.2 Основные положения методики экспериментальных исследований на стендах и в натурных условиях

4.2.1 Методика экспериментов для проверки основных допущений теории в натурных условиях

Характер звукового поля в условном объёме между ИШ и шумозащитным экраном определяется в трёх направлениях согласно рисунку 4.1. Все точки (2, 6) располагались на расстоянии 1м друг от друга, а точки (7) на расстоянии 0,5 м друг от друга.



1 – ИШ, 2 – точки измерений по высоте экрана, 3 – шумозащитный экран, 4 – опорная поверхность, 5 – панели экрана, 6 – точки измерений в нижней части вдоль экрана, 7 – точки измерений в нижней части поперек экрана

Рисунок 4.1 – Схема расположения точек измерений для проверки характера звуковых полей

Число измерений для каждой серии точек должно быть не менее 3-х в трёх местах (сечениях) экрана. Усреднение производилось по результатам измерений по формуле:

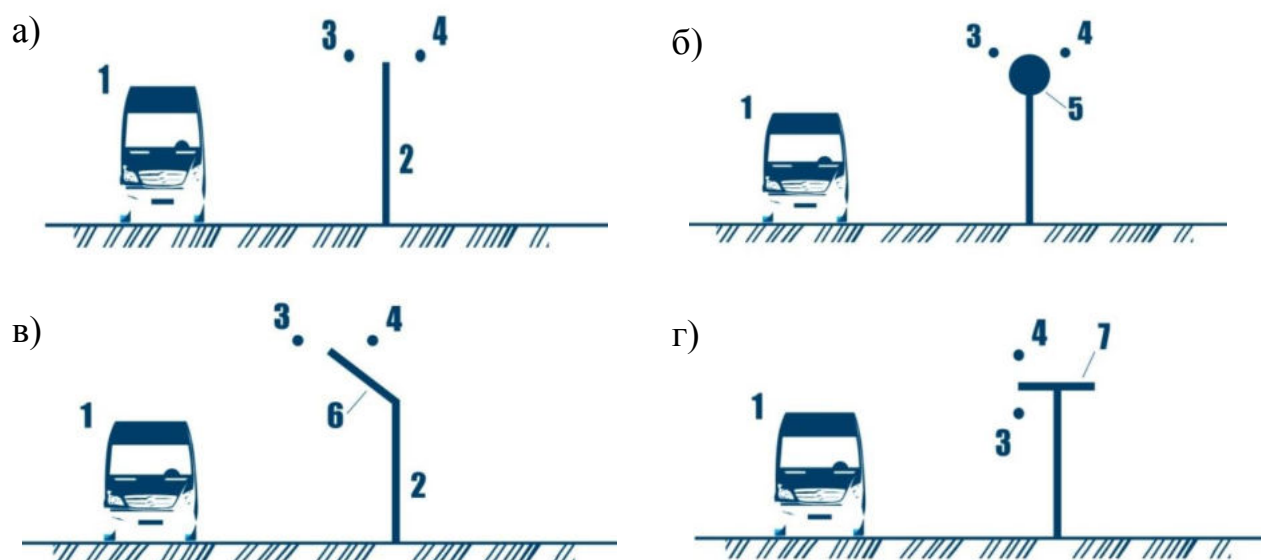
$$\text{ПД} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{n}, \text{ дБ}, \quad (4.1)$$

где L_i – УЗД (УЗ) в i -той точке серии j ;

n – число точек измерений.

4.2.2 Измерение показателя дифракции

Измерение показателя дифракции производилось как на стендах, так и в натуральных условиях. Расположение точек измерений относительно свободного ребра экрана показано на рисунке 4.2.



1 – ИШ, 2 – экран, 3 – точка с внутренней стороны экрана (со стороны ИШ),
4 – точки с внешней стороны экрана, 5 – антидифрактор, 6 – наклонная полка,
7 – горизонтальная полка

а) прямой экран; б) экран с антидифрактором; в) Г-образный экран; г) Т-образный экран

Рисунок 4.2 – Схема расположения измерительных точек при измерениях показателя дифракции

Измерительные точки расположены на срезе свободного ребра (или надстройки экрана) на расстоянии 0,2 м от края экрана. Число измерений для каждого экрана не менее 3-х в разных сечениях экрана.

Показатель дифракции определяется:

$$\text{ПД} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{\text{вн}i}}{n} - \sum_{i=1}^n \frac{L_{\text{нар}i}}{n}, \text{ дБ (дБА)}, \quad (4.2)$$

где $L_{\text{вн}i}$ – значения УЗД (УЗ), измеренные в i -том сечении экрана с внутренней стороны (со стороны ИШ);

$L_{\text{нар}i}$ – значения УЗД (УЗ), измеренные в i -том сечении экрана с наружной стороны.

4.2.3 Стенд для испытаний транспортных экранов: описание, методики проведения экспериментов

Описание стенда. Опытный стенд для испытания транспортных экранов выполнен длиной 48 м и располагается на ровной уплотнённой земляной

площадке размером 100×500 м свободной от растений и искусственных сооружений. Испытываемый экран оборудовали боковыми отгонами длиной по 6 м для предотвращения дифракции звука через свободные боковые рёбра ШЭ. Для монтажа опытных ШЭ установлено 16 стоек высотой 6 м, расстояние между стойками 3 м. в качестве источника звука использовалась труба с отверстиями разного диаметра, в которую поступал сжатый воздух от передвижной компрессорной станции. Общий вид экрана в сборе представлен на рисунке 4.3. Роль боковых отгонов здесь вспомогательная – сделать невозможной дифракцию через боковые ребра в эксперименте.

В плане экран представляет П-образную конструкцию, где боковые свободные рёбра были закрыты боковыми отгонами (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Общий вид установленного экрана

Длина фронтальной части экрана составила 48 м, длина боковых отгонов – 6 м всего для монтажа экранов было установлено 19 стоек, расстояние между

которыми составило 3 м. Высота стоек 6 м. В пространство между стойками устанавливались панели из различных материалов. Все измерения выполнялись только со стороны фронтальной части, т.к. боковые отгоны играли вспомогательную роль.

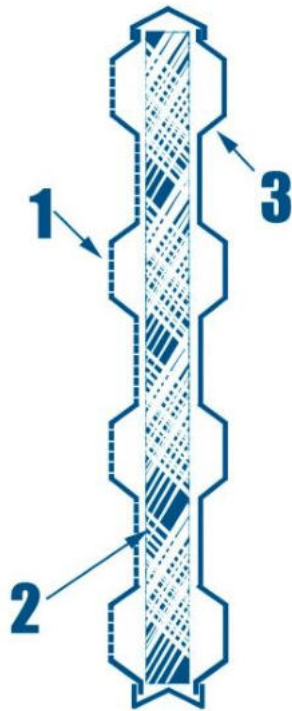
Стенд состоял из двух основных частей: испытываемого экрана и источника шума. Источник представлял собой передвижную компрессорную станцию (ПКС), подающую сжатый воздух в трубу длиной 20 м с отверстиями; выходящий из отверстий воздух создавал высокоинтенсивный аэродинамический шум (рисунок 4.4).



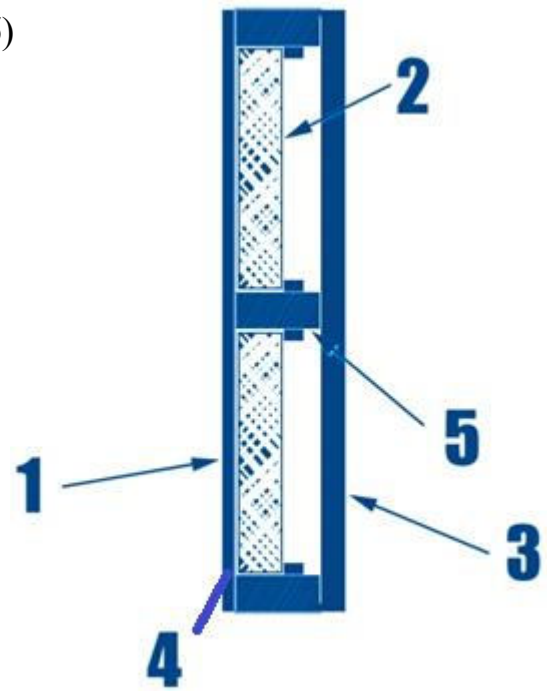
Рисунок 4.4 – Линейный источник шума

Испытываемые конструкции. Испытывались сборно-разборные экраны, изготовленные из импрегнированной древесины и из алюминия. Оба типа экранов набирались из отражающе-поглощающих панелей (рисунок 4.5). Общий вид экранов из древесины и алюминия показан соответственно на рисунках 4.6 и 4.7.

а)



б)



1 – перфорированный лист, 2 – звукопоглощающий материал, 3 – задняя глухая стенка,
4 – звукопрозрачная сетка, 5 – импрегнированная древесина

Рисунок 4.5 – Схемы панелей из алюминия (а) и из импрегнированной древесины (б)



Рисунок 4.6 – Общий вид металлического ШЭ



Рисунок 4.7 – Общий вид деревянного ШЭ

Характеристики испытываемых панелей экранов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики акустических панелей

Материал панели	Толщина панели, мм	Размеры, мм	Толщина основной звукоизолирующей части, мм	ЗПМ	Коэффициент перфорации
Импregnированная древесина	120	1000*2960	18	минеральная вата	0,8
Алюминий	120	500*2960	1,2	минеральная вата	0,3

Отметим важное преимущество звукопоглощающих свойств панелей из древесины (коэффициент перфорации 0,8) по сравнению с алюминиевыми (коэффициент перфорации 0,3).

Измерения акустической эффективности экранов. Акустическая эффективность экрана в данной точке определяется расчётом по формуле:

$$\Delta L = L_{\text{ти}}^{6/\text{э}} - L_{\text{ти}}^{с/\text{э}}, \text{ дБ (дБА)}, \quad (4.3)$$

где $L_{\text{ти}}^{6/\text{э}}$ – УЗД (УЗ) в точке измерений (контрольной точке) без установленного экрана, дБ (дБА);

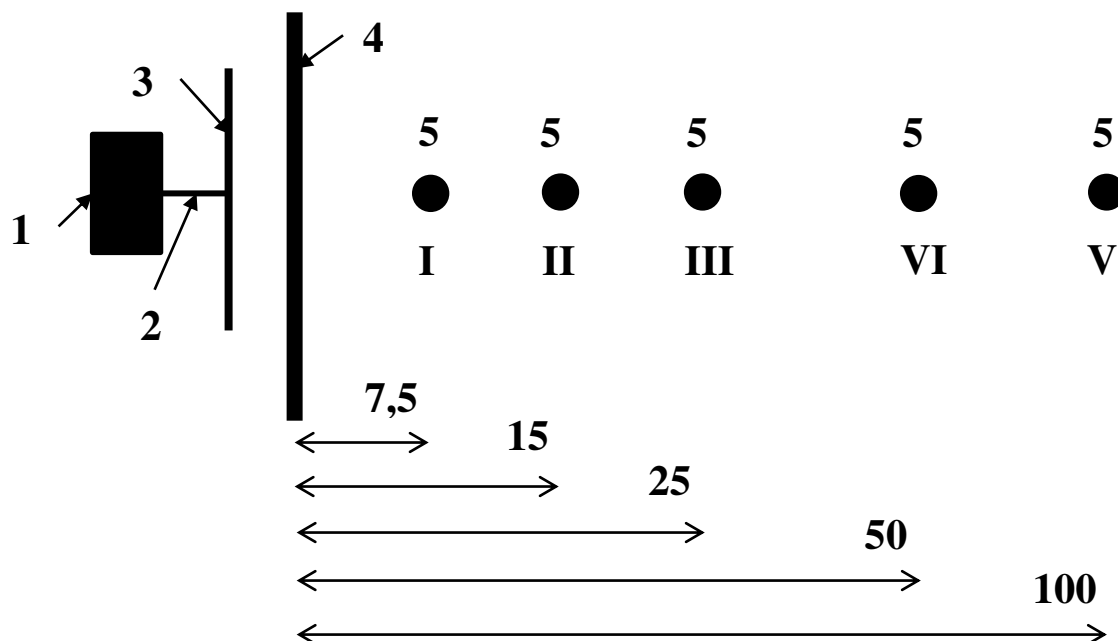
$L_{\text{ти}}^{с/\text{э}}$ – УЗД (УЗ) в точке измерений с экраном дБ (дБА).

Основным расстоянием для измерения акустической эффективности согласно ГОСТ Р 54932-2012 [308] было принято расстояние 25 м. дополнительно проводились измерения на расстояниях 7,5; 15; 25; 50 и 100 м (рисунок 4.8) измерения во всех точках проводились одновременно (рисунок 4.9).

Выполнялись две группы измерений: основная, когда ЗПМ панелей испытываемых экранов были ориентированы со стороны ИШ (отражающе-поглощающие панели), и дополнительная, когда со стороны ИШ располагались обратные стороны панелей (отражающие панели).



Рисунок 4.8 – Расположение измерительных точек для определения акустической эффективности шумозащитного экрана



1 – передвижная компрессорная станция, 2 – соединительная труба,
3 – линейный источник шума (перфорированная труба), 4 – ШЭ, 5 – точки измерения

Рисунок 4.9 – Схема расположения измерительных точек для определения акустической эффективности шумозащитного экрана

Испытывались ШЭ, панели которых были изготовлены из алюминия и импрегнированной древесины. Испытывались ШЭ с отражающими и отражающе-поглощающими панелями. Измерения проводились с целью исследовать влияние высоты ШЭ, расстояния до точки измерений и др. на его акустическую эффективность. Состав выполненных измерений приведён в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Состав измерений для определения акустической эффективности экранов

Панели экранов	Материал экрана	Расстояние, м	Высота экрана, м
Отражающе-поглощающие	алюминий	7,5; 15; 25; 50; 100	1, 2, 3, 4, 5, 6
	импрегнированная древесина	7,5; 15; 25; 50; 100	1, 2, 3, 4, 5, 6
Отражающие	алюминий	25	1, 4, 6

Измерения звукоизоляции. Звукоизоляция при измерениях в натуральных условиях разность УЗД (УЗ) между значениями, измеренными вблизи испытываемого экрана изнутри, то есть со стороны ИШ и снаружи.

$$ЗИ = L_{внi} - L_{нарi}, \text{ дБ (дБА)}, \quad (4.4)$$

где $L_{внi}$ – УЗД (УЗ), измеренные с внутренней стороны экрана в i -той точке;

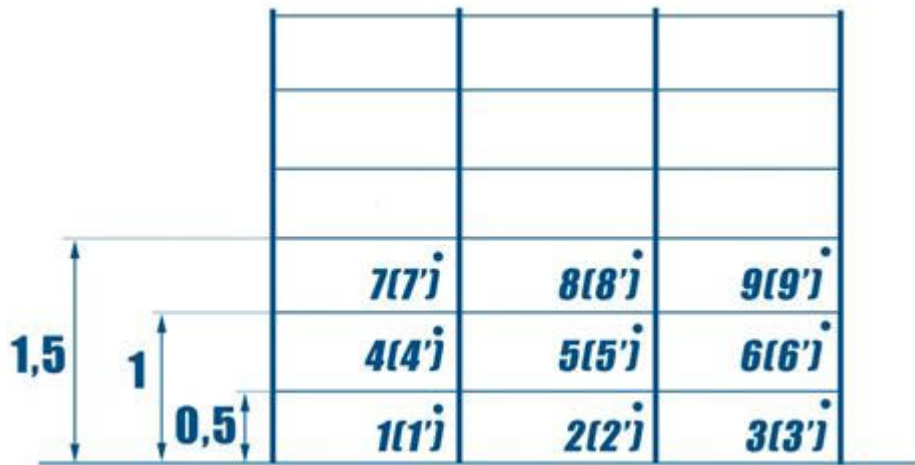
$L_{нарi}$ – звукоизоляция экрана измеренная с наружной стороны в i -той точке.

Приведенная звукоизоляция экрана

$$ЗИ_{\text{экр}} = \sum_{i=1}^n \frac{ЗИ_i}{n}, \quad (4.5)$$

где n – число точек измерений.

Расположение измерительных точек приведено на рисунке 4.10.



1-9 – точки с внутренней стороны, 1'-9' – точки с внешней стороны

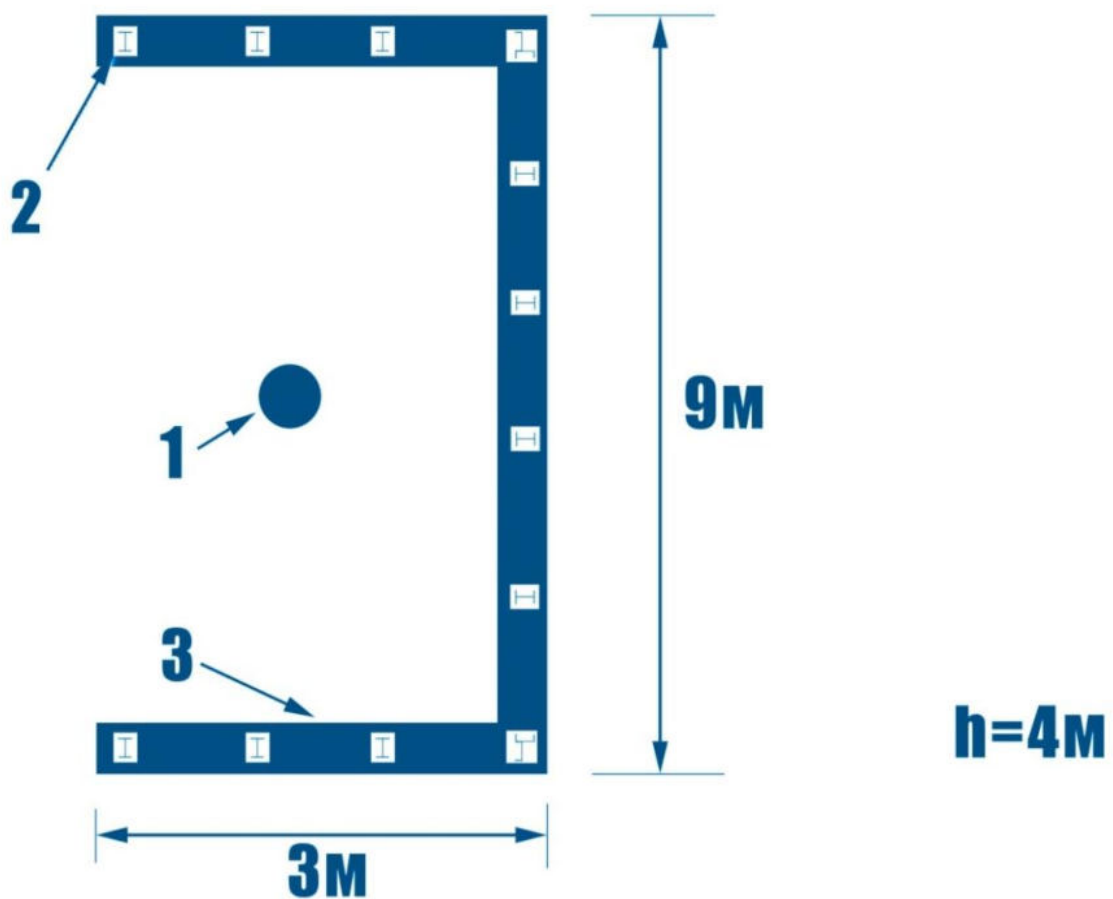
Рисунок 4.10 – Схема расположения точек измерений при измерении звукоизоляции

4.2.4 Стенд для испытаний технологических экранов: описание, методики проведения экспериментов

Описание стенда. Для размещения стенда была подготовлена испытательная площадка размером 50×100 м, свободная от любых сооружений. Площадка представляла собой ровную уплотнённую поверхность.

В центре площадки были установлены стойки для сооружения опытного шумозащитного экрана. Панели экрана были изготовлены из импрегнированной древесины. Экран П-образный в плане состоял из фронтальной части (фронтальный экран) и боковых отгонов экранов. В отличие от предыдущего стенда, боковые отгоны здесь играют важную роль, так как являются обязательным элементом конструкции технологических экранов.

Общий вид опытного экрана с установленным внутри источником шума показан на рисунках 4.11 и 4.12.

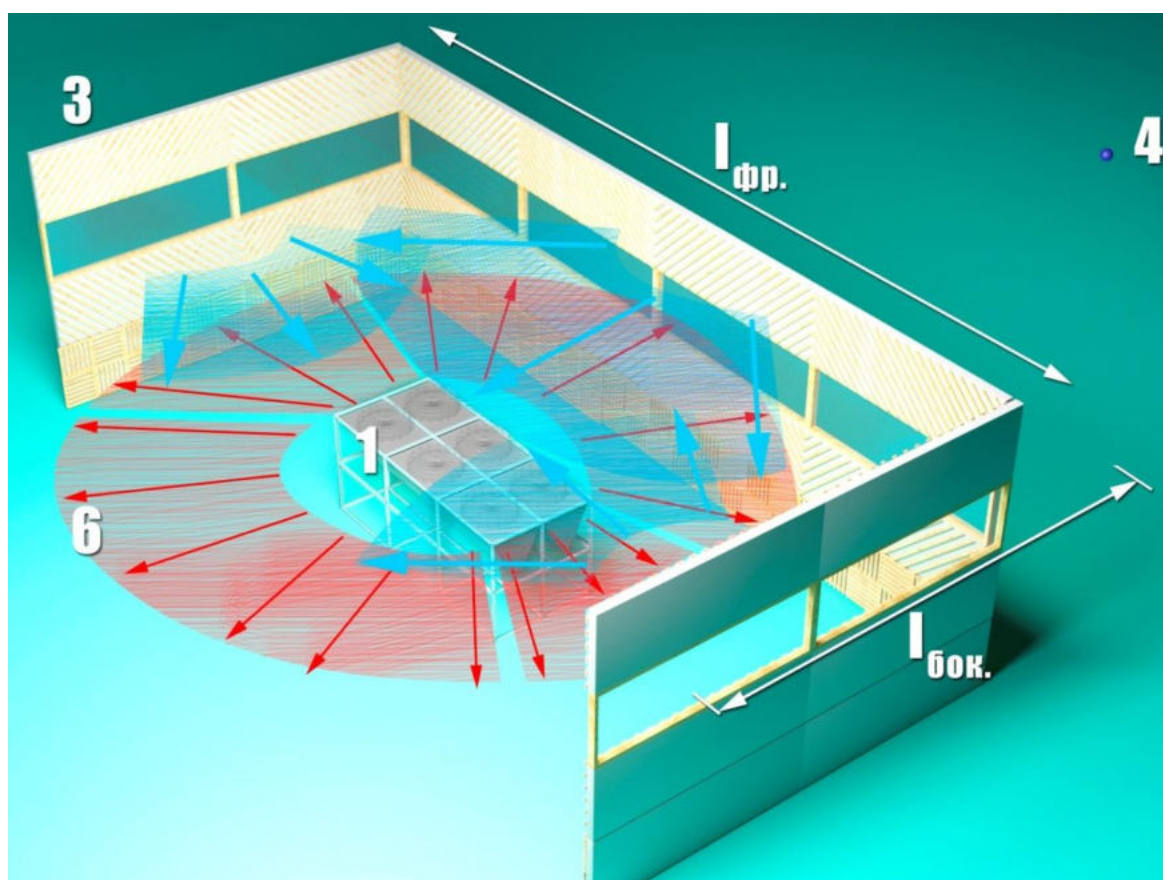


1 – искусственный ИШ, 2 – стойки, 3 – боковые отгоны, 4 – фронтальный экран

Рисунок 4.11 – Общий вид (сверху) стенда для испытаний технологических экранов

Испытываемые конструкции. Испытывался сборно-разборный экран, отражающая часть панелей которого изготовлена из импрегнированной

древесины, в которой применен ЗПМ из минеральной ваты, защищённой звукопоглощающей сеткой (рисунок 4.5 б). акустические панели длиной 3 м и толщиной 120 мм. Панели размещались между стойками, промежутки были уплотнены резиновыми прокладками. Толщина отражающей части панели 20 мм, ЗПМ – 100 мм.



1 – искусственный ИШ, 2 – стойки, 3 – боковые отгоны, 4 – точка измерений

Рисунок 4.12 – Общий вид опытного экрана с установленным внутри источником шума

Основная серия измерений выполнялась на П-образной конструкции (рисунок 4.13). Дополнительные эксперименты были проведены в отсутствии боковых отгонов. Также выполнялись эксперименты, когда экран был смонтирован таким образом, чтобы отражающая часть панели была расположена со стороны источника шума.



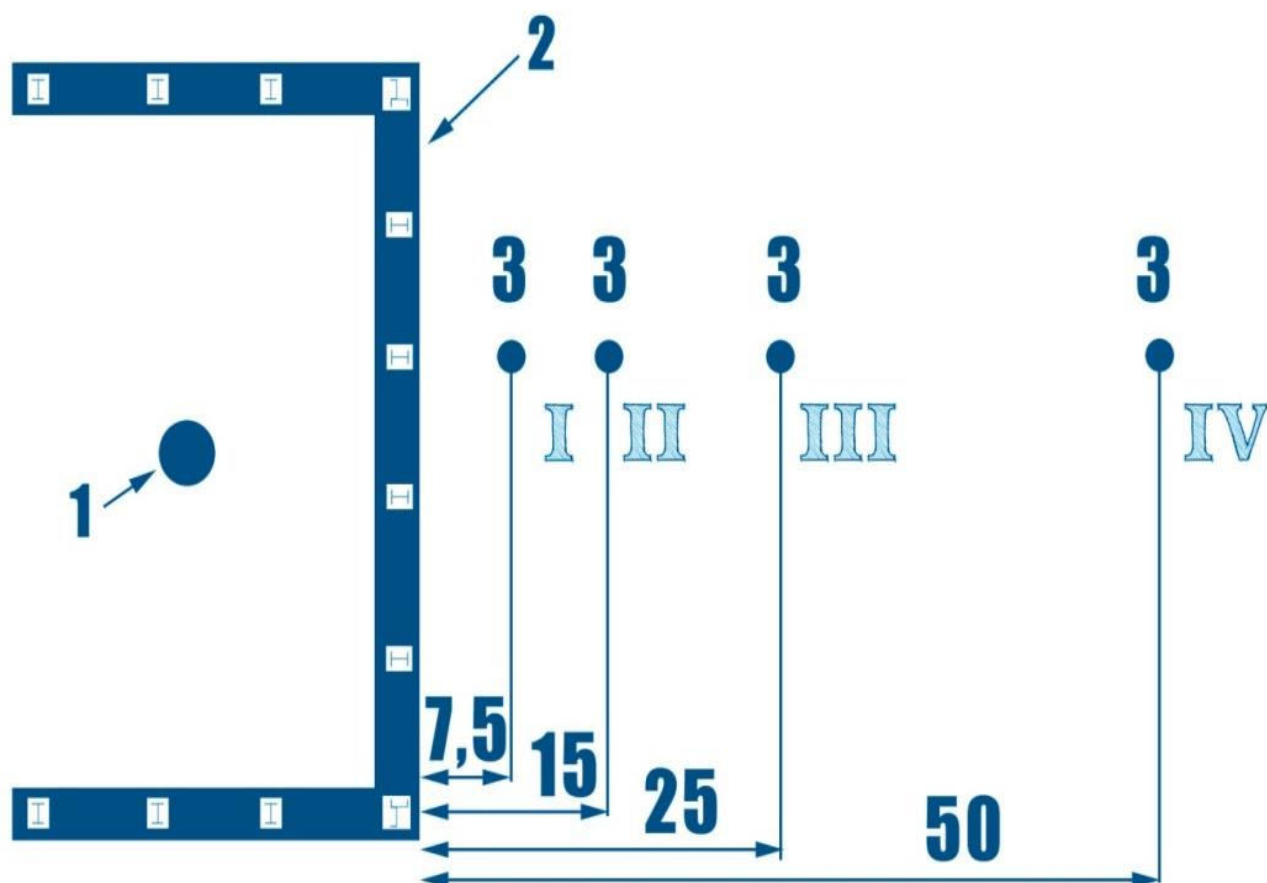
Рисунок 4.13 – П-образная конструкция для основной серии измерений

Измерение акустической эффективности экрана и звукоизоляции. Основные измерения акустической эффективности опытного экрана проводились на расстоянии 25 м. В качестве дополнительных точек были использованы также расстояния 7,5; 15; 50 м (рисунок 4.14).

Выполняли по 4 серии измерений:

- П-образный экран с отражающе-поглощающими акустическими панелями;
- П-образный экран с отражающими акустическими панелями;
- только фронтальный экран без боковых отгонов с отражающе-поглощающими панелями.
- П-образный в плане опытный экран с надстройками на свободном ребре (Г-образной и с антидифрактором)

Состав выполненных измерений приведён в таблице 4.3.



1 – ИШ, 2 – опытный экран,
3 – точки измерений: (3I – 7,5 м; 3II – 15 м; 3III – 25 м; 3IV – 50 м)

Рисунок 4.14 – Общий вид стенда и схема расположения точек измерений

Таблица 4.3 – Состав измерений
для определения акустической эффективности опытного шумозащитного экрана

Панели экранов	Форма экрана	Расстояние, м	Высота экрана, м
Отражающе-поглощающие	П-образная	7,5; 15; 25; 50; 100	1, 2, 3, 4
-//-/-	линейная	25	4
Отражающие	П-образная	25	4
Отражающе-поглощающие	с Г-образной надстройкой на свободном ребре П-образный (в плане) экран	25	4
-//-/-	с антидифрактором на свободном ребре	25	4

Измерения в измерительных точках проводились одновременно. Число измерений в каждой точке не менее 3. Измерения звукоизоляции выполнялись на экране высотой 4 м. Расположение точек измерения аналогично рисунку 4.10. Обработка результатов измерений по формулам (4.3) и (4.4).

4.2.5 Условия измерений

Относительная влажность, температура окружающей среды, атмосферное давление соответствовали рабочим условиям эксплуатации приборов.

Все измерения осуществлялись при отсутствии атмосферных осадков, скорости ветра ниже 5 м/с, температуре 10–18°C с использованием ветрозащиты микрофона.

Измерения постоянного шума при включенном источнике звука проводились в режиме мультizaписи также шумомерами российского производства («ОКТАВА–ЭлектронДизайн») с фиксацией октавных уровней звукового давления со среднегеометрическими частотами от 63 до 8000 Гц (L_p , дБ).

Микрофон был направлен в сторону источника шума. Измерения проводились в диапазоне Д2 (26–127 дБА).

Измерения постоянного уровня звука проводились в течение 30 сек. Фоновый шум измерялся, но не учитывался, т.к. разница между создаваемым искусственным источником звука уровнем шума и фоновым уровнем шума, составляла более 10 дБА.

4.2.6 Акустическая аппаратура

Измерительные приборы, используемые при проведении измерений в обоих случаях, соответствовали 1-му классу по ГОСТ 17187–2010 [314], и представляли собой:

- шумомер–виброметр, анализатор спектра ОКТАВА–110А–ЭКО, заводской номер АУ110096, предусилитель Р200 №060018, микрофон ВМК-205 №4600 (свидетельство о поверке 16/491);
- шумомер–виброметр, анализатор спектра ОКТАВА–110А–ЭКО, заводской номер АУ120118, предусилитель Р200 №112671, микрофон ВМК-205 №5633 (свидетельство о поверке 16/5311);
- шумомер–виброметр, анализатор спектра ОКТАВА–110А–ЭКО, заводской номер АУ120124, предусилитель Р200 №060016, микрофон ВМК-205 №448 (свидетельство о поверке 16/4891);
- шумомер–виброметр, анализатор спектра ОКТАВА–110А (Белая), заводской номер БФ160273, предусилитель Р200 №154661, микрофон МК-233 №2565 (свидетельство о поверке 16/3841);
- шумомер, анализатор спектра CESVA, модель SC310, заводской номер Т233754 (свидетельство о поверке);
- акустический прибор (калибратор), заводской номер 05000 (свидетельство о поверке 0076873).

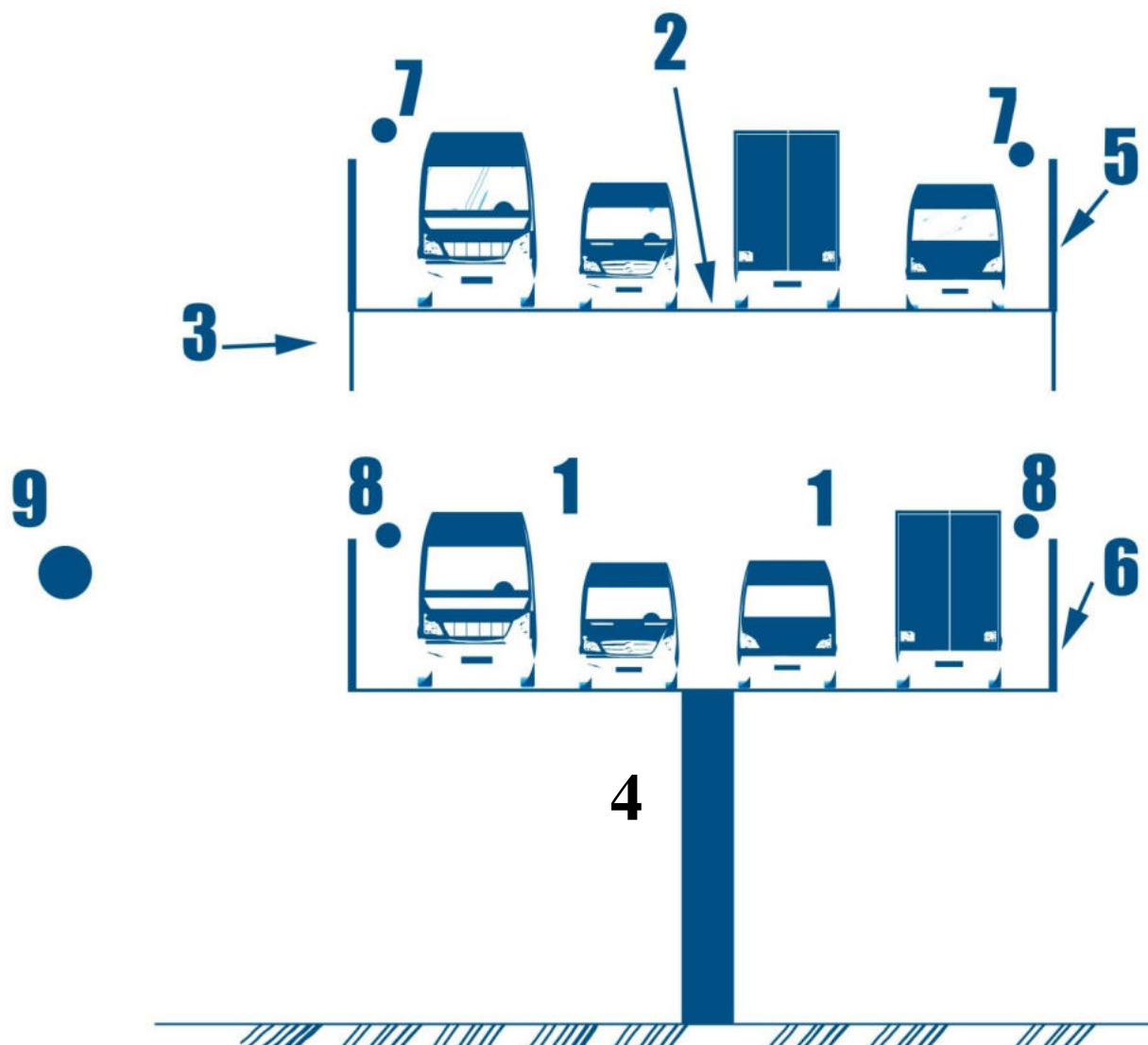
Калибровка аппаратуры проводилась непосредственно до и сразу после каждой серии измерений калибратором 1-го класса.

Вспомогательные устройства:

- компьютер настольный;
- кабели для передачи данных;
- штативы.

4.2.7 Методология измерений экранов расположенных в галерее

В галерее образуется сложное звуковое поле, характер которого было необходимо определить. Проводились две серии измерений: на верхней части эстакады и в галерее (рисунок 4.15).



1 – ИШ, 2 – открытая (верхняя) часть, 3 – галерея, 4 – эстакада,
 5 – экраны в верхней части, 6 – экраны в галерее, 7 – точки измерений в верхней части,
 8 – точки измерений в галерее 9 – точки измерений снаружи

Рисунок 4.15 – Схема расположения измерительных точек при измерениях на эстакаде

Дополнительно проводились измерения снаружи искусственного сооружения.

Число точек измерения звуковых полей не менее 10 в каждой серии.

4.2.8 Определение погрешности измерений

Одним из важных вопросов достоверности и точности акустических измерений является выбор минимального числа объектов исследования.

Опыт измерений шума показывает, что достоверные характеристики могут быть получены, когда число измеренных объектов одного типа (n) удовлетворяет условию:

$$n \geq 3. \quad (4.6)$$

Если разброс УЗД в каждой октавной полосе не превышает 5 дБ, а разброс УЗ не превышает 3 дБА, то исходное число измерений считается достаточным. Если разброс превышает указанные числа, то проверяется отсутствие грубых ошибок и измерений методом Греббса.

Ошибка измерений определяется по формуле:

$$\Delta L_i = t_n \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}}, \quad (4.7)$$

где t_n – коэффициент Стьюдента, определяемый по таблице 4.4;

σ_i – среднеквадратичное отклонение УЗД в i -ой октаве (или отклонение УЗ) для n числа измерений, определяемое по формуле (4.8).

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{L}_i - L_{n_i})^2}, \quad (4.8)$$

где $\bar{L}_i$ – среднеарифметическое значение УЗД в i -ой октаве для n измерений, дБ, определяемое по формуле (4.9).

$$\bar{L}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{n_i}, \quad (4.9)$$

где L_{ni} – значение УЗД в i -ой октаве для каждого из n измерений, дБ;

n – исходное число измерений, шт.

Таблица 4.4 – Значение t_n в зависимости от числа измерений для доверительной вероятности $P = 0,95$

Число измерений	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент Стьюдента t_n	4,3	3,2	2,8	2,6	2,4	2,4	2,4	2,3

Истинное значение $\bar{L}_i$ находится в интервале:

$$\bar{L}_i - t_n \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}} \leq \bar{L}_i \leq \bar{L}_i + t_n \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}}. \quad (4.10)$$

4.3 Исследования звуковых полей и определение показателя дифракции в натуральных условиях

4.3.1 Исследование характера звуковых полей

Основное допущение теории – гипотеза о квазидиффузном звуковом поле множественных переотражений в условном пространстве между ИШ и шумозащитным экраном вблизи экрана требует экспериментального подтверждения в натуральных условиях. Были выполнены несколько серий экспериментов, определяющих характер звукового поля в продольном и поперечном сечениях в нижней части экрана, а также изменения характера звукового поля по высоте экрана.

Данные измерений УЗД и УЗ в поперечном направлении испытанных экранов приведены в таблице 4.5. Данные о характере звукового поля в продольном направлении приведены в таблице 4.6. Рассматривая звуковые поля в каждом из испытанных экранов по отдельности нетрудно убедиться, что отклонения УЗД во всех полосах частот не превышают ± 2 дБ, а УЗ ± 2 дБА т.е. можно утверждать, что звуковое поле в поперечном и продольном направлениях диффузное по признаку равномерности УЗД и УЗ.

Таблица 4.5 – Данные измерений звукового поля в поперечном направлении

Номер опытного экрана	Номер сечения	Номер ТИ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	I	1	84	78	76	77	80	76	71	65	83
		2	86	77	75	76	80	78	70	63	82
		3	86	78	77	78	81	77	69	65	81
	II	1	83	78	75	77	81	77	71	64	84

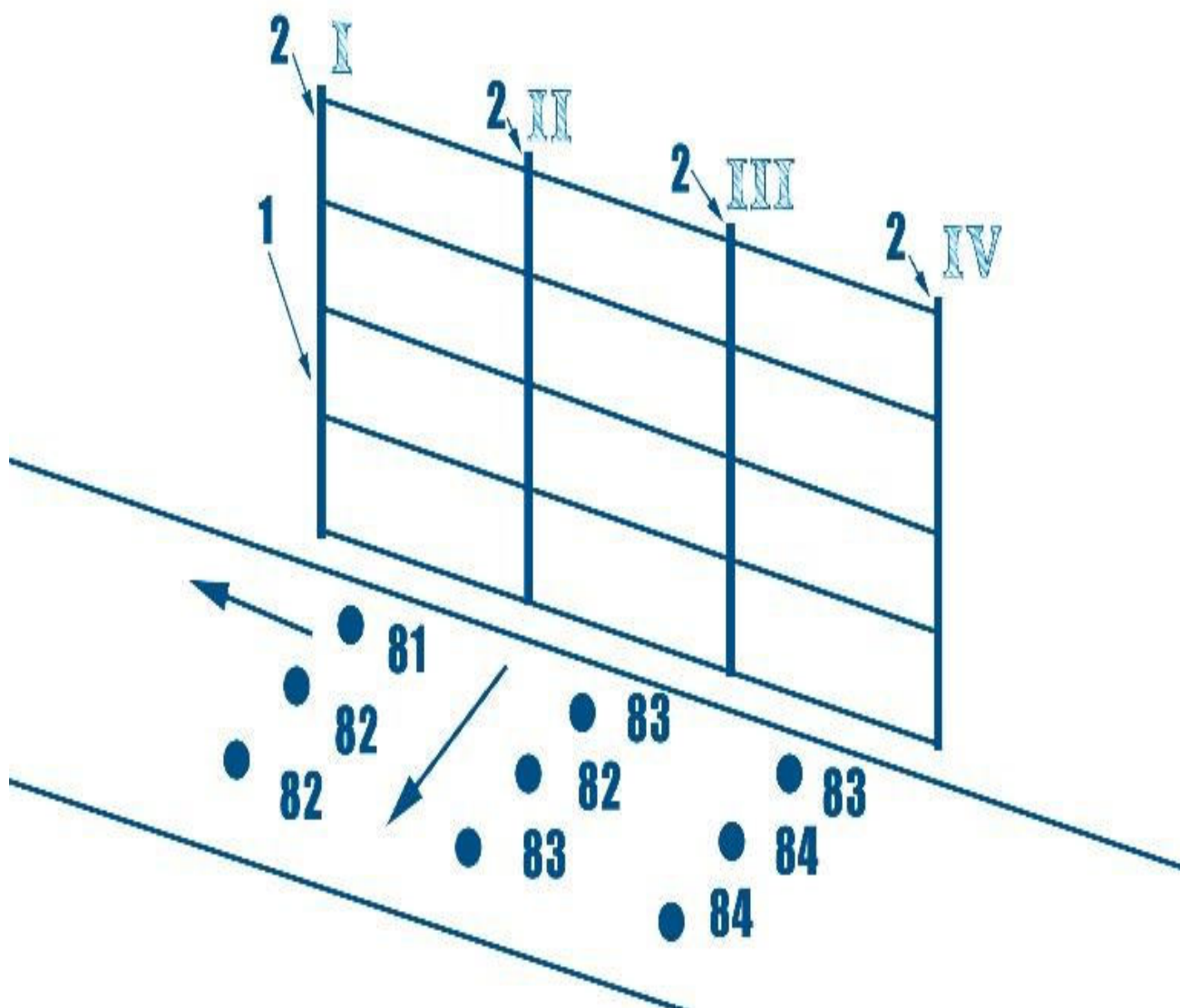
Продолжение таблицы 4.5

Номер опытного экрана	Номер сечения	Номер ТИ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	II	2	85	78	75	76	80	75	69	62	82
		3	83	76	73	77	79	76	70	63	82
	III	1	83	79	76	78	81	76	71	65	84
		2	84	80	76	77	80	74	69	63	83
		3	82	81	77	77	79	75	70	64	82
2	I	1	85	74	73	74	79	77	73	62	83
		2	82	72	71	72	77	76	70	63	81
		3	83	72	70	71	78	75	70	63	80
	II	1	83	72	72	74	77	76	71	61	81
		2	82	71	70	72	76	75	70	63	80
		3	81	71	69	71	76	74	69	63	79
	III	1	82	75	74	75	77	77	72	61	82
		2	81	73	72	72	75	74	70	63	81
		3	83	71	70	72	75	74	70	62	80
3	I	1	84	77	71	75	80	75	70	64	82
		2	82	75	72	77	81	77	71	63	84
		3	80	75	74	78	83	79	73	65	85
	II	1	83	78	72	77	79	75	70	64	85
		2	81	77	73	78	82	77	72	64	86
		3	80	77	74	79	83	79	73	65	86
	III	1	81	78	73	75	80	75	70	64	82
		2	83	76	73	77	81	77	71	63	84
		3	83	77	75	78	82	78	73	65	85

Таблица 4.6 – Данные измерений звукового поля в продольном направлении

Номер опытного экрана	Номер сечения	Номер ТИ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	I	1	86	78	77	78	81	77	69	65	81
		2	83	76	73	77	79	76	70	63	82
		3	82	81	77	77	79	75	70	64	82
	II	1	86	77	75	76	80	78	70	63	83
		2	85	78	75	76	80	75	69	62	82
		3	84	80	76	77	80	74	69	63	83
	III	1	84	78	76	77	80	76	71	65	83
		2	83	78	75	77	81	77	71	64	84
		3	83	79	76	78	81	76	71	65	84
2	I	1	83	72	70	71	78	75	70	63	80
		2	81	71	69	71	76	74	69	63	79
		3	83	71	70	72	75	74	70	62	80
	II	1	82	72	71	72	77	76	70	63	81
		2	82	71	70	72	76	75	70	63	80
		3	81	73	72	72	75	74	70	63	81
	III	1	85	74	73	74	79	77	73	62	83
		2	83	72	72	74	77	76	71	61	81
		3	82	75	74	75	77	77	72	61	82
3	I	1	80	75	74	78	83	79	73	65	85
		2	80	77	74	79	83	79	73	65	86
		3	83	77	75	78	82	78	73	65	85
	II	1	82	75	72	77	81	77	71	63	84
		2	81	77	73	78	82	77	72	64	86
		3	83	76	73	77	82	77	71	63	84
	III	1	84	77	71	75	80	75	70	64	82
		2	83	78	72	77	79	75	70	64	85
		3	81	78	73	75	80	75	70	64	83

Для иллюстрации вышеизложенных выводов на рисунке 4.16 показан характер звуковых полей в нижней части одного из испытанных экранов в дБА.



1 – экран, 2 – сечения I-III звуковое поле в продольном направлении ←
в поперечном направлении ↑

Рисунок 4.16 – Пример характера звукового поля в нижней части экрана

Вторым важным допущением теории является гипотеза о снижении интенсивности звукового поля по высоте экрана. Данные измерений УЗД и УЗ в точках, расположенных по высоте экрана приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Данные измерений изменения звукового поля по высоте экранов

Номер опытного экрана	Номер сечения	Номер ТИ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	I	1	85	77	75	79	84	78	73	64	86
		2	84	77	74	78	83	78	72	63	85
		3	83	76	73	76	80	75	70	62	83
		4	82	75	72	74	79	74	69	60	82
	II	1	84	77	75	80	84	78	71	63	86
		2	83	76	74	78	83	78	70	62	85
		3	81	76	73	76	80	75	70	60	82
		4	81	75	72	74	79	74	69	59	82
	III	1	85	76	74	79	84	78	70	63	86
		2	84	76	74	77	82	78	70	62	85
		3	84	75	73	76	80	75	68	61	82
		4	83	75	72	74	79	73	69	59	81
2	I	1	82	77	71	75	77	75	71	65	81
		2	82	76	70	73	76	74	70	61	84
		3	81	76	66	72	75	73	68	60	79
		4	81	73	65	70	70	70	66	59	78
	II	1	89	77	72	76	78	76	72	66	82
		2	89	77	71	73	76	75	71	64	80
		3	87	76	70	73	75	75	70	63	79
		4	84	76	69	71	70	69	65	60	77
	III	1	88	77	71	75	78	76	73	67	81

Продолжение таблицы 4.7

Номер опытного экрана	Номер сечения	Номер ТИ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
2	III	2	88	76	70	73	76	75	71	65	80
		3	87	75	70	73	76	73	70	63	79
		4	84	73	67	68	72	68	65	61	77
3	I	1	86	80	75	80	83	79	74	67	86
		2	86	79	72	79	82	78	73	66	85
		3	84	78	71	79	80	78	70	66	84
		4	83	77	70	76	77	73	69	63	81
	II	1	85	81	76	80	83	78	73	67	85
		2	85	80	73	79	82	78	73	66	84
		3	83	79	73	79	82	76	70	65	84
		4	82	78	72	77	78	74	68	60	80
	III	1	87	80	74	79	83	78	72	66	85
		2	87	79	72	78	81	77	72	65	84
		3	85	78	71	76	81	77	68	65	83
		4	85	78	70	74	77	70	67	61	81
Примечания: 1 – 0,5 м; 2 – 1,5 м; 3 – 2,5 м; 4 – 3,5 м.											

При увеличении высоты УЗД снижаются на высоте от 0,5 м до 3,5 м до 2 дБ на каждые 0,5м, а УЗ от 3 до 5 дБА по всей высоте, то есть приблизительно на каждый 1 м высоты происходит снижение на 1–1,5 дБА, снижение УЗД по высоте приблизительно 1 дБ на каждый метр высоты. На рисунке 4.17 проиллюстрировано снижение УЗ по высоте для одного из экранов. Таким образом, принятая гипотеза о снижении УЗД и УЗ по мере увеличения высоты экрана можно считать подтверждённой.

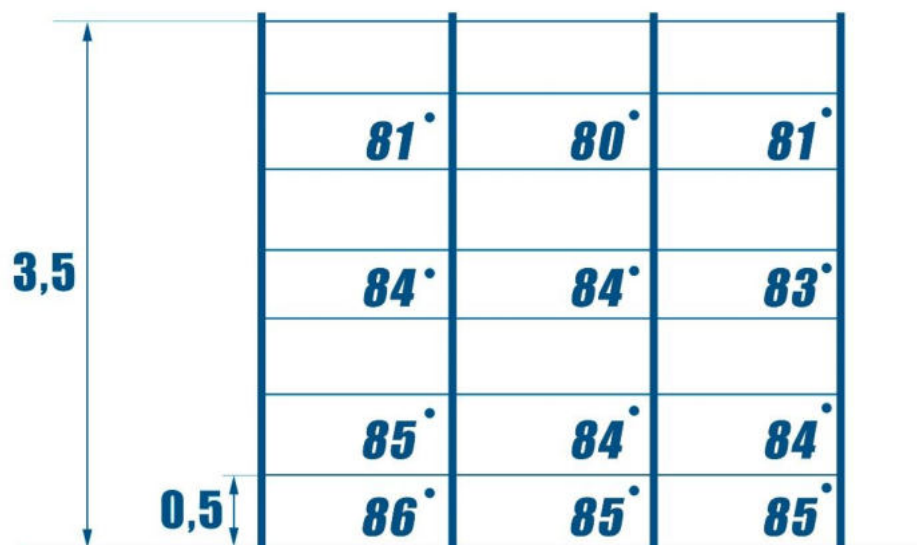


Рисунок 4.17 – Снижение УЗ в дБА при увеличении высоты экрана

4.3.2 Измерения показателя дифракции

Показатель дифракции – важная характеристика необходимая для проведения расчётов. Данные измерений показателя дифракции приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Значения УЗД и УЗ для показателя дифракции

Номер опытного экрана	Номер сечения	Номер ТИ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	I	1	78	76	71	75	80	76	70	64	83
		2	74	71	65	67	70	64	55	50	72
	II	1	80	78	74	77	82	78	70	65	85
		2	76	72	67	67	70	64	56	59	72
	III	1	84	78	76	77	82	78	71	66	85
		2	80	72	68	68	71	65	57	54	73
2	I	1	76	71	76	76	78	73	69	65	81

Продолжение таблицы 4.8

Номер опытного экрана	Номер сечения	Номер ТИ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
2	I	2	73	65	68	68	68	61	55	50	70
	II	1	78	73	75	77	80	75	68	60	82
		2	74	67	69	69	70	62	54	45	70
	III	1	78	74	76	78	80	74	70	63	82
		2	73	68	69	70	69	61	55	49	74
3	I	1	78	74	71	70	75	73	68	60	79
		2	79	68	65	61	65	60	54	47	68
	II	1	79	72	72	71	76	73	69	61	79
		2	75	66	64	62	65	59	55	48	67
	III	1	81	70	70	69	74	72	68	60	78
		2	77	64	62	60	63	60	54	46	66

Вычисленные значения показателя дифракции приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Показатель дифракции

Номер опытного экрана	Номер сечения	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	I	4	5	6	8	10	12	15	14	11
	II	4	6	7	10	12	14	14	14	13
	III	4	6	8	9	11	13	14	14	12
среднее		4	6	7	9	11	13	14	14	12
2	I	3	6	7	8	10	12	14	15	11
	II	4	6	6	8	10	13	14	15	12
	III	5	6	7	8	9	13	15	14	12
среднее		4	6	7	8	10	13	14	15	12

Показатель дифракции имеет частотно зависимый характер с наклоном приблизительно 1,5 дБ/октаву, интегральное значение ПД = 12 дБА.

Данные расчетов эффективности транспортного экрана в сравнении с полученными экспериментальными данными указаны в таблице 4.10 и на рисунке 4.18.

Параметры	Рассчитанные значения, в дБ, в зависимости от частоты f, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Исходные данные								
$\alpha_{\text{экр}}$	0,2	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6
$h_{\text{экр}} = 4\text{м}, h_{\text{иш}} = 1\text{м}, r = 5\text{м}$								
$\alpha_{\text{иш}}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\alpha_{\text{пов}}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Продолжение таблицы 4.10

Параметры	Рассчитанные значения, в дБ, в зависимости от частоты f, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$h_{\text{экр}}\alpha_{\text{экр}} + h_{\text{экр}}\alpha_{\text{экр}} + r\alpha_{\text{пов}} + r$	7,5	8,3	8,7	9,5	9,5	9,5	9,0	9,0
$\bar{\alpha}_{\text{об}}$	0,5	0,5	0,55	0,6	0,6	0,6	0,55	0,55
$\Psi_{\text{об}}$	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0
Рассчитанные значения								
$10 \lg \frac{h_{\text{экр}}\alpha_{\text{экр}} + h_{\text{экр}}\alpha_{\text{экр}} + r\alpha_{\text{пов}} + r}{r_0}$	8,7	9,0	9,4	9,8	9,8	9,8	9,5	9,5
$10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}})$	3	3	3,5	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5
$10 \lg \Psi_{\text{об}}$	3	3	3	4	4	4	3	3
$10 \lg \frac{h_{\text{экр}}}{\lambda}$	-1,3	1,7	4,6	7,6	10,6	13,6	16,7	19,7
ПД	-4	-6	-7	-9	-11	-13	-14	-14
Числовая добавка	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
$10 \lg \frac{R}{R+r}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Рассчитанная эффективность	5,4	6,7	9,5	12,5	13,5	14,5	15	18
Эксперимент	7	10	13	13	14	17	17	20

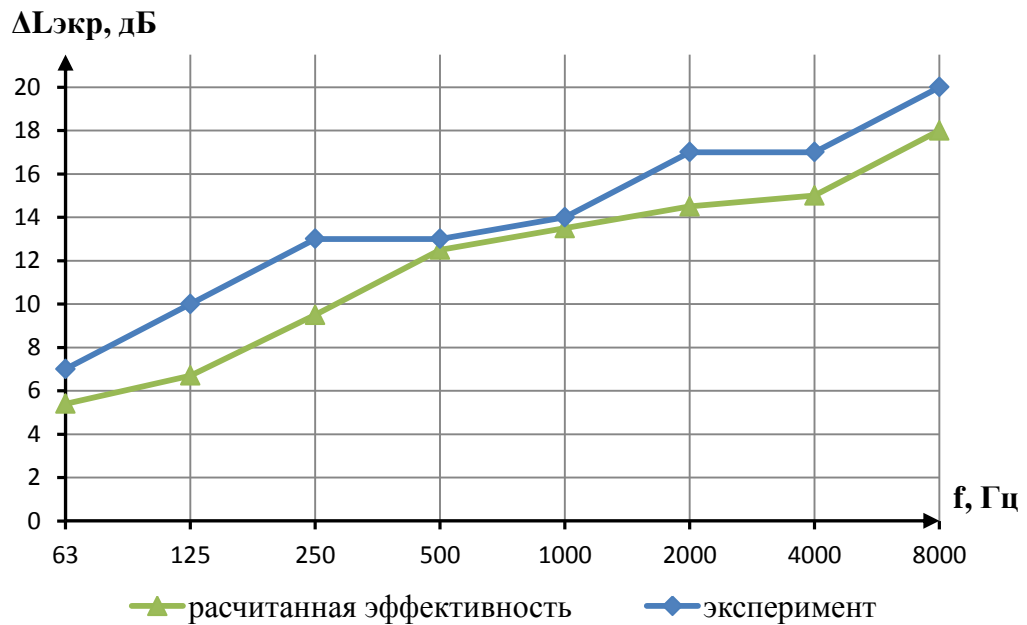


Рисунок 4.18 – График рассчитанной и экспериментальной акустической эффективности ШЭ

В таблице 4.11 – показано сравнение эффективности экрана от линейного источника шума, полученное по формуле, с экспериментом и с методом Маекавы.

Таблица 4.11 – Сравнение эффективности экрана от линейного источника шума, полученное по формуле, с экспериментом и с методом Маекавы

Полученные результаты	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Эффективность по формуле	6	7	10	13	14	15	15	18
Эксперимент	7	10	12	13	14	17	17	20
По формуле Маекавы	6	9	12	15	18	21	24	27

Анализируя данные значения, можем видеть высокую сходимость расчетных данных с экспериментом (до 2дБ во всем диапазоне частот) согласно рисунку 4.19.

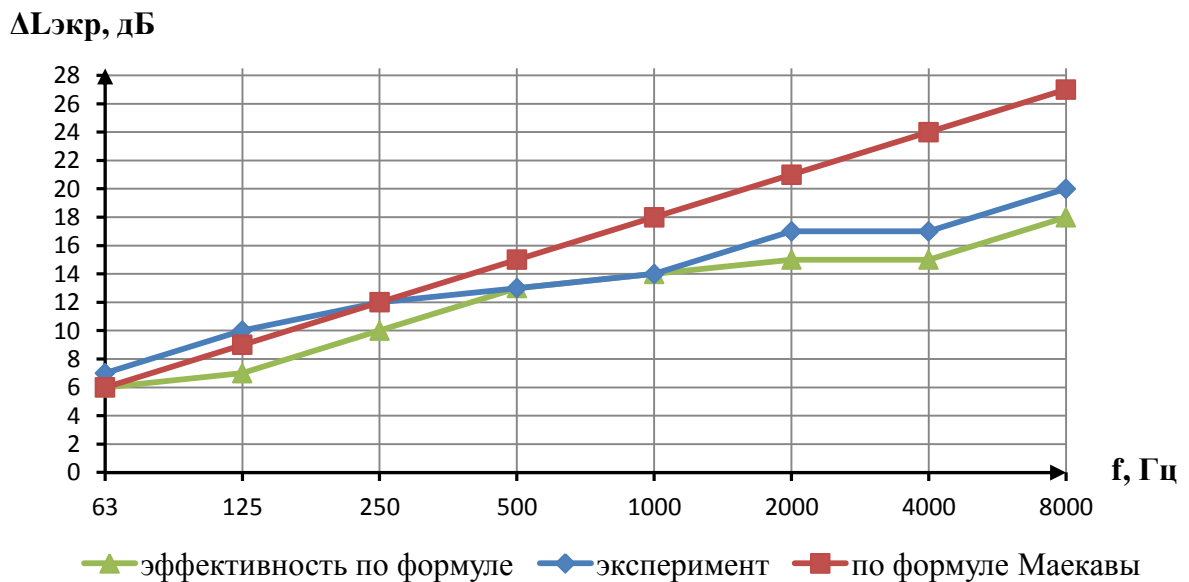


Рисунок 4.19 – Сравнение эффективности экрана от линейного источника шума, полученное по формуле, с экспериментом и с методом Маекавы

В таблице 4.12 указано сравнение эффективности технологического экрана от стационарного источника шума, полученное по формуле, с экспериментом и с методом Маекавы согласно рисунку 4.20.

Таблица 4.12 – Сравнение эффективности экрана от стационарного ИШ, полученной по формуле, экспериментально и по методом Маекавы

Номер сечения	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Эффективность по формуле	5	9	11	14	15	16	18	21
Эксперимент	2	5	8	10	13	18	21	25
По формуле Маекавы	6	9	12	15	18	21	24	27

$\Delta L_{\text{экp}}$, дБ

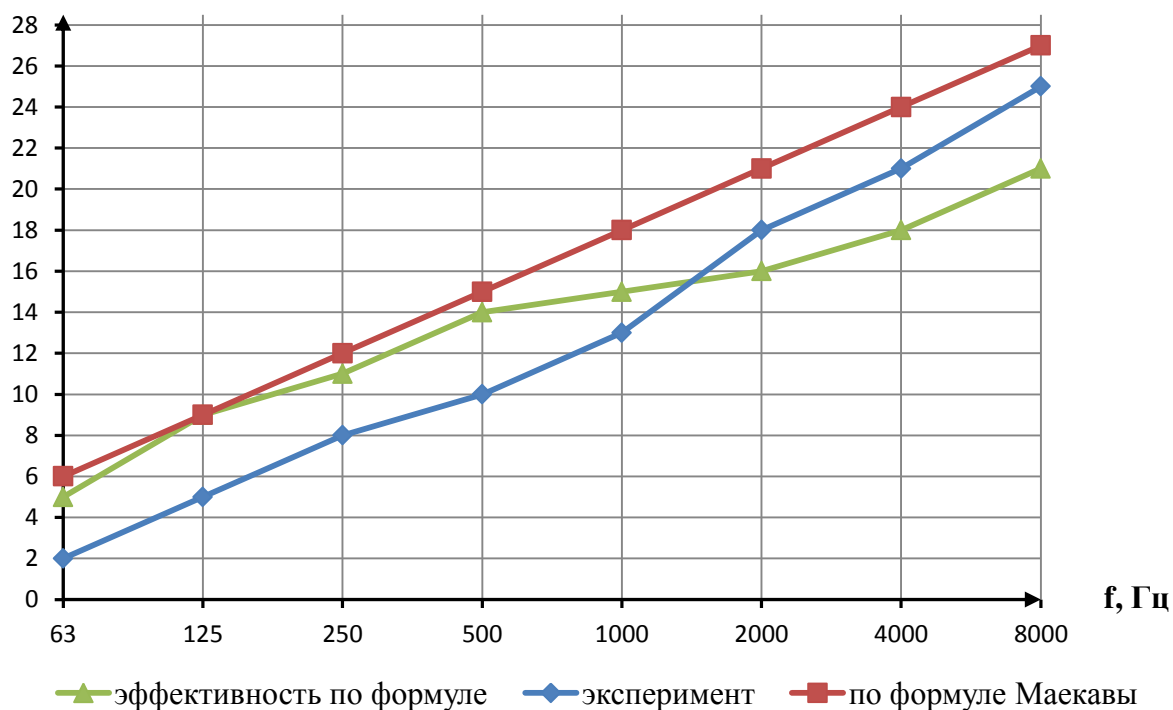


Рисунок 4.20 – Сравнение эффективности экрана от стационарного источника шума, полученное по формуле, с экспериментом и с методом Маекавы

Отклонение полученных расчётных данных от эксперимента составило от ± 2 дБ до ± 3 дБ, что вполне приемлемо. Сравнение с расчётом по формуле 3. Маекавы показало отклонение до 4–7 дБ.

Расчёт акустической эффективности П-образного технологического экрана представлен в таблице 4.13. Сравнительные данные акустической эффективности опытного П-образного экрана с линейным источником шума указаны на рисунке 4.21

Таблица 4.13 – Расчёт акустической эффективности П-образного технологического экрана

Параметры	Рассчитанные значения, в дБ, в зависимости от частоты f, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Исходные данные								
$\alpha_{\text{экр}}$	0,2	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6
$\alpha_{\text{пов}}$	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$A_{\text{об}}$	50,5	57,5	61,5	67,5	67,5	67,5	64,5	64,5
$\bar{\alpha}_{\text{об}}$	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$h_{\text{экр}} = 2\text{м}, l_{\text{бок}} = 3\text{м}, l_{\text{фр}} = 9\text{м}$								
Рассчитанные значения								
$10 \lg \frac{A}{A_0}$	17	18	18	18	18	18	18	18
$10 \lg \Psi_{\text{об}}, \Psi_{\text{об}} = 0,5-0,6$	2	3	3	4	4	4	4	4
$10 \lg \frac{h_{\text{экр}}}{\lambda}, h_{\text{экр}} = 2\text{м}$	-4,3	-1,3	1,7	4,7	7,7	10,7	13,7	16,7
$-10 \lg \frac{R}{R_0}, R = 25\text{м}$	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14
$-10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{об}})$	2	3	3	4	4	4	4	4
ПД	-4	-6	-7	-9	-11	-13	-14	-14
$-10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2h_{\text{экр}}}, l_{\text{экр}} = 9$	-	-	-	-	-	-	-	-
$-10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2R}$	7	7	7	7	7	7	7	7
Числовая добавка	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Рассчитанная эффективность	5	9	11	14	15	16	18	21

Продолжение таблицы 4.14

Параметры	Рассчитанные значения, в дБ, в зависимости от частоты f , Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
по формуле Маекавы $10 \lg 20N$	6	9	12	15	18	21	24	27
Эксперимент	2	5	8	10	13	18	21	25

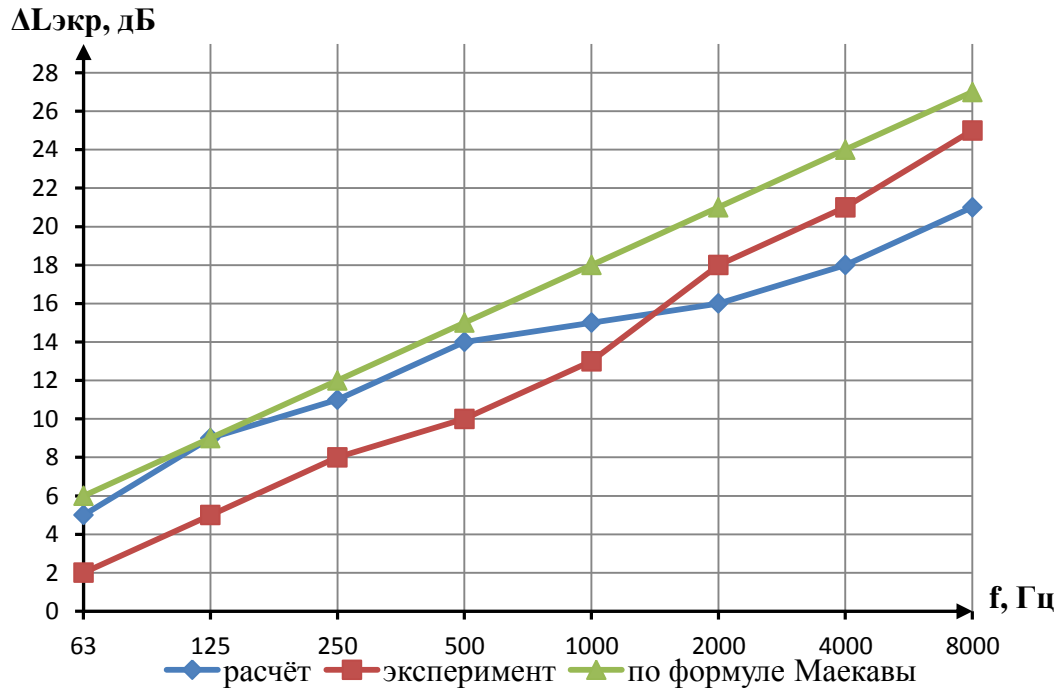


Рисунок 4.21 – Сравнительные данные акустической эффективности технологического опытного высотой $h_{\text{экp}} = 2$ м на расстоянии 25 м согласно расчётам, эксперименту и формуле Маекавы $\Delta L = 10 \lg 20N$

Отклонения расчётных данных от экспериментальных в основном в диапазоне частот 250–4000 Гц не более ± 3 дБ.

4.5 Исследование транспортных экранов на открытом стенде

4.5.1 Исходные данные

В таблице 4.14 приведены данные измерений УЗД и УЗ на различных расстояниях от источника шума без установленного экрана.

Таблица 4.14 – Измеренные УЗД и УЗ в контрольных точках без установленного экрана

Расстояние от условного экрана, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
7,5	85	90	85	82	85	82	76	76	90
15	81	88	82	79	76	76	77	73	86
25	80	85	80	76	72	72	73	73	81
50	72	78	73	65	66	65	71	70	76
100	67	70	61	59	60	55	56?	54?	62

Приведённые в таблице 4.9 данные служили исходными для определения акустической эффективности испытываемых шумозащитных экранов.

4.5.2 Исследование зависимости акустической эффективности экрана от высоты

В таблице 4.15 приведены измеренные УЗД и УЗ для опытных экранов из древесины, в таблице 4.16 из алюминия (на расстоянии 25 м).

Таблица 4.15 – Измеренные значения УЗД и УЗ для опытного экрана из импрегнированной древесины в зависимости от высоты

Высота экрана, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	79	82	74	69	63	62	60	59	73
2	76	80	72	66	61	60	58	56	70
3	74	78	70	64	59	57	55	53	68
5	70	74	66	60	55	53	50	49	64
6	68	72	64	57	53	54	48	45	63

Таблица 4.16 – Измеренные значения УЗД и УЗ
для опытного экрана из алюминия разной высоты

Высота экрана, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	79	82	75	70	65	63	63	61	74
2	76	79	72	67	62	60	60	57	71
3	75	77	70	65	61	58	58	55	69
4	73	75	67	63	58	55	56	53	67
5	71	73	65	60	56	53	53	50	65
6	70	71	63	58	53	51	50	48	64

Вычисленные значения акустической эффективности опытных экранов приведены в таблице 4.17 и показаны на рисунках 4.22–4.24.

Таблица 4.17 – Вычисленные значения акустической эффективности
для опытных экранов разной высоты

Материал экрана	Высота условного экрана, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Импregnированная древесина	1	1	3	6	7	9	11	13	14	8
	2	4	5	8	10	11	13	15	17	11
	3	6	7	10	12	13	16	18	20	13
	5	10	11	14	16	17	20	23	24	17
	6	12	13	16	19	19	22	25	27	18
Алюминий	1	1	3	5	6	7	9	10	12	7
	2	4	6	8	9	10	12	13	16	10
	3	5	8	10	11	11	14	15	18	12
	4	7	10	13	13	14	17	17	20	14
	5	9	12	15	16	16	19	20	23	16
	6	10	14	17	18	19	21	23	25	17

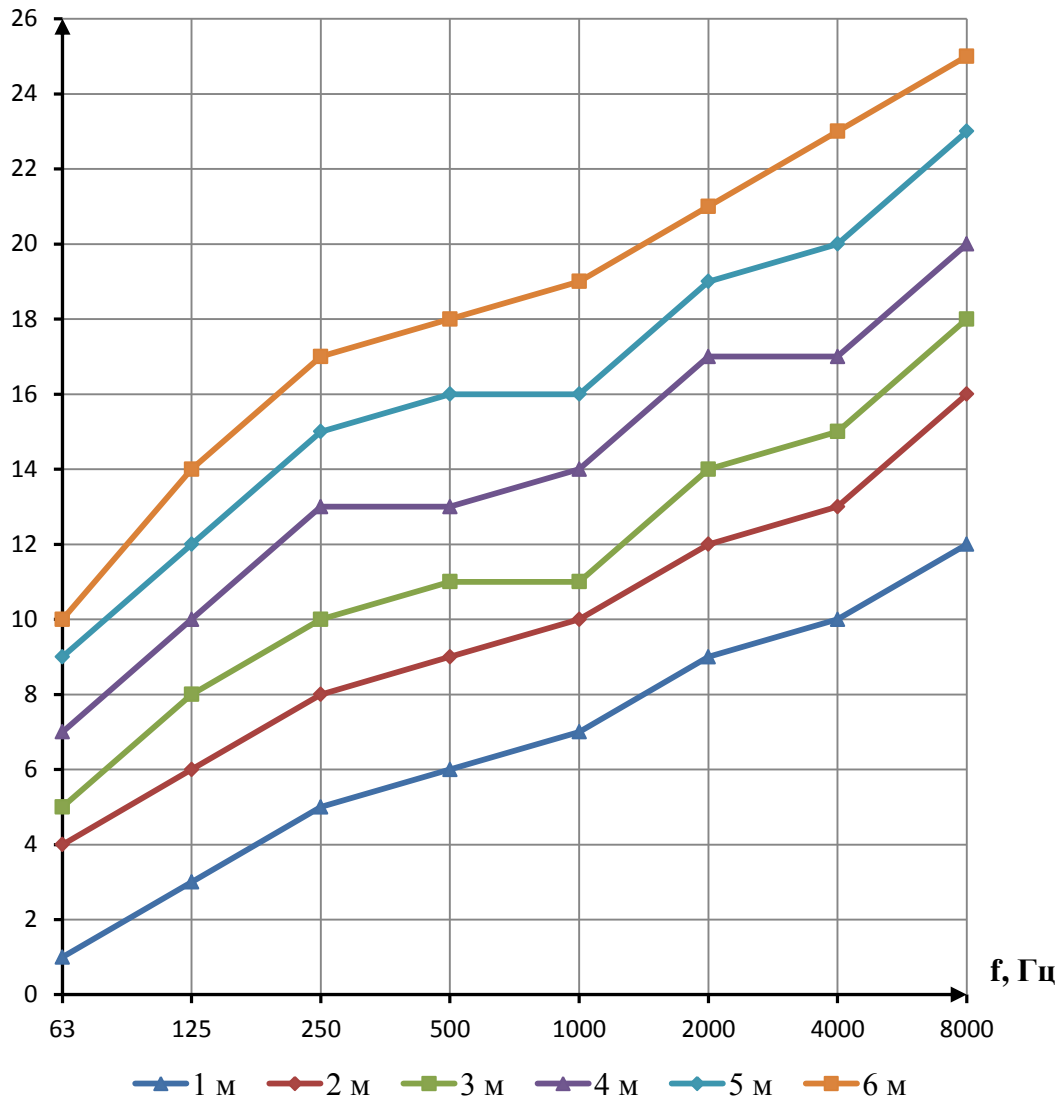
$\Delta L_{\text{экp, дБ}}$ 

Рисунок 4.22 – Спектры акустической эффективности металлического шумозащитного экрана различной высоты (измерения на расстоянии 25 м)

Характер экспериментальных кривых в целом соответствует теоретическим данным (рисунок 3.8), спектры частотно-зависимые, рост, в среднем, около 2 дБ/октаву.

С увеличением высоты от 1 до 6 м эффективность ШЭ возрастает на 12–13 дБ и на 10 дБА (рисунок 4.23).

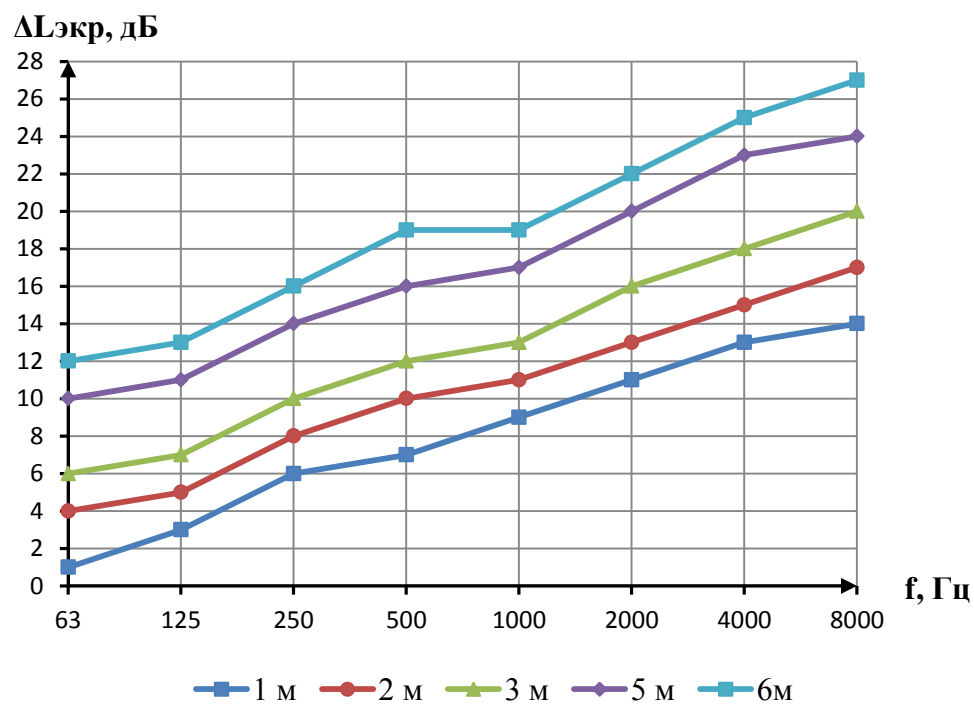


Рисунок 4.23 – Спектры акустической эффективности деревянного шумозащитного экрана различной высоты (измерения на расстоянии 25 м)

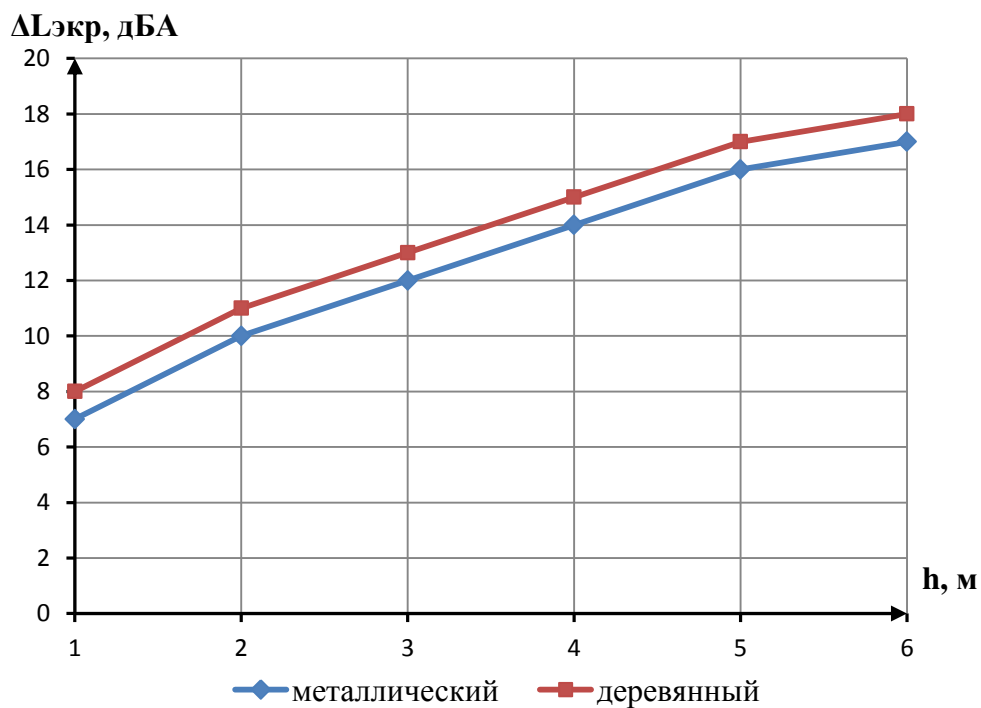


Рисунок 4.24 – Сравнительная эффективность шумозащитных экранов на частоте 1000 Гц при изменении высоты, дБА (измерения на расстоянии 25 м)

Просматривается заметное увеличение УЗД при каждом удвоении высоты экрана (в основном увеличение 2–6 дБ). Заметно некоторое различие в эффективности (1–2 дБ): экраны из импрегнированной древесины более эффективны, чем из алюминия.

Ещё более заметны отмеченные закономерности на графике (рисунок 4.24). При каждом удвоении высоты экрана эффективность возрастает от 3 до 5 дБА (в среднем на 4 дБА). Экраны из импрегнированной древесины на 1 дБА более эффективны, чем экраны из алюминия. При увеличении высоты от 5 до 6 м эффективность возрастает всего на 1 дБА. Отмеченная закономерность позволяет проектировщикам более обоснованно выбирать высоту экрана.

4.5.3 Связь эффективности экрана с расстоянием до точки измерений

В таблице 4.18 приведены значения УЗД и УЗ при измерениях металлического экрана высотой 3 м с различными значениями расстояния до ТИ

Таблица 4.18 – Измеренные УЗД и УЗ для металлического $h_{\text{экp}} = 3$ м на различных расстояниях до ТИ

Расстояние от ИШ до точки измерений, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
7,5	80	79	72	78	68	61	59	56	74
15	79	78	71	67	63	59	57	52	72
25	75	77	70	65	61	58	58	55	69
50	70	71	64	55	56	52	56	53	65
100	65	62	52	50	50	43	42	38	52

В таблице 4.19 приведены вычисленные значения акустической эффективности экрана на различных расстояниях.

Таблица 4.19 – Вычисленные значения акустической эффективности опытного экрана на различных расстояниях

Расстояние, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Эффективность, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
7,5	5	11	13	14	17	21	23	24	16
15	4	10	11	12	15	17	20	21	14
25	5	8	10	11	11	14	15	18	12
50	4	7	9	10	10	13	15	17	11
100	2	6	9	9	10	12	14	16	10

Отмечено заметное (до 1,5 дБ при каждом удвоении) снижение эффективности ШЭ (рисунок 4.25) с увеличением расстояния, которое составило 6 дБ при изменении расстояния от 7,5 до 100 м.

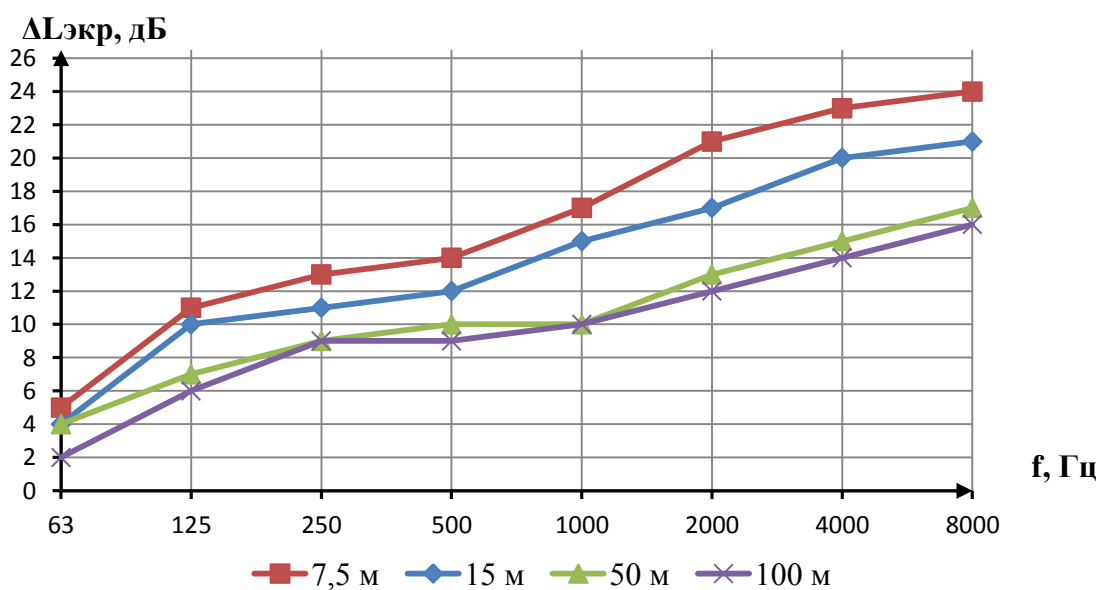


Рисунок 4.25 – Снижение акустической эффективности ШЭ с увеличением расстояния при высоте экрана 2 м

Более наглядно это проявляется при измерениях в дБА. Снижение эффективности при почти 4х удвоениях расстояния составило 6 дБА (рисунок 4.26), приблизительно по 1,5 дБА при каждом удвоении. Эта закономерность должна учитываться при проектировании экранов.

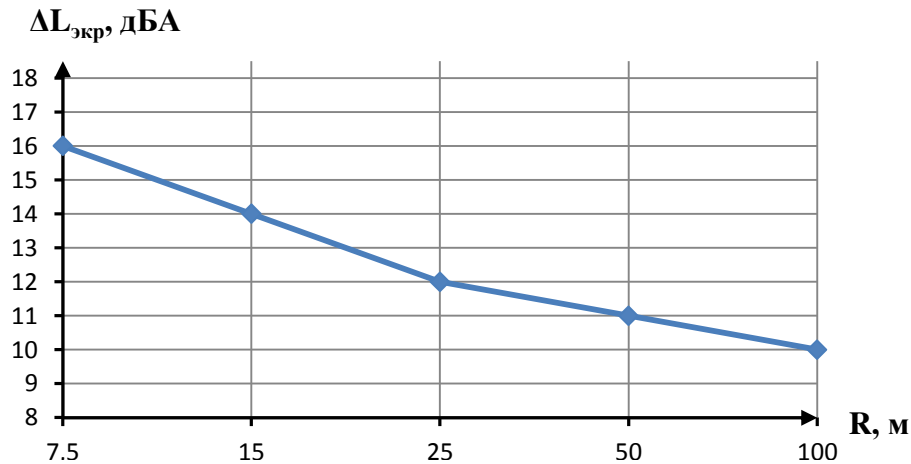


Рисунок 4.26 – Снижение акустической эффективности шумозащитного экрана с высотой $h_{\text{экp}} = 3$ м с увеличением расстояния R , м (в дБА).

4.5.4 Влияние звукопоглощающих свойств экрана на его эффективность

Эксперименты проводились на металлическом экране высотой 2, 4 и 6 м на стандартном расстоянии 25 м при наличии отражающе-поглощающих панелей (с ЗПМ) и отражающих панелей (без ЗПМ). Результаты измеренных УЗД и УЗ приведены в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Измеренные значения УЗД и УЗ для опытного экрана из алюминия разной высоты

Высота, м	Наличие (+)/ Отсутствие (-) ЗПМ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
2	+	77	81	74	69	65	63	63	60	73
	-	76	79	72	67	62	60	60	57	71

Продолжение таблицы 4.20

Высота, м	Наличие (+)/ Отсутствие (-) ЗПМ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
4	+	75	78	71	67	63	60	51	48	70
	-	73	75	67	63	58	55	56	53	67
6	+	73	75	68	64	58	57	56	54	68
	-	70	71	63	58	53	51	50	48	64

В таблице 4.21 и на рисунке 4.27 приведены данные по сравнительной эффективности металлического экрана различной высоты.

Таблица 4.21 – Сравнительная акустическая эффективность
металлического экрана с ЗПМ и без ЗПМ

Высота, м	Наличие (+)/ Отсутствие (-) ЗПМ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
2	+	4	6	8	9	10	12	13	16	10
	-	3	4	6	7	7	9	10	13	8
4	+	7	10	13	13	14	17	17	20	14
	-	5	7	9	9	9	12	12	15	10
6	+	10	14	17	18	19	21	23	25	17
	-	7	10	12	14	14	15	17	19	12

Наличие звукопоглощения – важный фактор, увеличивающий эффективность экрана. При этом нетрудно заметить, что чем больше эквивалентная площадь звукопоглощения (определяемая в данном случае высотой экрана), тем заметней разница в значениях эффективности. Для экрана высотой 2 м разница в эффективности 1–2 дБ в низко-среднечастотном диапазоне и 3 дБ на высоких частотах. Для экрана высотой 6 м в низко-среднечастотном

диапазонах увеличение эффективности за счёт звукопоглощения 3–5 дБ, а на высоких частотах 5–6 дБ (рисунок 4.27).

Влияние звукопоглощения зависит от эквивалентной площади звукопоглощения в соответствии с рисунком 4.27 и таблицей 4.21. За счёт звукопоглощения эффективность ШЭ возрастает от 1–3 дБ (2 дБА) для экранов высотой 2 м до 3–6 дБ (5 дБА) для экранов высотой 6 м.

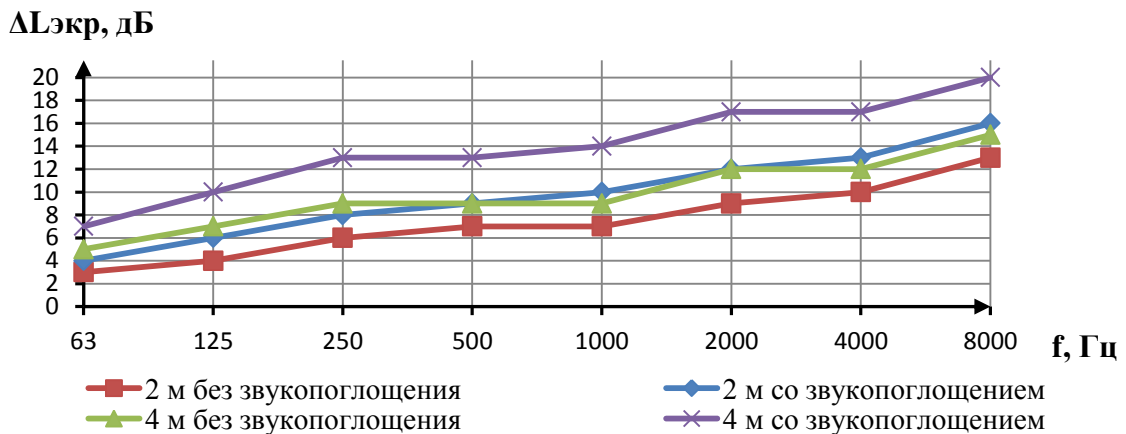


Рисунок 4.27 – Сравнительная акустическая эффективность шумозащитных экранов высотой 2 м и 4 м со звукопоглощением и без звукопоглощения

4.5.5 Влияние звукоизоляции экранов на их эффективность

Недостаточная звукоизоляция может заметно снизить эффективность экрана, если звукоизоляция приближается к значению акустической эффективности экрана. Представляет интерес получить значения звукоизоляции опытных экранов на опытном стенде по сравнению со значениями звукоизоляции, полученной при акустических измерениях в камерах, а также в сравнении с акустической эффективностью экранов, так как результаты, полученные на стенде, могут отличаться от результатов, полученных в натурных условиях.

Были выполнены измерения звукоизоляции экранов из импрегнированной древесины и алюминия высотой 6 м. Результаты измерений приведены в таблице 4.22.

В таблице 4.23 и на рисунках 4.28, 4.29 даны результаты сравнительных значений звукоизоляции, полученных в натурных условиях и в камере.

Материал экрана	Условия измерений	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Металлический	АК*	-	18	23	31	36	41	42	-	30
	ОС**	13	15	15	22	26	28	29	29	22
Деревянный	АК*	-	21	26	28	33	36	40	-	29
	ОС**	18	20	22	24	27	29	30	30	26
Примечания: АК* - акустическая камера (панели) ОС** - измерения на опытном стенде (экран)										

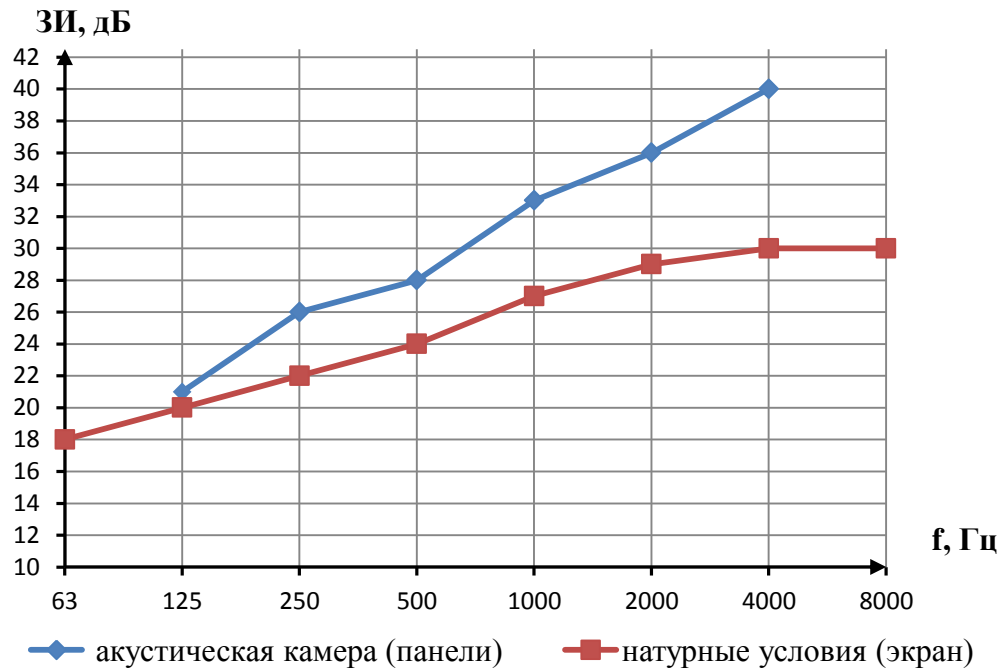


Рисунок 4.28 – Звукоизоляция деревянного экрана, измеренного в акустической камере и в натуральных условиях

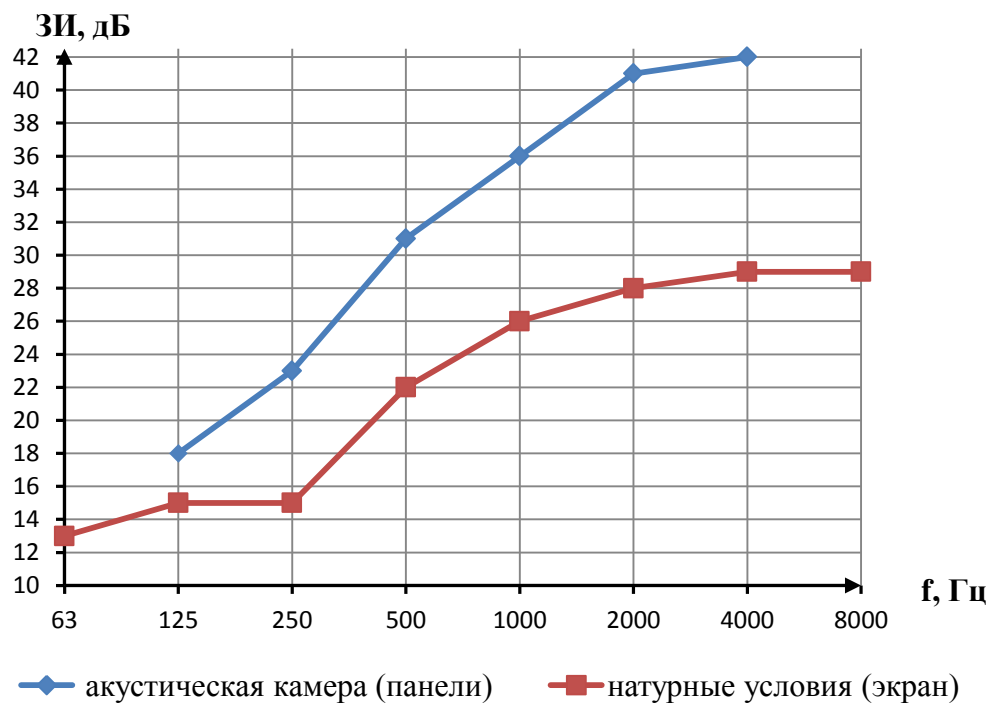


Рисунок 4.29 – Звукоизоляция металлического экрана, измеренного в акустической камере и в натуральных условиях

К полученным результатам необходимы пояснения. В камерах частотный диапазон измерений звукоизоляции 125–4000 Гц. В сертификатах указан индекс звукоизоляции, который принят равным звукоизоляции, измеренной в натурных условиях в дБА.

Отметим заметную разницу звукоизоляции собранного экрана и его панелей. Для деревянного экрана в диапазоне частот 250–4000 Гц эта разница составила 4–11 дБ (рисунок 4.28), а для металлического в том же частотном диапазоне 8–13 дБ (рисунок 4.29), соответственно в дБА 3 и 8 дБА. В камере звукоизоляция панелей больше чем полученная в реальных условиях. Звукоизоляция деревянного экрана выше металлического на низких и средних частотах на 4–7 дБ, и на 1–2 дБ в высокочастотном диапазоне (рисунок 4.30), а в дБА на 4 дБА. Этот факт объясняется тем, что в деревянных экранах под весом панелей щели, образующиеся между панелями при их монтаже, закрыты более плотно под собственным весом деревянных панелей.

В таблице 4.24 приведены сравнительные значения акустической эффективности и звукоизоляции экранов высотой 6 м.

Таблица 4.24 – Сравнительные значения звукоизоляции и акустической эффективности экранов высотой 6 м

Материал экрана	Параметр	УЗД, в дБ, в зависимости от частоты f , Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Металлический	Эффективность	10	14	17	18	19	21	23	25	17
	ЗИ	13	15	15	22	26	28	29	29	22
Деревянный	Эффективность	12	13	16	19	19	22	25	27	18
	ЗИ	18	20	22	24	27	29	30	32	26

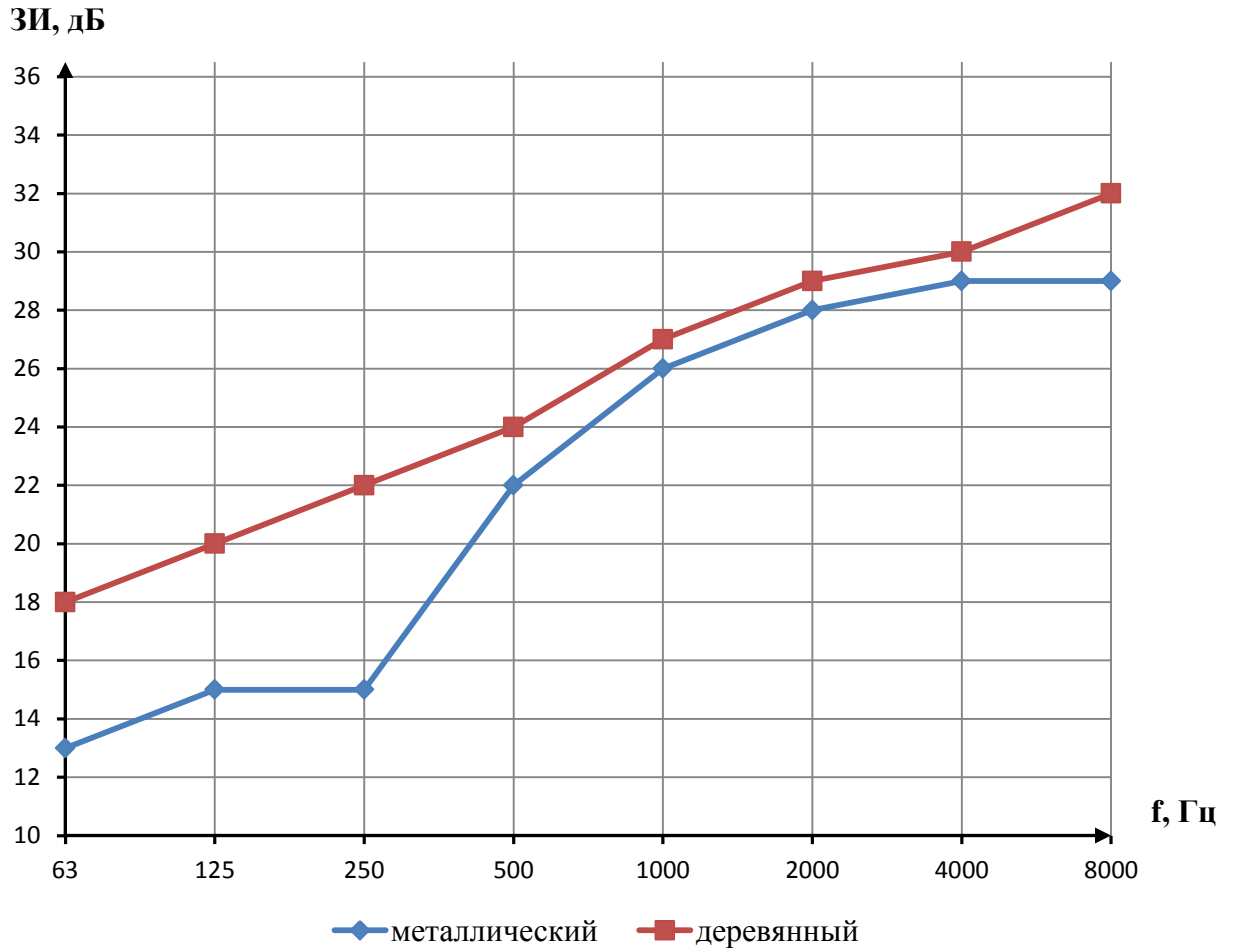


Рисунок 4.30 – Сравнительная звукоизоляция металлического и деревянного экранов соответственно 22 и 26 дБА

Для деревянного экрана разница по спектру составляет в основном 6–8 дБ, то есть в основном звукоизоляция достаточная, чтобы обеспечить условия не прохождения звука через экран и снижение эффективности менее 1 дБ. Для металлического экрана разница по спектру всего 1–3 дБ на низких частотах, 4–7 дБ в средне-высокочастотном диапазоне, а в дБА составила 5 дБА, то есть снижение акустической эффективности за счёт невысокой звукоизоляции до 2–3 дБ на низких частотах и 1–1,5 дБ в средне-высокочастотном диапазонах. Эти особенности металлических экранов целесообразно учесть при выборе конструкции в процессе проектирования.

4.6 Исследование технологических экранов на опытном стенде

4.6.1 Проверка основных допущений теории

В отличие от предыдущего стенда, где сохранялись определённые условности (по имитации ИШ, длине экрана), стенд для испытаний технологических экранов максимально приближен к реальности, соответствуя по размерам и конструктивному исполнению (наличие боковых отгонов) экранам, эксплуатируемым в натурных условиях. Поэтому характер многих процессов на стенде, например, звуковое поле соответствует характеру аналогичных процессов в натурных условиях.

Измеренные УЗД и УЗ во внутреннем пространстве (условном объёме) опытного экрана в различных точках измерений при изменении положения ИШ приведены в таблице 4.25.

Таблица 4.25 –Измеренные УЗД и УЗ в условном объёме при перемещении ИЗ

Расстояние от ИШ до экрана, м	Номер ТИ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
0,5	1	99	101	98	97	96	90	89	87	100
	2	98	100	99	97	97	91	87	84	101
	3	98	102	97	98	95	92	88	85	100
1,0	1	97	100	99	98	97	91	87	84	101
	2	97	102	99	97	97	92	88	87	102
	3	99	103	97	99	95	93	87	85	100
1,5	1	98	100	98	97	96	91	88	85	100
	2	97	101	99	97	95	90	87	87	99
	3	99	102	96	99	97	93	86	88	103
2,0	1	96	102	97	97	95	95	88	85	101
	2	98	101	98	99	94	92	87	87	100
	3	98	102	99	96	97	93	87	86	102

Анализ полученных данных показывает, что отклонения УЗД не превышает, в основном, ± 2 дБ во всём частотном диапазоне, а УЗ ± 2 дБА. Поле в нижней части экрана близко к диффузному, что подтверждает корректность принятых допущений.

В таблице 4.26 приведены данные изменения УЗД и УЗ по высоте опытного экрана.

Таблица 4.26 – Изменение УЗД и УЗ
в условном объёме опытного экрана при увеличении высоты ТИ

Высота ТИ, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	104	107	103	104	107	104	104	97	111
2	102	105	102	102	105	101	101	95	110
3	100	103	100	100	122	98	98	96	108
4	99	103	98	98	100	96	96	93	107

Анализ данных, приведённых в таблице 4.24, показывает, что с увеличением высоты ТИ от 1 до 4 м УЗД снизились во всём частотном диапазоне на 4–8 дБ, а УЗ на 4 дБА, то есть около 1 дБА на каждый 1 м высоты экрана. Основные допущения теории подтверждены экспериментом.

4.6.2 Исходные данные для определения акустической эффективности опытного экрана

В таблице 4.27 приведены измеренные значения УЗД и УЗ в отсутствии опытного экрана при его отсутствии в точках на расстояниях, которые будут при его установке (7,5; 15; 25; 50 м).

Таблица 4.27 – Исходные значения УЗД и УЗ для расчёта акустической эффективности опытного экрана

Расстояние, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
7,5	82	89	90	85	85	85	84	77	91
15	77	84	86	79	78	79	80	73	85
25	75	79	81	74	71	75	71	67	80
50	70	73	74	67	63	67	65	60	75

4.6.3 Влияние расположения точки измерений на акустическую эффективность экрана

Высота расположения ТИ. При увеличении высоты расположения точке измерений снижается угол дифракции экрана, и эффективность экрана уменьшается. В таблице 4.28 приведены данные измерений УЗД и УЗ при установленном экрана высотой 4 м в точках измерений на расстоянии 25 м от экрана соответственно на высотах 1, 5; 3; 5; и 7 м.

Таблица 4.28 –Измеренные УЗД и УЗ на расстоянии 25 м при разной высоте ТИ

Высота ТИ, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1,5	70	71	70	61	54	55	53	44	63
3,0	71	72	71	62	56	56	54	45	64
5,0	72	73	72	63	57	57	55	46	65
7,0	73	75	75	65	59	60	57	49	67

При увеличении высоты расположения ТИ с 1,5 до 7 м УЗД увеличилась, а, значит, акустическая эффективность экрана уменьшилась на 3–5 дБ в диапазоне частот, а УЗ на 4 дБА. Снижение эффективности экрана приблизительно 2 дБА на каждое удвоение высоты. Этот эксперимент подтверждает правильность введения

понятия эффективной высоты ШЭ, в котором учтено изменение расположения ТН по высоте.

Расстояние от экрана до ТИ. В таблице 4.29 приведены данные измерений УЗД и УЗ на различных расстояниях от опытного экрана высотой 2 м с фиксированными значениями высоты точек измерений $h_{\text{ти}}$ 1,5 и 4 м.

Таблица 4.29 – Измеренные значения УЗД и УЗ
для экрана $h_{\text{экр}} = 2$ м на различных расстояниях

Расстояние от ИШ до экрана, м	Высота ТИ, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
7,5	1,5	70	82	80	73	70	63	55	45	75
	4,0	80	83	83	75	74	69	62	52	79
15	1,5	74	78	74	68	64	58	52	42	70
	4,0	75	79	79	70	67	63	57	47	74
25	1,5	73	74	73	64	58	57	50	38	66
	4,0	74	76	75	67	62	60	53	14	70
50	1,5	68	69	67	58	51	50	45	36	62
	4,0	69	71	68	59	53	52	48	38	66

Вычисленные значения акустической эффективности экрана приведены в таблице 4.30, а также показаны на рисунке 4.33.

Таблица 4.30 – Вычисленные значения акустической эффективности
экрана $h_{\text{экр}} = 2$ м на различных расстояниях

Расстояние от ИШ до экрана, м	Высота ТИ, м	Акустическая эффективность, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Эффективность, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
7,5	1,5	3	7	10	12	15	22	29	32	16
	4,0	2	6	7	10	11	16	22	25	12

Продолжение таблицы 4.30

Расстояние от ИШ до экрана, м	Высота ТИ, м	Акустическая эффективность, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Эффективность, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
15	1,5	3	6	9	11	14	21	28	31	15
	4,0	2	5	7	9	11	16	23	26	11
25	1,5	2	5	8	10	13	18	21	25	14
	4,0	1	3	6	7	9	15	18	23	10
50	1,5	2	4	7	9	12	17	20	24	13
	4,0	1	3	7	8	10	15	17	22	9

Влияние расположения точки измерения (ТИ) на акустическую эффективность технологических ШЭ на опытном стенде показано на рисунке 4.31. При увеличении расстояния до ШЭ акустическая эффективность снижается приблизительно на 1 дБ при каждом удвоении. При увеличении расстояния с 7,5 м до 50 м эффективность в диапазоне частот 125–200 Гц снизилась на 3–5 дБ, а на более высоких частотах снижение на 8–9 дБ. При увеличении высоты точки измерений от 1,5 м до 4 м за счёт уменьшения угла дифракции эффективность экрана снижается на 4 дБА. Это подтверждает правомерность использования введённого понятия «эффективная высота» ШЭ.

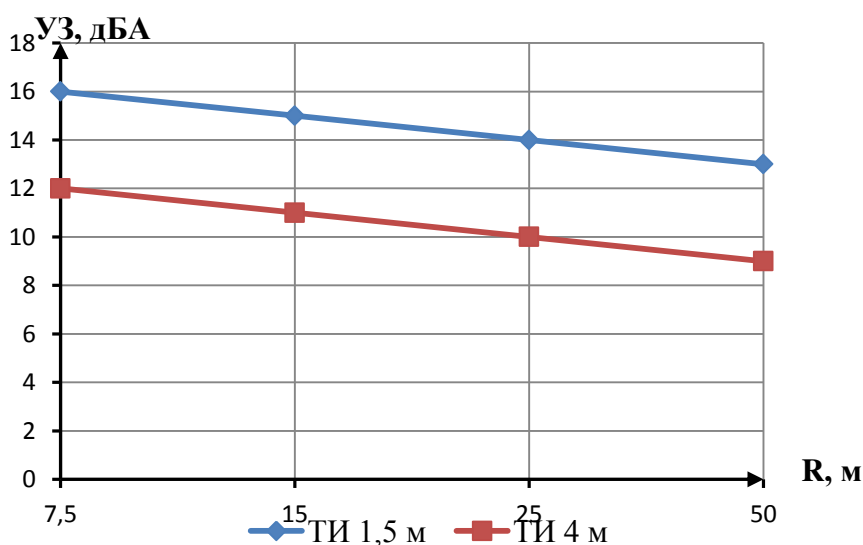


Рисунок 4.31 – Снижение УЗ, дБА с расстоянием на разной высоте ТИ (расстояние 25 м)

4.6.4 Влияние звукопоглощения на акустическую эффективность экрана

Влияние звукопоглощения было проверено на П-образном (в плане) опытном шумозащитном экране высотой $h_{\text{экр}} = 2$ м.

В таблице 4.31 приведены измеренные уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, а также уровни звука для экранов с отражающе-поглощающими панелями (с ЗПМ) и с отражающими панелями (без ЗПМ).

Таблица 4.31 – Измеренные значения УЗД и УЗ без ШЭ, ШЭ без звукопоглощения и с ЗПМ ($h_{\text{экр}} = 2$ м)

Условия измерений	Высота ТИ, $h_{\text{ти}}$, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1 Свободное звуковое поле	-	75	79	81	74	72	71	70	68	80
2 Установлен ШЭ без ЗПМ	1,5	75	75	74	65	59	56	53	34	68
	4,0	75	76	76	67	62	58	55	37	70
3 Установлен ШЭ с ЗПМ	1,5	74	73	71	62	57	53	52	31	66
	4,0	74	74	73	67	60	55	52	34	68

В таблице 4.32 и на рисунках 4.32 и 4.33 приведены вычисленные значения акустической эффективности опытного экрана с ЗПМ и без ЗПМ при различных значениях высоты точки измерений (1,5 и 4 м).

Таблица 4.32 –Вычисленные значения акустической эффективности
ШЭ без ЗПМ и с ЗПМ $h_{\text{экр}} = 2$ м

Наличие ЗПМ	Высота ТИ, $h_{\text{ти}}, \text{ м}$	Акустическая эффективность, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Акустическая эффективность, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
без ЗПМ	1,5	0	5	7	9	13	15	17	24	12
	4,0	0	4	5	7	10	12	15	21	10
с ЗПМ	1,5	1	6	10	12	15	18	20	27	14
	4,0	1	5	8	9	12	16	18	24	12

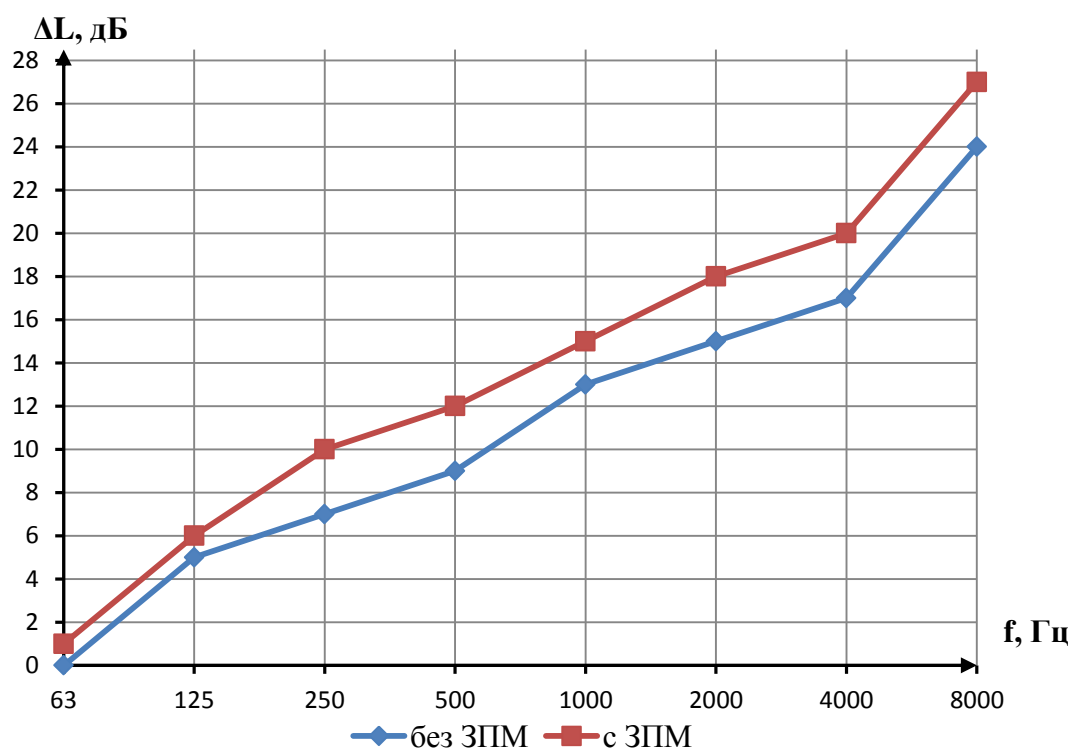


Рисунок 4.32 – Акустическая эффективность экрана ШЭ высотой 2 м без ЗПМ и с ЗПМ
(измерения на высоте 1,5 м; расстояние до ТИ 25 м)

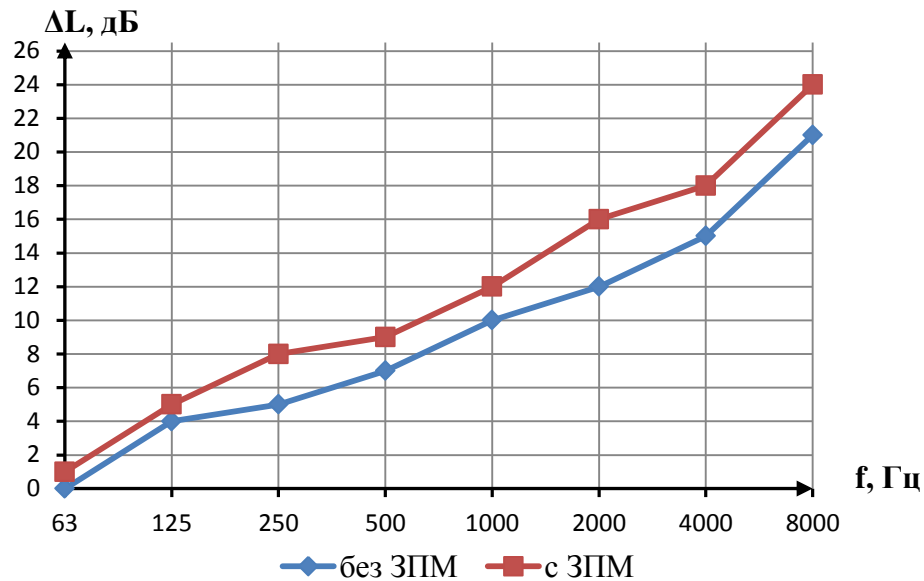


Рисунок 4.33 – Акустическая эффективность прямой ШЭ высотой 2 м прямой без ЗПМ и с ЗПМ (измерения на высоте 4 м; расстояние до ТИ 25 м)

Анализ полученных данных в целом подтвердил закономерности, полученные для транспортных экранов: разница в эффективности по спектру составила 1–4 дБ (рисунок 4.33) (2 дБА) при высоте точки измерений 1,5 м. Можно утверждать, что добавочная эффективность за счет применения ЗПМ составляет 2–3 дБА; это подтверждённая как теоретическая, так и практическая, закономерность.

4.6.5 Связь конструктивного исполнения экрана с эффективностью

Важнейшей конструктивной характеристикой технологических экранов является их исполнение в виде П-образной (в плане) конструкции за счёт наличия боковых отгонов или замкнутой (в плане) конструкцией, когда П-образная конструкция замыкается дополнительным элементом. П-образный экран выполняется с тем, чтобы избежать дифракции звука через свободные боковые поверхности фронтального экрана ввиду его небольшой длины. Представляется существенным выяснить роль боковых отгонов в конструкции технологических экранов.

В таблице 4.33 приведены измеренные УЗД и УЗ для фронтального (без боковых отгонов) экрана, измеренные на различных расстояниях. На рисунках 4.34 и 4.35 показаны спектры эффективности экранов для высоты ТИ 1,5 и 4 м.

Таблица 4.33 –Измеренные УЗД и УЗ фронтального без боковых отгонов ШЭ высотой $h_{\text{экp}} = 4$ м на разных расстояниях

Расстояние от ИШ до экрана, м	Высота ТИ, $h_{\text{ТИ}}$, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
7,5	1,5	75	82	81	72	66	62	56	46	74
	4,0	75	82	82	73	68	64	58	48	75
15	1,5	71	77	74	67	58	58	54	44	68
	4,0	71	77	76	69	60	60	57	46	70
25	1,5	68	73	71	64	56	55	57	40	65
	4,0	68	73	73	65	59	58	55	43	67
50	1,5	66	69	64	54	50	50	45	33	58
	4,0	66	69	65	58	59	53	48	36	60

В таблице 4.34 и на рисунках 4.34–4.35 приведены спектры эффективности для П-образного экрана и только для фронтального экрана.

Таблица 4.34 – Акустическая эффективность П-образного и фронтального ШЭ высотой $h_{\text{экp}} = 4$ м на расстоянии 25 м

Тип ШЭ	Высота ТИ, $h_{\text{ТИ}}$, м	Акустическая эффективность, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Акустическая эффективность УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
П-образный	1,5	7	8	11	15	19	22	25	32	18
	4,0	7	8	10	13	16	20	23	30	16
Фронтальный без боковых отгонов	1,5	6	6	9	10	15	18	20	27	15
	4,0	6	6	8	10	12	15	17	24	13

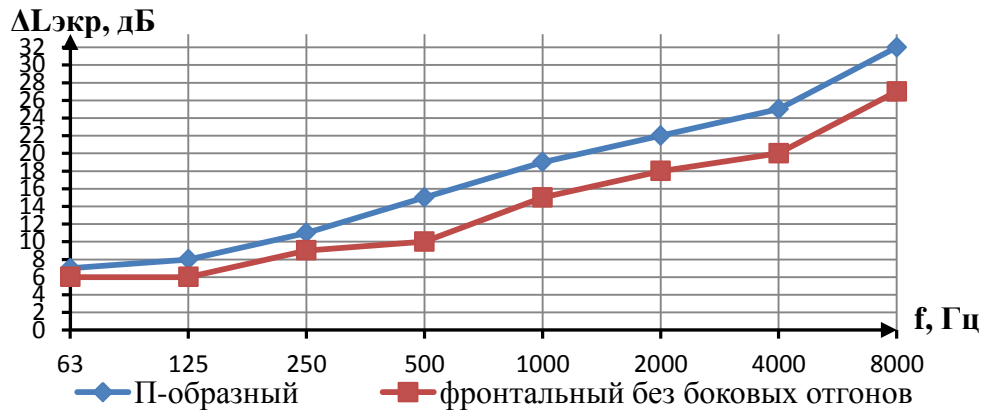


Рисунок 4.34 – Сравнительные данные испытаний П-образного и фронтального, то есть без боковых отгонов ШЭ $h_{\text{экp}} = 4$ м, расстояние 25 м, высота ТИ $h_{\text{ти}} = 1,5$ м

Экспериментально было установлено существенное снижение эффективности технологических экранов при отсутствии боковых отгонов (рисунок 4.35 и 4.36). Отмечено снижение эффективности на 1–2 дБ в низкочастотном и 3–6 дБ в средне-высокочастотном диапазонах (3 дБА). При небольшой длине фронтального технологического экрана в отсутствии боковых отгонов звук дифрагирует через свободные боковые рёбра ШЭ; отгоны – обязательный конструктивный элемент технологических ШЭ.

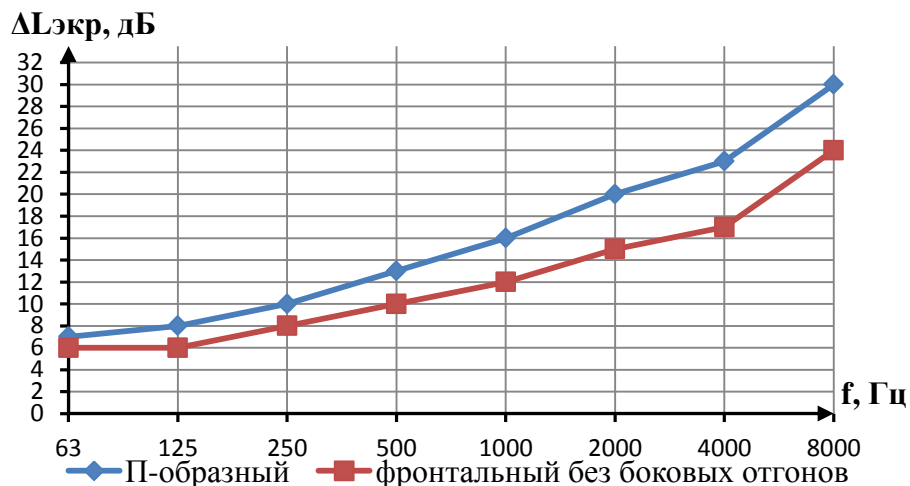


Рисунок 4.35 – Сравнительные данные испытаний П-образного (1) и фронтального (2), то есть без боковых отгонов ШЭ $h_{\text{экp}} = 4$ м, расстояние 25 м, высота ТИ $h_{\text{ти}} = 4$ м

Анализ показывает существенное снижение эффективности экрана без боковых отгонов. Так для высоты ТИ, равной 1,5 м, снижение УЗД не превышает 1–2 дБ в низкочастотном диапазоне (рисунок 4.34), но в средне-частотном диапазоне снижение достигает 4–6 дБ (3 дБА). В целом эта закономерность сохраняется (3 дБА) для точки измерений расположенной на высоте 4 м (рисунок 4.35). Без наличия боковых отгонов технологические экраны неэффективны.

4.6.6 Влияние высоты экрана на его акустическую эффективность

Эксперимент был выполнен для подтверждения ранее полученных теоретических и экспериментальных результатов. Выполнены исследования П-образных высотой 1, 2, 3 и 4 м. Измеренные значения УЗД и УЗ экранов на расстоянии 25 м приведены в таблице 4.35.

Таблица 4.35 –Измеренные УЗД и УЗ для экранов различной высоты

Высота экрана, м	Высота ТИ, $h_{\text{ТИ}}$, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	1,5	75	77	76	67	63	59	56	45	72
	4,0	75	78	77	69	67	62	58	48	74
2	1,5	73	74	73	63	58	57	50	38	66
	4,0	74	76	75	67	63	60	53	41	70
3	1,5	70	71	69	61	58	54	48	35	63
	4,0	71	71	71	64	60	56	51	38	65
4	1,5	68	71	70	59	53	53	48	36	62
	4,0	68	71	72	61	56	55	51	38	64

Вычисленные значения акустической эффективности экранов приведены в таблице 4.36 и показаны на рисунках 4.38–4.40.

Таблица 4.36 –Вычисленные значения акустической эффективности экранов

Высота экрана, м	Высота ТИ, $h_{\text{ти}}$, м	Акустическая эффективность, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Эффективность, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	1,5	0	2	5	7	9	12	15	22	8
	4,0	0	1	4	5	7	9	13	18	6
2	1,5	2	5	8	10	13	18	21	29	14
	4,0	1	3	6	7	9	15	18	26	10
3	1,5	5	8	12	13	14	19	23	32	17
	4,0	4	6	10	10	12	17	20	30	15
4	1,5	7	8	11	15	19	22	25	32	18
	4,0	7	8	10	13	16	20	23	30	16

Анализ показывает, что при увеличении высоты экрана с 1 до 4 м его эффективность по спектру возрастает для точки измерений на высоте 1,5 м на 7–10 дБ (рисунок 4.36), а для точки на высоте 4 м на 7–12 дБ (рисунок 4.37). Отмечено увеличение на 10 дБА (рисунок 4.38) для каждой высоты ТИ при изменении высоты ШЭ от 1 до 4м. Характер увеличения эффективности при увеличении высоты (заметную роль играет только удвоение высоты) полностью соответствует полученным ранее теоретическим и экспериментальным результатом.

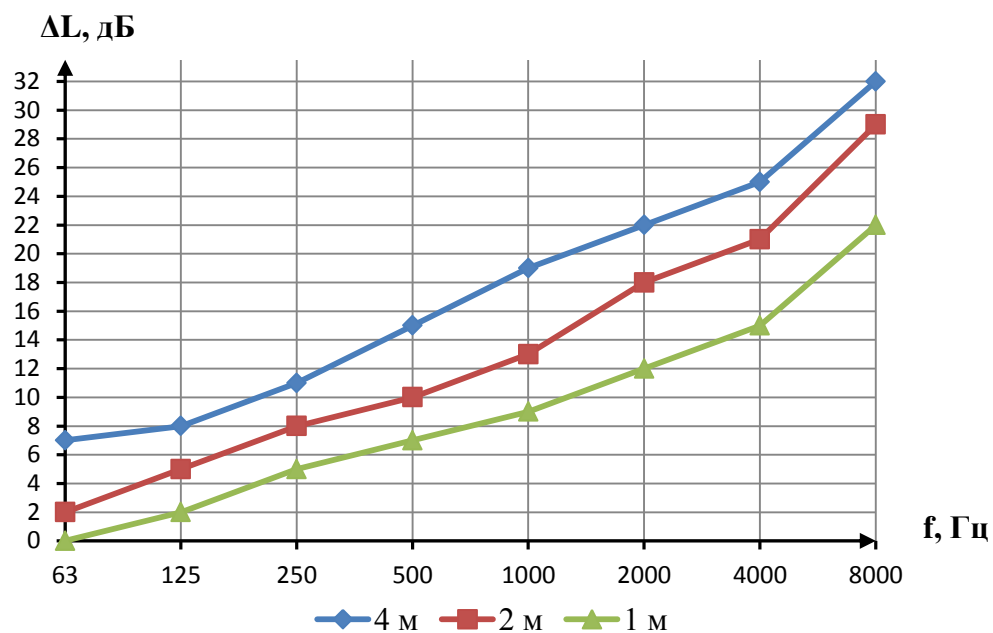


Рисунок 4.36 – Сравнительная эффективность ШЭ высотой 4 м, 2 м и 1 м на расстоянии 25 м, высота ТИ $h_{\text{ти}} = 1,5$ м

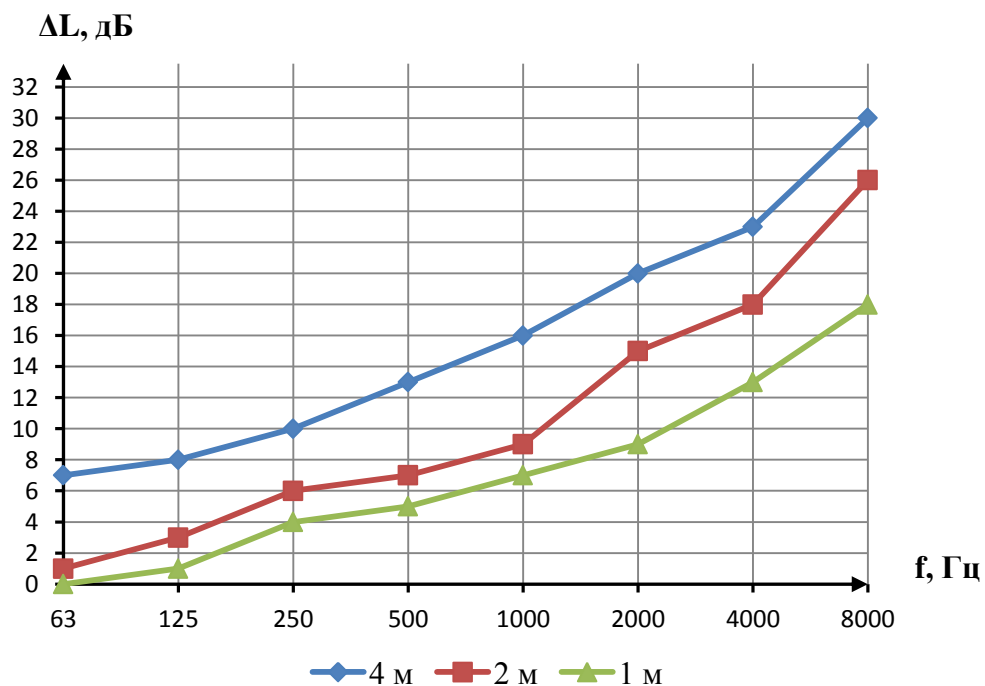


Рисунок 4.37 – Сравнительная эффективность ШЭ высотой 4 м, 2 м и 1 м на расстоянии 25 м, высота ТИ $h_{\text{ти}} = 4$ м

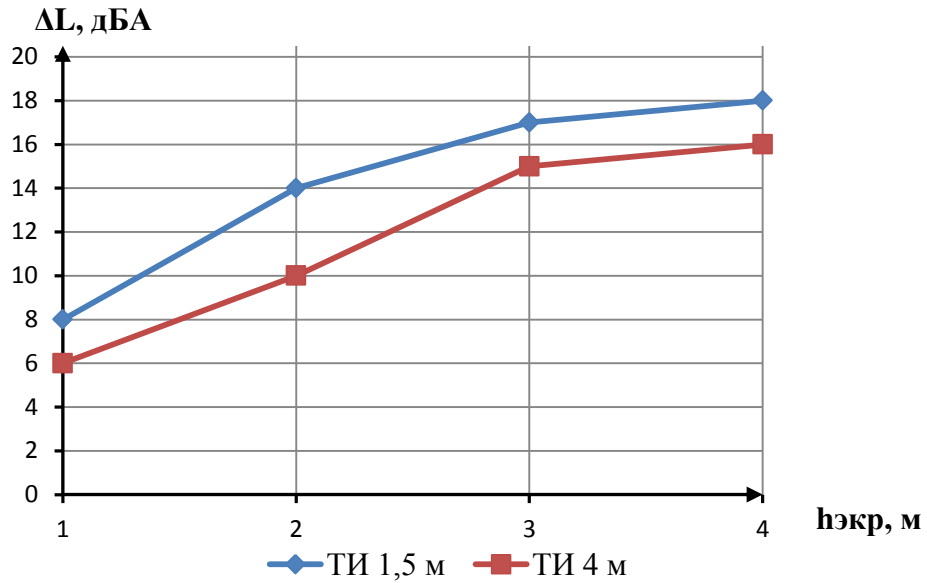


Рисунок 4.38 – Изменение акустической эффективности ШЭ дБА на частоте 1000Гц, при изменении высоты ТИ

4.6.7 Влияние щелей на эффективность экрана

При монтаже экранов часто в их конструкции остаются щели, которые оказывают заметное влияние на эффективность экрана. Необходимо численно определить в какой степени снижается эффективность экрана при появлении щелей. Был проведён эксперимент с оставлением в нижней части фронтального экрана высотой $h_{\text{экр}} = 4$ м щели размером 0,3 м.

Измеренные УЗД и УЗ такого экрана приведены 4.37.

Таблица 4.37 –Измеренные УЗД и УЗ экрана ($h_{\text{экр}} = 4$ м) со щелью на расстояниях 25 м

Высота ТИ, $h_{\text{ТИ}}$, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1,5	69	73	71	68	65	63	53	48	70
4,0	69	73	71	69	66	65	57	45	71

Вычисленная акустическая эффективность экрана представлена в таблице 4.38 и показана на рисунках 4.39, 4.40.

Таблица 4.38 – Акустическая эффективность экрана со щелью ($h_{\text{экp}} = 4$ м)

Высота ТИ, $h_{\text{ти}}$, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1,5	6	6	10	6	7	10	16	24	10
4,0	6	6	10	5	5	8	14	22	9

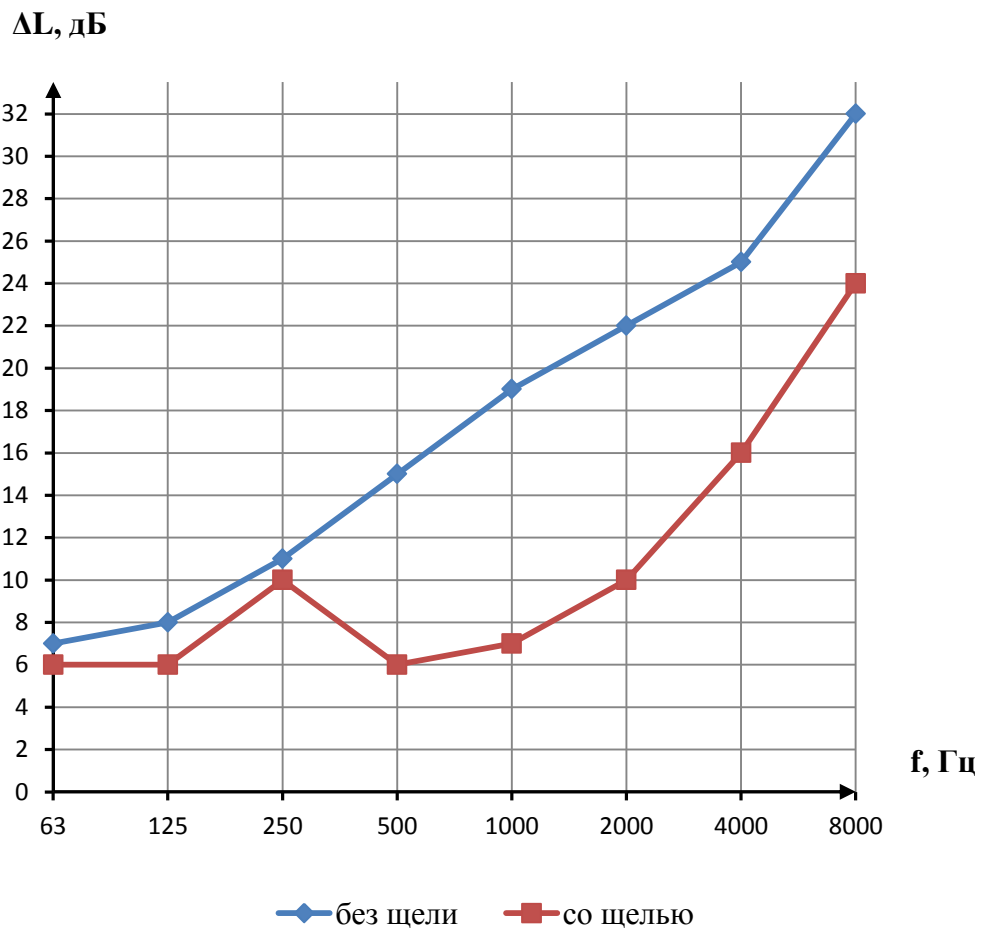


Рисунок 4.39 – Сравнительная эффективность ШЭ высотой 4 м без щели и со щелью на расстоянии 25 м (ТИ на высоте 1,5 м) соответственно 18 и 10 дБА

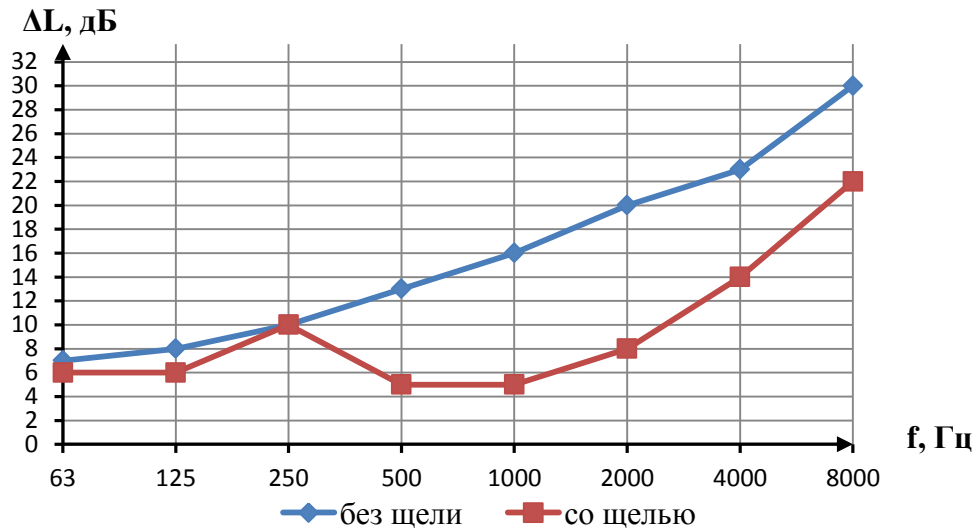


Рисунок 4.40 – Сравнительная акустическая эффективность ШЭ высотой $h_{\text{экp}} = 4$ м без щели и со щелью на расстоянии 25 м (высота ТИ 4 м)

Сравнительно небольшая по размерам щель очень заметно (на 8 дБА, то есть почти вдвое) снижает акустическую эффективность экрана. И если на низких частотах это снижение составляет всего 1–3 дБ, то в средне-высокочастотном диапазонах уменьшение эффективности достигает 8–12 дБ (рисунок 4.40) такое уменьшение эффективности экрана со щелью делает его применение малоэффективным. Полученные экспериментальные данные в целом подтвердили теоретические расчеты.

4.6.8 Исследование экранов с надстройкой на свободном ребре

Надстройки на свободном ребре увеличивают эффективность экрана. Были испытаны два типа надстроек: полка шириной 0,5 м, расположенная под углом к экрану (Г-образный экран), и антидифрактор в виде металлического перфорированного цилиндра со ЗПМ внутри диаметром 0,5 м. Г-образная надстройка увеличивает эффективную высоту экрана, а антидифрактор вносит дополнительное звукопоглощение, увеличивая его эквивалентную площадь.

В таблице 3.39 приведены измеренные УЗД и УЗ экранов с надстройкой на свободном ребре.

Таблица 4.39 – Измеренные УЗД и УЗ прямого экрана и экранов с надстройкой на свободном ребре $h_{\text{экр}} = 4$ м (расстояние 25 м)

Тип надстройки	Высота ТИ, $h_{\text{ти}}$, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Без надстройки (прямой экран)	1,5	68	71	70	59	53	55	48	36	62
	4,0	68	71	72	61	58	55	51	38	64
Г-образный экран	1,5	68	71	69	57	51	51	45	33	61
	4,0	69	73	72	59	54	53	48	35	63
Экран с андифрактором	1,5	67	70	68	61	50	50	44	31	60
	4,0	67	72	70	58	54	52	47	33	62

В таблице 4.40 приведены значения акустической эффективности испытанных экранов, а на рисунке 4.41 показаны значения акустической эффективности.

Таблица 4.40 – Спектры эффективности экранов с надстройкой на свободном ребре $h_{\text{экр}} = 4$ м (расстояние 25 м)

Тип надстройки	Высота ТИ, $h_{\text{ти}}$, м	Акустическая эффективность, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Прямой	1,5	7	8	11	15	19	22	25	32	18
	4,0	7	8	10	13	16	20	23	30	16
Г-образный экран	1,5	7	8	12	17	21	24	27	35	19
	4,0	7	8	11	15	18	22	25	33	17
Экран с андифрактором	1,5	8	9	13	18	22	25	29	37	20
	4,0	8	9	12	15	18	23	27	35	18

Наличие надстройки на свободном ребре увеличивает акустическую эффективность ШЭ (рисунок 4.41). Анализ полученных данных показывает, что Г-образный экран малоэффективен на низких частотах. В средне-высокочастотном диапазоне дополнительный эффект составил 1–3 дБ (1 дБА), что сравнимо с увеличением его высоты на 0,5 м. Несколько более эффективен антидифрактор, который на высоких частотах обеспечивает дополнительный эффект 3–5 дБ (2 дБА). Эти данные совпадают с теоретическими значениями.

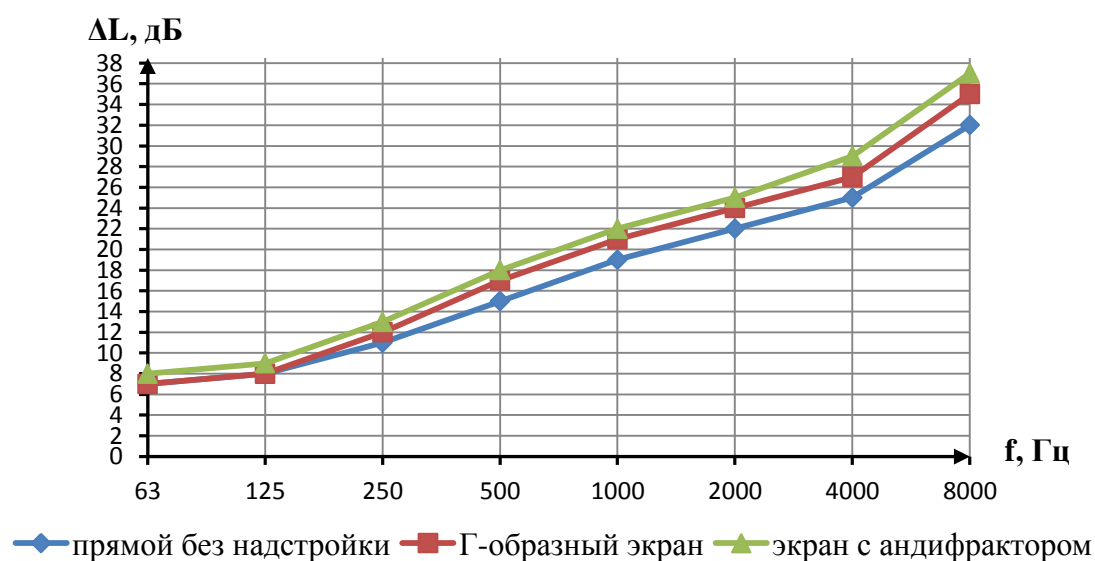


Рисунок 4.41 – Сравнительная акустическая эффективность экранов $h_{\text{экр}} = 4$ м на расстоянии 25 м с надстройкой и без на свободном ребре

4.7 Экспериментальные исследования экранов, установленных в галерее

Сооружение галерей на а/д – новое направление в практике автодорожного строительства и опыт правильного применения здесь экранов практически отсутствует. На рисунках 4.42 показан вид галереи – сложного инженерного сооружения.

В галерее, благодаря многократным отражениям звука о металлический свод галереи и поверхность автодороги, создаётся сложное звуковое поле близкое к диффузному.



Рисунок 4.42 – Вид автотранспортной галереи на Канонерском острове

В таблице 4.41 приведены данные измерений в галерее (нижний ярус) и на верхнем ярусе эстакады.

Таблица 4.41 –Измеренные УЗД и УЗ на нижнем и верхнем ярусе эстакады

Место измерений	Номер серии	Номер ТИ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Нижний ярус	I	1	82	82	81	82	86	79	70	60	88
		2	80	80	80	81	86	80	70	61	88

		3	81	81	80	81	86	80	70	60	88
	II	1	79	80	79	80	85	79	69	59	87
		2	80	79	80	81	85	79	69	60	87
		3	83	81	81	82	85	79	70	59	86
	III	1	80	82	80	81	86	80	69	60	88
		2	79	80	79	82	87	79	70	61	88
		3	79	80	80	82	85	80	64	60	88
	Среднее		80	81	80	81	86	79	70	60	88
Верхний ярус	I	1	76	74	73	75	80	74	63	53	82
		2	79	75	75	75	78	74	64	54	81
		3	78	76	75	75	79	75	65	54	81
	II	1	79	76	74	75	81	76	65	55	82
		2	78	75	75	76	80	75	64	53	82
		3	77	75	76	76	80	75	65	54	81
	III	1	79	76	75	76	80	75	64	54	82
		2	77	75	74	76	79	74	64	53	81
		3	78	76	74	75	79	74	64	53	81
	Среднее		78	75	75	75	80	74	64	54	81
	Разница УЗД (УЗ)		2	6	5	6	6	5	6	6	7

На рисунке 4.43 приведены усреднённые спектры шума на верхнем и нижнем ярусах. За счёт отражения звука о металлические конструкции галереи шум увеличился на нижнем ярусе на 5–6 дБ в диапазоне частот 125-8000 Гц (6 дБА). Увеличение вклада отражённого звука, а также незначительное снижение шума экранами, расположенными в поле отраженного звука (излучение звука в нижней галерее происходит через свободный проём) привело к высоким уровням на территории жилой застройки (таблица 4.42 превышающим нормы шума (таблица 4.43).

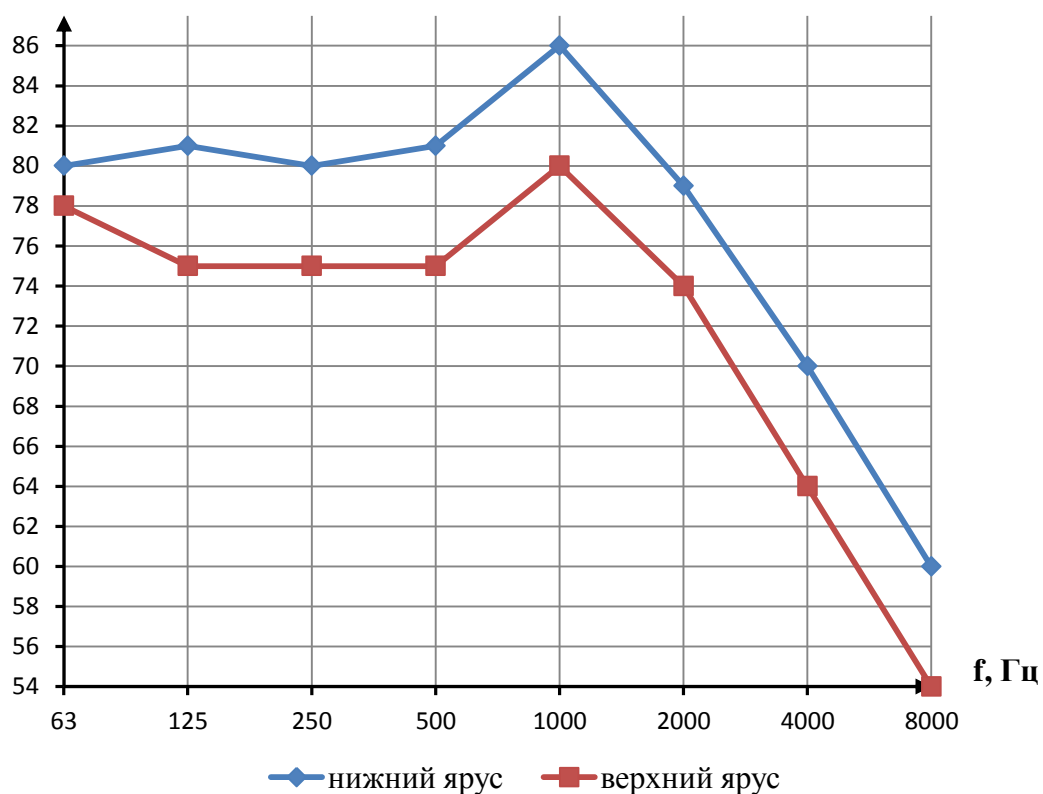
$\Delta L_{\text{экр}}$, дБ

Рисунок 4.43 – Спектры шума на нижнем и верхнем ярусах эстакады

Таблица 4.42 – Шум на территории вблизи эстакады

Расстояние, м	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
30	70	66	63	63	67	62	51	41	68
50	69	63	60	62	65	59	49	40	67
100	67	60	59	60	62	56	46	38	65
200	65	58	57	58	59	54	43	35	62

Таблица 4.43 – Нормы шума в жилой застройке

Время суток	Норма УЗД, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Норма УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
День 7 ⁰⁰ -23 ⁰⁰	75	66	59	54	50	47	45	44	55
Ночь 23 ⁰⁰ -7 ⁰⁰	65	56	49	44	40	37	35	34	45

Значения превышений УЗД и УЗ в дневное и ночное время суток приведены в таблице 4.44.

Таблица 4.44 –Превышение УЗД и УЗ на территории вблизи эстакады

Время суток	Расстояние, м	УЗД, в дБ, в зависимости от частоты f, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
День	30	-	0	4	9	17	15	6	-	13
	50	-	-	1	8	15	12	4	-	12
	100	-	-	0	6	12	9	1	-	10
	200	-	-	-	4	9	7	-	-	7
Ночь	30	5	10	14	19	27	25	16	8	23
	50	4	7	11	18	25	22	14	6	22
	100	2	4	10	16	22	19	11	4	20
	200	0	2	8	14	19	17	8	1	17

Таким образом, на всей территории, прилегающей к эстакаде, зарегистрированы превышения шума.

В дневное время:

- на расстоянии 30 м превышение УЗД на 4–17 дБ в диапазоне частот 250–4000 Гц (13 дБА);
- на расстоянии 200 м превышение на 4-9 дБ в диапазоне частот 500–1000 Гц (7 дБА).

В ночное время:

- на расстоянии 30 м превышения на 5–27 дБ в нормируемом частотном диапазоне (23 дБА);
- на расстоянии 200 м превышения на 2–19 дБ в диапазоне частот 125–4000 Гц (7 дБА).

Превышения в зависимости от расстояния и времени суток от 7 до 23 дБА. Таким образом, проблема снижения шума в галерее является актуальной.

Для понимания вопроса о вкладе шума от верхней и нижней частей эстакады был выполнен эксперимент по разделению вклада источников при проезде единичного транспортного средства. Данные этого эксперимента приведены в таблице 4.45.

Таблица 4.45 – Вклада источников
при проезде единичного транспортного средства

Место проезда	УЗД, в дБ, в зависимости от частоты f , Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Нижний ярус	64	60	58	53	56	52	45	38	63
Верхний ярус	58	52	50	46	47	42	38	29	51
Разница	6	8	8	7	9	10	7	9	12

Полученный вклад шума от проезда автомобилей по верхнему и нижнему ярусам показан на рисунке 4.44.

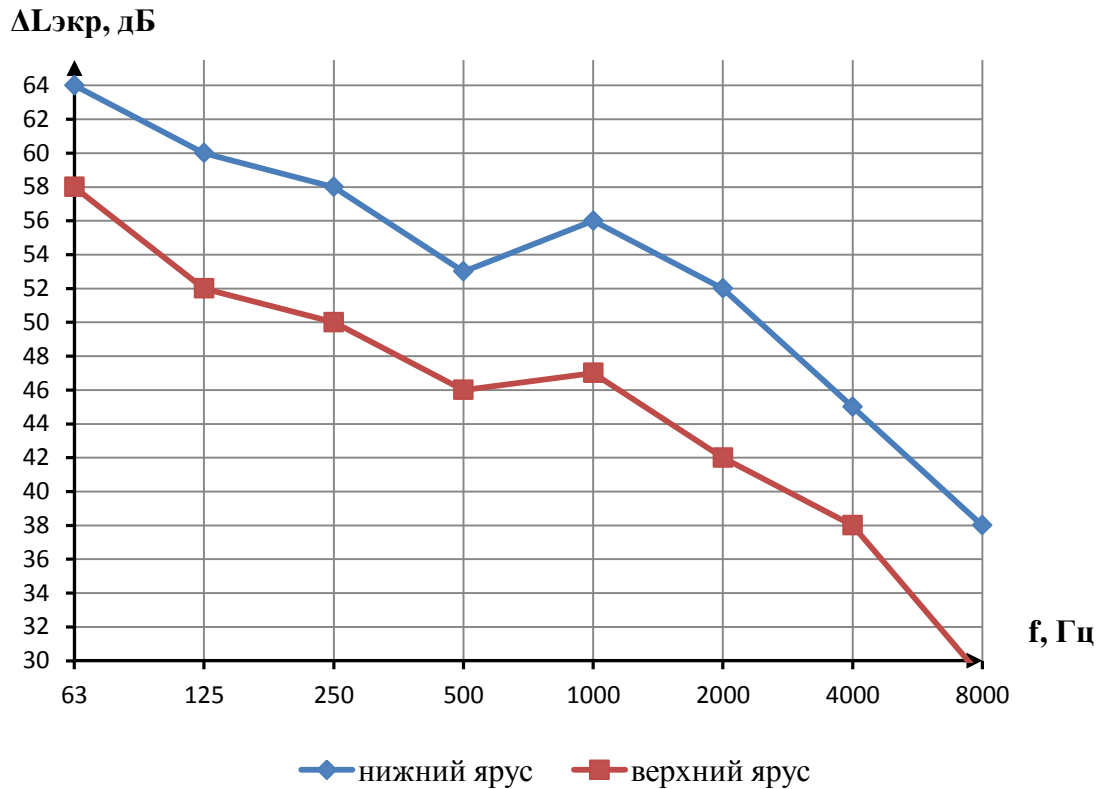


Рисунок 4.44 – Вклад в звуковое поле при проезде экипажа по нижнему и верхнему ярусам

Вклад составляющей во внешнее звуковое поле при проезде автомобилей по нижнему ярусу (галерее) на 6–10 дБ в нормируемом диапазоне и на 12 дБА превышает вклад при проезде автомобиля по верхнему ярусу. Это вдвое выше, чем влияние отражённого звукового поля, где разница составила 5–6 дБ (6 дБА), то есть экран на верхнем ярусе работает, а в нижнем ярусе не создаёт звуковой тени из-за наличия диффузного звукового поля в пространстве галереи. Это полностью подтверждает теоретические выводы. Для снижения отражённого шума необходимо производить акустическую обработку металлических поверхностей галереи ЗПМ.

4.8 Выводы по главе

1 Разработаны методики экспериментальных исследований экранов на стендах и в натурных условиях:

- методика проверки основных положений и допущений теории включающая исследования характера звукового поля в натурных условиях между источником шума и экраном, в продольном, поперечном направлениях и по высоте экрана;
- методика измерений показателя дифракции прямых экранов и экранов с надстройкой на свободном ребре в натурных условиях и на опытных стендах;
- методику измерений на опытном стенде для испытаний транспортных экранов, включающие методику измерения звукоизоляции, измерения акустической эффективности экранов при изменении расположения точек измерений (7,5; 15; 25; 50 и 100 м), изменении высоты экрана (1, 2, 3, 4, 5, 6 м), изменении материала акустических панелей (импрегнированная древесина и алюминий), изменении конструкции панелей (отражающие и отражающе-поглощающие);
- методики измерений на опытном стенде для испытаний технологических экранов, включающие методику измерения акустической эффективности экранов различного конструктивного исполнения (прямые, П-образные в плане, с надстройкой на свободном ребре (Г-образные и с антидифрактором), методика измерений экранов с отражающими и отражающе-поглощающими панелями, методику измерений акустической эффективности экранов при изменении расположения ТИ по высоте (от 1 до 7 м) и по расстоянию (7,5; 15; 25 и 50 м), методику измерения акустической эффективности П-образного экрана при изменении высоты (1, 2, 3 и 4 м);
- методику измерений акустической эффективности экранов, расположенных в галерее и на эстакаде.

2 Измерения характера звуковых полей экранов, проведённые в натуральных условиях, подтвердили корректность основных допущений теории о квазидиффузном характере звуковых полей многократных отражений в условном объёме, образуемом источниками шума, опорной поверхностью и экраном: отклонение измеренных УЗД в нижней части экрана в продольном и поперечном направлениях не превышают ± 2 дБ, а УЗ ± 2 дБА. Измерения характера звукового поля с увеличением высоты экрана от 1,5 до 4 м показало уменьшение УЗД от 2 до 6 дБ в нормируемом частотном диапазоне, а УЗ от 3 до 5 дБА, то есть приближенное снижение УЗ на каждый 1 м высоты 1–1,5 дБА.

3 Выполнены измерения показателя дифракции в натуральных условиях и на стендах, показатель дифракции имеет частотно-зависимый характер; увеличиваясь приблизительно на 1,5 дБ на октаву на величину от 4 (63 Гц) до 14 дБ (8000 Гц), интегральное значение ПД=12 дБА.

4 Исследование связи акустической эффективности экранов с высотой показало, что при увеличении высоты от 1 до 6 м, эффективность экранов возрастает на 9–13 дБ по спектру (на 10 дБА), на эффективность экрана основное влияние оказывает только удвоение высоты: при каждом удвоении высоты увеличение УЗД на 2–6 дБ, а УЗ на 3–4 дБА, нелинейная связь эффективности с высотой подтверждена экспериментами на обоих стендах (например, при увеличении высоты экрана с 1 до 2 м эффективность возрастает на 3 дБА, а при увеличении с 5 до 6 м на 1 дБА). Эффективность экранов имеет частотно-зависимый характер, увеличиваясь на 2 дБ на октаву, что подтверждает теоретические выводы.

5 Материал экрана оказывает влияние на эффективность экрана: при одном и том же типе панелей (отражающе-поглощающие) экраны из импрегнированной древесины на 1–3 дБ (1–2 дБА) более эффективны, чем металлические за счёт более удачной конструкции ЗП и большей ЗИ.

6 Расположение ТИ влияет на эффективность экрана. С увеличением расстояния от экрана до ТИ его эффективность снижается на 1–1,5 дБА при каждом удвоении расстояния (при увеличении расстояния от опытного экрана

до ТИ с 7,5 до 100 м его эффективность за счёт уменьшения угла дифракции падает с 16 до 10 дБА). Увеличение высоты точки измерений заметно сказывается на эффективности экрана: для $h_{\text{экp}} = 4$ м при изменении высоты ТИ с 1,5 до 7 м снижение эффективности за счёт уменьшения угла дифракции составляет 4 дБА. Этот вывод подтверждает правомерность использования эффективной высоты экрана, где эта зависимость учтена.

7 Сравнительные испытания экранов с отражающими и отражающе-поглощающими панелями показали, что наличие ЗПМ – важный фактор, увеличивающий акустическую эффективность, которая связана с эквивалентной площадью звукопоглощения, определяемой высотой экрана. Так при $h_{\text{экp}} = 2$ м увеличение эффективности за счёт ЗПМ составило от 1 до 3 дБ по спектру (2 дБА). В среднем для типовых конструкций экранов высотой 3–4 м дополнительное увеличение эффективности за счёт ЗПМ составляет 2–3 дБА.

8 Исследования звукоизолирующих свойств экранов показало, что на стендах их звукоизоляция заметно (от 3 до 8 дБА) ниже, чем звукоизоляция акустических панелей, измеренных в акустических камерах. При сравнении звукоизоляции с измеренными значениями акустической эффективности выявлено, что для различных видов экранов эта связь различна. Для экранов из импрегнированной древесины эффективность выше, чем ЗИ на 5–8 дБ по спектру (разница 8 дБА), что позволяет утверждать, что звукоизоляция этих экранов достаточна, чтобы звук не проходил прямым путем через экран. Для металлических экранов разница составила 1–7 дБ (5 дБА) и звукоизоляция сказывается на эффективности экрана, снижая её на отдельных частотах на 2–3 дБ (на 1,5 дБА).

9 Конструкция экрана заметно влияет на его эффективность:

- при отсутствии боковых отгонов технологических П-образных в плане экранов их эффективность за счёт дополнительной дифракции через свободные боковые рёбра снижается в средне-и высокочастотном диапазонах на 4–5 дБ (3 дБА);

- наличие щелей в экранах снижает их эффективность до 9–12 дБ в средне-высокочастотном диапазонах (уменьшение эффективности до 8 дБА), то есть при наличии щели эффективность экранов может уменьшиться почти вдвое;

- надстройка на свободном ребре экрана несколько увеличивает его эффективность: Г-образная надстройка не эффективна на низких частотах и снижает УЗД дополнительно на 1–3 дБ в средне-высокочастотном диапазонах (1 дБА), антидифрактор увеличивает эффективность экрана на 3–5 дБ в средне-высокочастотном диапазонах (2 дБА).

10 При расположении экранов в галерее образуется отражённое звуковое поле, УЗД которого на 5–6 дБ (6 дБА) выше, чем УЗД (УЗ) шума на верхнем ярусе эстакады. При этом шум в прилегающей жилой застройке превышает допустимые нормы на 7–13 дБА в дневное время и на 17–23 дБА в ночное время. Вклад шума от движения по нижней галерее более чем на 12 дБА превосходит вклад шума верхнего яруса, что подтверждает одно из положений теории, что при наличии отражённого (являющегося новым источником) диффузного звукового поля шумозащитные экраны практически не работают, и звук излучается через свободный проём галереи.

ГЛАВА 5 ШУМОЗАЩИТНЫЕ ЭКРАНЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

5.1 Рекомендации и требования к шумозащитным экранам

5.1.1 Общие сведения

Выполненные автором исследования позволили разработать новые подходы к проектированию шумозащитных экранов, задать жесткие требования к конструкциям экранов и разработать новые технологии экранов, обеспечивающие соответствие требованиям долговечности, эффективности и экономической целесообразности.

В зависимости от выбора материала шумозащитные экраны могут быть изготовлены из металла (конструкционной стали с защитным покрытием, нержавеющей стали, алюминия и пр.), композитных материалов, светопрозрачных полимеров (типа полиметилметакрилата (ПММА), монолитного поликарбоната и пр.), закаленного стекла, импрегнированной древесины, щепобетона и пр. [236]. В зависимости от области применения ШЭ подразделяются на универсальные и тяжелые. Универсальные ШЭ, изготовленные из металла, композитных материалов, импрегнированной древесины и светопрозрачных полимеров могут быть использованы как на пролетных строениях искусственных сооружений, так и на земляном полотне. Тяжелые ШЭ, изготовленные из щепобетона и бетона имеют ограничения по использованию на искусственных сооружениях.

Шумозащитный экран должен обеспечивать требуемую эффективность, заложенную в проектных расчетах. При разработке проекта следует учитывать место размещения экрана. Так на экраны с размещением вдоль линейных источников (автомобильные и железные дороги) следует учитывать более жесткие требования к коррозионностойкости экрана по сравнению с экранами, обеспечивающими снижение шума от стационарных источников.

5.1.2 Нагрузки на экран

При проектировании шумозащитного экрана большое внимание уделяется прочностным расчетам и расчетам на несущие нагрузки. Также выполняются расчеты несущей способности фундамента по действующей нормативной документации.

Основным несущим элементом, обеспечивающим прочность верхней (надземной) части ШЭ, является стойка, при конструировании которой определяют прочность ее поперечного сечения, прогиб и элементы опорного узла.

При разработке инженерных расчетов определяются следующие параметры, учитывающие конструктивные особенности шумозащитного экрана, панелей и других элементов:

- нагрузка от собственного веса экрана;
- ветровая нагрузка;
- дополнительные нагрузки при размещении на конструкции экрана элементов инфраструктуры дороги, дорожных знаков и пр.

Для определения параметров стоек и фундамента необходимо учесть изгибающие моменты, продольную и поперечную силы от всех постоянных и временных нагрузок [236].

5.1.3 Нагрузки на фундаменты

Нагрузки на фундаменты формируются по результатам расчета конструкции надземной части ШЭ. Нагрузки делятся на постоянные и временные.

К постоянным нагрузкам относятся собственный вес конструкции экрана и давление грунта по подошве фундамента.

К временным нагрузкам относятся снеговые и ветровые нагрузки кратковременного действия. В некоторых случаях учитываются особые временные нагрузки, такие как сейсмические, аварийные, от просадки основания при его замачивании и т.п.

Для общего расчета формируются сочетания нагрузок:

- основные, составляемые из постоянных и кратковременных нагрузок;
- особые, состоящие из постоянных, возможных кратковременных и одной из особых нагрузок.

Для крепления несущих стоек при проектировании фундаментов предусматривают выпуски арматуры, закладные детали, анкера и др.

5.1.4 Требования к стойкам экрана

Несущие конструкции (стойки), применяемые для обустройства шумозащитного экрана, подразделяются по следующим признакам:

- по конструктивному исполнению: прямые, прямые с козырьком, криволинейные;
- форме сечения: фасонные (двутавр, швеллер, уголок и др.), прямоугольные, круглые.

Стойки ШЭ должны выдерживать заданные нагрузки, рассчитанные при проектировании конструкции.

Автор рекомендует использовать стойки двутаврового сечения с антикоррозийным защитным покрытием. При подборе сечения стойки необходимо подтверждать её прочность инженерными расчётами.

Для защиты несущих конструкций от коррозии и иных неблагоприятных явлений автором рекомендуется:

- горячее цинкование, общая толщина покрытия не менее 100 мкм;
- газотермическое напыление по ГОСТ 9.304, общая толщина покрытия для цинкового напыления – 120–180 мкм, для алюминиевого напыления – 200–250 мкм.

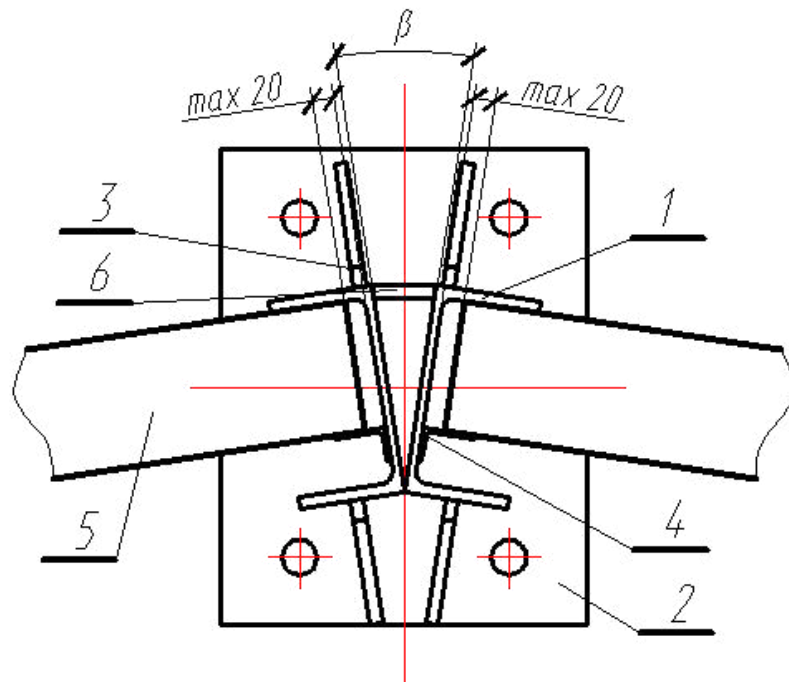
При необходимости на оцинкованные поверхности стоек возможно нанесение специальных лакокрасочных покрытий либо композитных накладок.

Стойки крепятся к фундаменту через опорную пластину с помощью фундаментных болтов (химических анкеров и др.), параметры которых определяются при выполнении инженерных расчетов.

5.1.5 Применение стоек различной конструкции при перепаде высот и поворотах

При проектировании экранов на криволинейных участках дороги следует аппроксимировать кривую ось установки, разбивая её на прямые участки равные шагу расстановки стоек. Шаг расположения стоек рекомендуется принимать не менее 2 метров. Чертёж поворотной стойки из двух швеллеров представлен на рисунке 5.1.

При отсутствии возможности установки панелей в прямой стойке с шагом 2 и более метра применяются стойки поворотные. Поворотная стойка представляет собой составной профиль, обеспечивающий крепление акустических панелей.



1 – швеллер, 2 – пятка стойки, 3 – удерживающие косынки, 4 – уголок крепления панели, 5 – панель, 6 – полка швеллера

Рисунок 5.1 – Поворотная стойка из двух швеллеров

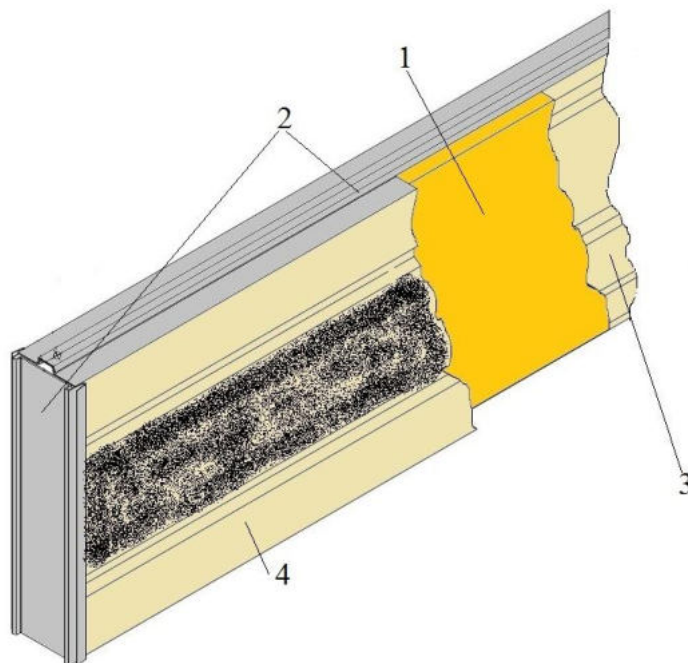
При значительных перепадах в уровне земли, в ШЭ следует делать ступенчатый переход на стыках секций. При этом высота стойки увеличивается на величину ступени. В конструкции стойки предусматривается специальный

упор, обеспечивающий возможность установки панелей без скоса в продольной плоскости, при этом соблюдается акустическая герметизация всей конструкции шумозащитного экрана в целом.

При сравнительно малых уклонах дороги допускается использовать плавный переход и параллельный переход.

5.1.6 Требования к панелям шумозащитного экрана

Шумозащитные панели по составу могут делиться на однослойные и многослойные. Многослойная панель состоит из звукоизолирующей задней крышки, звукопоглощающего гидрофобного материала и перфорированной передней крышки с коэффициентом перфорации не менее 0,3, скрепленных торцевыми стенками, выступающими дополнительными ребрами жесткости конструкции. Состав многослойной панели представлен на рисунке 5.2.



1 – звукопоглощающий материал; 2 – звукоизолирующий каркас;
3 – звуконепроницаемая крышка; 4 – звукопроницаемая крышка

Рисунок 5.2 – Устройство многослойных акустических панелей

Требования к материалу конструкции, помимо акустических свойств, определяется требованиями к коррозионостойкости конструкции панели. Так можно разделить места установки на экраны с жесткими и с щадящими условиями. Места с жесткими условиями – это участки установки экрана вдоль автомобильных и железных дорог, где производится обработка дороги химическими реагентами, очистка экрана химическими составами или механическими приспособлениями, складирование снежных масс, установка экрана ближе 5м от края проезжей части, либо от головки ближайшего рельса. Щадящие места установки – это иные места, где экраны менее подвержены химической коррозии (экраны для снижения шума от стационарных источников, экраны, располагающиеся для защиты от шума на селитебных территориях больниц, детских садов и др.) и не подверженные химическим воздействиям обрабатывающих составов, попаданию щебня или дисперсной пыли с автомобильных и железных дорог и пр.

Для увеличения акустической долговечности рекомендованы следующие параметры шумозащитных панелей (таблица 6):

- параметры стенок акустических панелей: для алюминиевых и оцинкованных панелей 1,5 мм, для панелей из импрегнированной древесины толщина задней стенки не менее 18 мм, для композитных панелей 4 мм и для панелей из нержавеющей стали 1 мм соответственно;

- для обеспечения защиты панелей из стали требуется горячее цинкование, минимальная толщина слоя – 18 мкм (при толщине применяемого листа от 0,8 мм до 1,5 мм) и 23 мкм (при толщине применяемого листа от 1,5 мм до 3 мм) с последующим нанесением защитно-декоративного лакокрасочного покрытия. Антикоррозионное покрытие наносится на панели в заводских условиях после устройства перфорации или жалюзийных отверстий.

- при применении панелей в щадящих условиях допускается применение оцинкованных панелей с толщиной листа 0,8мм и выше, алюминиевого листа от 1 мм и выше;

– для защиты деревянных акустических панелей от влаги, химических реагентов и прочих воздействий, приводящих к преждевременному разрушению, следует обрабатывать деревянные конструкции способом импрегнирования. В местах, где необходимо применение экранов со сроком службы свыше 25 лет автором предлагается использовать панели из щепобетона, к которым разработаны рекомендации по изготовлению.

Таблица 5.1 –Рекомендуемые параметры стенок акустических панелей

№п/п	Материал	Толщина материала, в местах с жесткими условиями не менее, мм	Толщина материала, в местах с щадящими условиями не менее, мм	Примечание
1	Для алюминиевых панелей	1,5	1	
2	Для оцинкованных панелей	1,5	0,8	без учёта антикоррозионного покрытия
3	Для деревянных панелей	18	18	
4	Для композитных панелей	4	3	
5	Для панелей из нержавеющей стали	1	0,8	

Автор рекомендует толщину передней перфорированной стенки металлических панелей применять не меньше толщины задней стенки, при этом не допускается применение панелей без торцевых крышек.

Для достижения требуемого звукопоглощения и обеспечения акустической долговечности звукопоглощающий материал в многослойных панелях не должен являться элементом силовой конструкции ШЭ. Средняя плотность применяемого звукопоглощающего материала должна быть в пределах 90 – 120 кг/м³.

Конструкции металлической панели должны предусматривать технологические отверстия в нижней части панели с целью ненакопления воды в теле панели. Для предотвращения преждевременного разрушения

звукопоглощающий материал, находящийся внутри многослойной панели, должен быть кэширован или обернут стеклотканью.

Светопрозрачные панели должны обладать стойкостью к абразивной пыли и воздействию ультрафиолетовых лучей.

Допустимый прогиб панелей под собственным весом и/или приложенной ветровой нагрузкой принимается в соответствии с [236], но не должен превышать 20 мм.

В ходе проведенных исследований, автор делает вывод, о недопущении прямого контакта между материалами, образующими недопустимую гальваническую пару (без защитного покрытия) в конструкции акустической панели.

5.1.7 Конструкционные особенности шумозащитных экранов

Крепление шумозащитных панелей к стойкам экрана осуществляется с помощью специальных приспособлений: уголков, адаптеров, пружинные скобы и пр. Для улучшения звукоизоляции конструкции экрана в целом, панель к стойке следует крепить через уплотнитель.

Для защиты от выпадения панелей из тела экрана автор рекомендует все панели (в особенности на путепроводах, у пешеходных зон и пр.) крепить дополнительно специальными удерживающими тросами.

Для повышения качества и эффективности ШЭ выдвигаются следующие рекомендации:

1. Шумозащитные экраны должны быть спроектированы так, чтобы они требовали минимального обслуживания, за исключением очистки. Чтобы свести к минимуму необходимость в обслуживании, должно быть уделено внимание к подбору материалов, используемых в конструкциях шумозащитных экранов. Качество используемых материалов должно соответствовать месту расположения экрана.

2. Конструкция экрана и используемые в нём материалы должны быть подобраны с учетом таких показателей, как долговечность, устойчивость к коррозии, ударам камней, потеря цвета, огнеупорность и др.

3. Для тех шумозащитных экранов, элементы которых при наличии требуемых огнеупорных свойств, тем не менее являются легковоспламеняющимися, необходимо, чтобы либо опорные элементы были несгораемыми и выполняли функцию экрана для пламени, либо чтобы на каждые 100 м шумозащитного экрана были встроены негорючие элементы, как минимум на 4 м в длину. Также требуется аварийный доступ/ выходы для придорожных экранов и экранов вдоль центральной разделительной полосы в случае эвакуации.

4. Освещение внутри шумозащитных сооружений должно быть единообразным и исключать эффекты бликов и мерцания, при этом время работы искусственного освещения в дневное время должно быть минимизировано.

5. Детали конструкции шумозащитного экрана должны быть спроектированы таким образом, чтобы исключить возможность скопления влаги, которая способствует гниению или химической коррозии. Крепления из сплавов и металлов должны быть подобраны должным образом, чтобы избежать разности в электрохимических потенциалах, которая усилит коррозию.

6. Если предлагается использование прозрачных материалов, то необходимо рассмотреть требования к техническому обслуживанию и ожидаемый срок службы. Следует использовать продукты, считающиеся самоочищающимися, что исключит необходимость в обслуживании.

7. Увеличивая площадь звукопоглощения панелей экрана (увеличивая площадь перфорации, применение новых видов панелей) увеличивается эффективность экрана на 2-3дБА. Поэтому в местах, где не удастся достичь требуемой эффективности геометрическими размерами экрана, необходимо устанавливать панели с повышенным звукопоглощением (например, панели из

импрегнированной древесины). Необходимо применение в составе панелей звукопоглощающего материала, работающего весь срок службы панелей.

8. Звукоизоляция экрана должна быть подтверждена натурными измерениями всего экрана, а не панелей в отдельности. Звукоизоляция экрана должна быть минимум на 10дБА больше требуемой эффективности экрана.

9. Для снижения шума от галереи необходимо, помимо установки экрана, предусматривать дополнительную акустическую обработку самой галереи.

10. Для технологических экранов рекомендуется применять в конструкции боковые отгоны.

11. В конструкции экрана рекомендуется предусматривать надстройки на свободном ребре (антидифрактор, козырьки экрана длиной от 1м и больше). Щели под экраном необходимо заделывать дополнительными конструкциями.

12. При изготовлении экранов из различных материалов необходимо исключать появление гальванической пары. Для этого необходимо применение диэлектрических уплотнителей.

5.2 Шумозащитные экраны из импрегнированной древесины

Описание конструктивных и качественных параметров панелей.

Анализ предложенных технических требований позволил автору доработать конструкции шумозащитных панелей из импрегнированной древесины и применить такие конструкции на практике.

Панель шумопоглощающая деревянная представляет собой каркасную систему (щит) прямоугольной формы, внутри которой расположен звукопоглощающий материал. Каркас щита состоит из нестроганных деревянных элементов хвойных пород. Горизонтальные несущие элементы каркаса в

зависимости от длины панели выполняются из бруса 50x100 или 100x100; вертикальные несущие элементы корпуса выполняются из бруса 100x100; в зависимости от габаритных размеров панелей во внутренней полости предусмотрена система связей (вертикальных, горизонтальных или наклонных) из бруса 50x100 или 50x50.

Деревянные элементы каркаса подвергаются специальной обработке – пропитыванию в автоклаве антисептическими растворами (импрегнирование). Для панели импрегнированию подвергаются все деревянные элементы без исключения.

Задняя сторона панели (видимая со стороны территории, защищаемой от шума) закрыта доской (вагонкой). Минимальная толщина доски (вагонки) для панелей класса «Евро» составляет 18 мм. Доска (вагонка) для любого класса панелей должна быть импрегнированной. В конструкции панелей класса «Стандарт» допускается использование доски (вагонки) или других элементов, предназначенных для панелей класса «Евро». Максимальная ширина доски (вагонки) составляет 150 мм.

Внутри панели устанавливается звукопоглощающий материал – плиты из минеральной ваты толщиной 50 мм, размеры плит внутри панели определяются её конструктивными особенностями, щели между плитами или в местах сопряжения с деревянными элементами не допускаются. Осадка плит из минеральной ваты внутри панели предотвращается за счёт элементов внутренней системы связей. Плотность минеральной ваты для панелей класса «Евро» составляет от 80 до 110 кг/м³ (± 8 кг/м³), плотность минеральной ваты для панелей класса «Стандарт» составляет от 50 до 80 кг/м³ (± 8 кг/м³).

С лицевой стороны (стороны панели, обращённой к источнику шума) панель закрыта защитной полиэтиленовой сеткой (HDPE) чёрного или зелёного цвета (по условиям заказа), которая пристреливается к каркасу панели скобами. В

зависимости от размеров панелей (или условий заказа) сетка может перекрывать внешние несущие элементы панели полностью или частично.

Поверх сетки набиваются лицевые строганные бруски 20x40 мм с закруглёнными краями. В панелях класса «Евро» применяются бруски не ниже 1-го сорта, а в панелях класса «Стандарт» применяются бруски не ниже 2 сорта [311]. Расстояние между рейками при набивке для панелей не должен превышать 100 мм. Для панелей, устанавливаемых в нижних рядах экранов на фундамент без ростверка, рекомендуется делать уменьшенный шаг – 30 мм, путём набивки снизу дополнительных реек длиной от 0,5 до 0,75 м.

В местах соединения нижней панели с фундаментом конструкции (либо с земляным полотном) применяется резиновый уплотнитель различной ширины, либо щель (до 5 см) заделывается импрегнированным брусом.

В месте сопряжения поверхности панели с поверхностью полок профильных стоек (слева и справа лицевой части панели по всей высоте) прикрепляется скобами полиуретановая прокладка (уплотнитель EPDM) для акустической герметизации.

Основными акустическими характеристиками панели являются её звукоизоляция и звукопоглощение:

- характеристикой звукопоглощения панели является коэффициент звукопоглощения (см. табл. 5.2).

- звукоизоляция панели определяется индексом звукоизоляции (см. табл. 5.3).

Исследуя различные варианты жесткости конструкции, необходимой звукоизоляции, подобраны оптимальные значения параметров конструкции панелей, толщины задней стенки, минеральной ваты. Таким образом, индекс

звукоизоляции воздушного шума разработанной панели составляет не менее 34 дБ.

Таблица 5.2 – Значения коэффициента звукопоглощения панели шумопоглощающей деревянной

Толщина панели, мм	Значения коэффициента звукопоглощения α в октавных полосах частот со среднегеометрическими значениями, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
118	0,25	0,50	0,95	0,97	0,97	0,92	0,84	0,79

Значение суммарной стандартной неопределенности $u_c = 0,2$

Значения частотной характеристики изоляции воздушного шума и индекса ЗИ панели шумопоглощающей деревянной указаны в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Значения частотной характеристики изоляции воздушного шума и индекса ЗИ панели шумопоглощающей деревянной

Параметр	Изоляция воздушного шума панели шумопоглощающей деревянной, дБ								Индекс ЗИ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Измеренное значение	17	19	24	34	33	35	40	44	34

Значение суммарной стандартной неопределенности $u_c = 0,5$.

По своим акустическим характеристикам панель отвечает требованиям [33], рекомендуется к применению в качестве составляющей экранирующих устройств и сооружений для защиты застройки и селитебных территорий от шума транспортных потоков и др. источников шума.

В соответствии с требованиями [34] деревянные конструкции, предназначенные для эксплуатации в химических средах средней и сильной степени агрессивного воздействия, следует изготавливать из древесины хвойных

пород, имеющих повышенную стойкость – ели, сосны, пихты, лиственницы, кедра и других.

Элементы шумозащитных панелей имеют сплошное массивное сечение и изготавливаются из брусьев, круглого леса или из клееной древесины. Для изготовления конструкций необходимо использовать древесину, не поражённую дереворазрушающими грибами и насекомыми.

Для изготовления шумозащитных панелей необходимо использовать только просушенную древесину, влажность которой не превышает 20%.

Используемые материалы должны гарантировать высокую степень защиты от плесени и других атмосферных коррозий в ходе эксплуатации. Все деревянные детали должны быть обработаны в автоклаве методом пропитки вакуум-давление-вакуум.

Длительность пропитки древесины должна быть не менее:

- сосна – 4 часа;
- кедр – 3,5 часа;
- лиственница – от 6,5 часов;
- пихта – 6 часов;
- ель – 6 часов.

Примеры растворов для пропитки древесины:

- Tanalith E – на основе воды и медного консерванта (Англия);
- Бионейтрал (Bioneutral) – на основе воды и медного консерванта (РФ);
- Wolman – антисептики с примесью антипирена, не содержат вредный мышьяк и хром (США);
- Osmose (США).

После вышеперечисленных обработок дерево может считаться достаточно защищённым как по поверхности, так и вглубь (до 0,5 см), от грибковых инфекций и насекомых и может собираться в конструкции экрана и сохранять акустическую долговечность последнего.

Не допускается при сборке панелей укладка звукопоглощающих плит с зазорами. Автор предлагает во избежание образования щелей между стыкуемыми звукопоглощающими плитами внутри панели в ходе эксплуатации возможно выполнять стыковку «с натягом» или «внахлёст» (согласно рисунку 5.3).

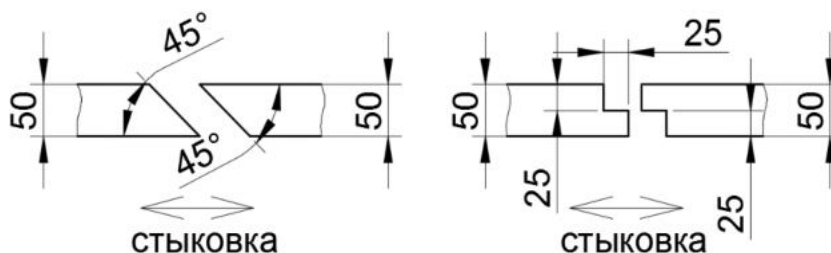


Рисунок 5.3 – Стыковка звукопоглощающих плит (внахлёст)

В качестве внешних уплотняющих элементов используется полиуретановая прокладка (уплотнитель EPDM). Располагается уплотнитель вдоль линий сопряжений элементов панели с другими панелями или с несущими элементами экрана (стойками). Назначение уплотнителя – компенсация возможных отклонений размеров панели и перекрытие возникающих при этом зазоров в собранном экране для сохранения его акустической эффективности.

Толщина уплотнителя должна быть не менее 4 мм (1...3 мм в сжатом состоянии), ширина не менее 30 мм.

Уплотнитель к корпусу панели пристреливается скобами с шагом 100–150 мм. Внешний вид шумозащитных панелей показан на рисунке 5.4–5.6.

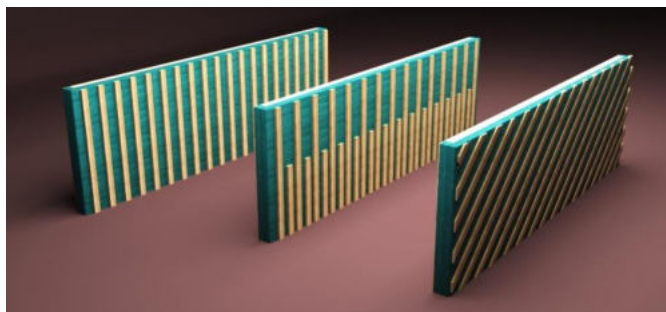


Рисунок 5.4 – Трёхмерные модели шумозащитных панелей



Рисунок 5.5 – Вид панелей со стороны источника шума



Рисунок 5.6– Вид панелей со стороны защищаемой территории

Для прочного крепления панелей между собой автором предлагаются скреплять панели между собой деревянными штифтами (рисунок 5.7).

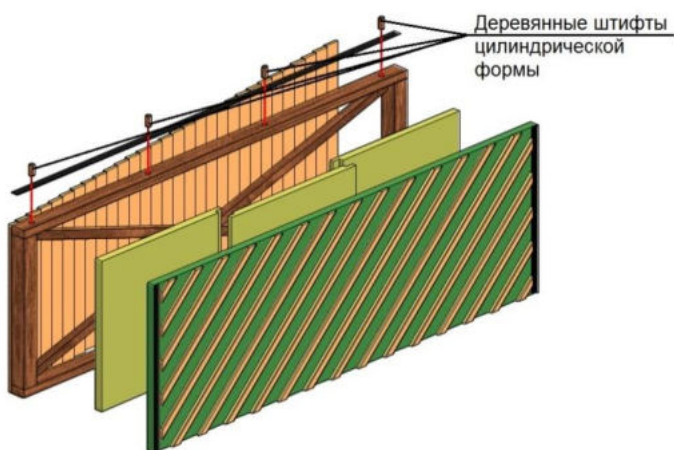


Рисунок 5.7 – Установка деревянных штифтов для сопряжения панелей

Панели крепятся в несущие конструкции (стойки) известным способом. Способы фиксации указаны на рисунке 5.8–5.9.

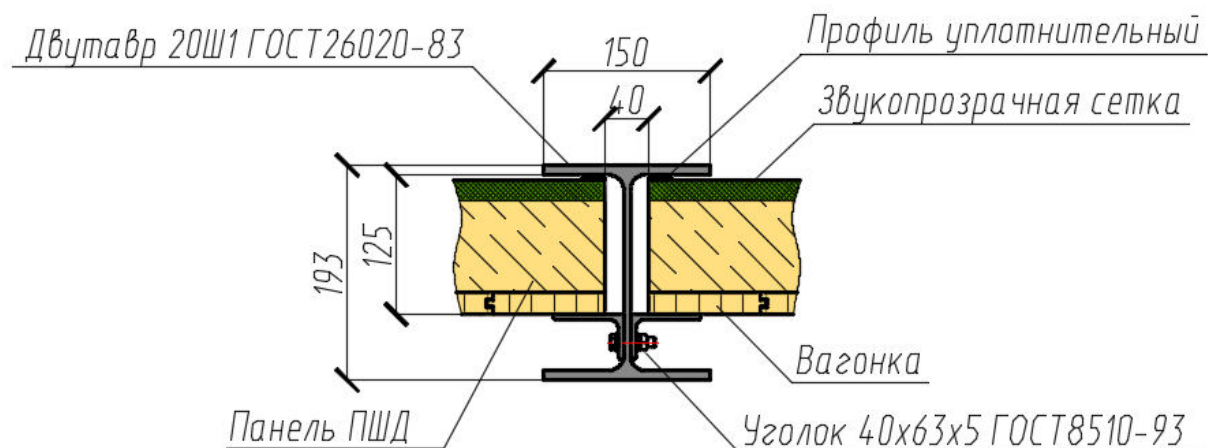


Рисунок 5.8 – Установка панелей ПШД с перекрытием вагонкой вертикальных несущих элементов

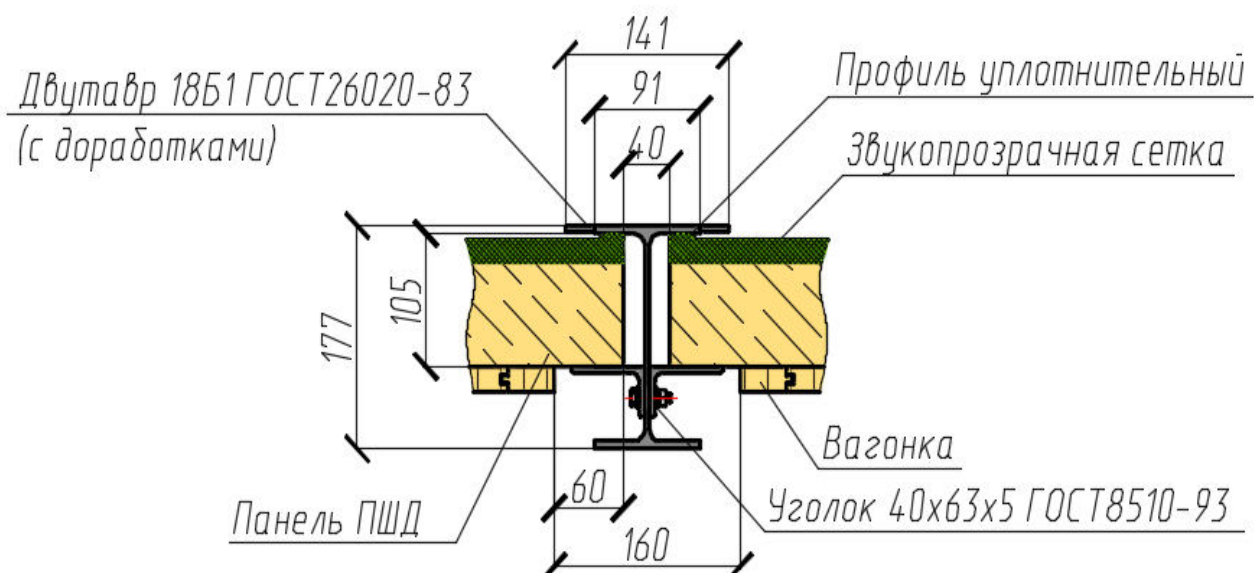


Рисунок 5.9 – Установка панелей ПШД без перекрытия вагонкой вертикальных несущих элементов

5.3 Шумозащитные экраны из щепобетона

Одной из целей настоящей работы было подобрать материал для шумозащитного экрана, который имел бы максимальные акустические свойства и максимальную коррозионостойкость, а, следовательно, высокую акустическую долговечность экрана.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по конструированию и установке долговечных шумозащитных экранов из щепобетона.

Панель шумопоглощающая из щепобетона представляет собой сборную систему (щит) прямоугольной формы из полых блоков, изготовленных методом вибропрессования древесной щепы с цементным вяжущим и химическими добавками и выполняющих функцию несъемной опалубки при бетонировании конструкции. Залитые бетоном пустоты, расположенные по вертикалям и горизонталям, образуют бетонный каркас (ядро), который обеспечивает несущую способность конструкций в зависимости от способа армирования, вида и качества бетона.

В таблице 5.4 приведены примерные значения номинального веса панели в зависимости от её габаритных размеров при использовании тяжелого бетона плотностью 2500кг/м³.

Вес панелей в зависимости от габаритных размеров указан в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Вес тяжелых панелей из щепобетона

Высота панели, мм	Длина панели, мм			
500	2960	3960	4960	5960
750	750	971	1214	1481
1000	998	1292	1616	1972

Продолжение таблицы 5.4.

Высота панели, мм	Длина панели, мм			
1250	1247	1613	2019	2462
1500	1495	1935	2421	Не производится

Вес панели может изменяться в зависимости от плотности бетона.

Основными акустическими характеристиками панели являются ее звукоизоляция и звукопоглощение; характеристикой звукопоглощения панели является коэффициент звукопоглощения, значения которого приведены в таблице 5.5. Звукоизоляция панели определяется индексом звукоизоляции, дБА; индекс звукоизоляции панели не менее 34 дБА; (таблица 5.6)

Таблица 5.5 – Коэффициент звукопоглощения

Технология	Коэффициент звукопоглощения в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Щепобетон	0,2	0,3	0,5	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6

Таблица 5.6 – Индекс звукоизоляции

Параметр	Показатели звукоизолирующей способности ЗИ в октавных полосах частот со среднегеометрическими значениями частот, Гц, дБ							Индекс ЗИ, дБ
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Измеренное значение	28	29	30	34	42	48	50	34

По своим акустическим характеристикам панель отвечает требованиям [33]. «Защита от шума», и рекомендуется к применению в качестве составляющей экранирующих устройств и сооружений для защиты застройки, и селитебных территорий от шума транспортных потоков и др. источников шума.

Панели при правильном их исполнении имеют прямоугольную форму, ровные края и одинаковую толщину по всей поверхности. Параметры качества блоков, используемых для изготовления панелей не должны иметь дефектов, препятствующих их использованию по назначению.

Блоки для составления панели экрана должны изготавливаться в соответствии с требованиями [312] по технологическому регламенту, утвержденному предприятием-изготовителем.

Толщина наружных стенок и вертикальных диафрагм пустотелых блоков (минимальная толщина перегородок) должны быть не менее 30 мм. Общий вид панели представлен на рисунке 5.10.

Усиление бетонного каркаса панели осуществляется армированием стальными стержнями диаметром не менее 8мм по всей длине панели и вертикальным армированием в торцевых элементах панели.

Анкерные стержни, закладываемые в бетонный каркас и используемые для переноски панелей, должны иметь коэффициент запаса прочности не менее трех.



Рисунок 5.10 – Вид готовой панели

5.4 Шумозащитные экраны для высокоскоростных железнодорожных магистралей

5.4.1 Общие сведения

При разработке шумозащитных мероприятий для высокоскоростных железнодорожных магистралей следует учитывать, что шум, возникающий при движении высокоскоростных поездов, является результатом суммарного воздействия нескольких источников шума, связанных с высокоскоростным поездом и расположенных на различной высоте по отношению к головке рельса, а именно: токоприемника ($5,0 \pm 0,1$) м, лобовой части и кузова поезда ($2,0 \pm 0,1$) м, ходовой части поезда (система «колесо–рельс») ($0,5 \pm 0,1$) м.

Шумозащитный экран для ВСМ состоит из следующих основных элементов:

- несущие элементы конструкции – металлические стойки и, в случае размещения экрана на естественном основании, фундамент;
- шумозащитное заполнение – панели;
- элементы заземления конструкции.

Стойки экрана могут иметь различную форму в зависимости от архитектуры проекта и конструкционных возможностей применяемых элементов экрана, располагаются в вертикальном либо наклонном положении в зависимости от продольных и поперечных уклонов.

Шумозащитные панели могут быть выполнены из различного материала и в различной цветовой гамме в зависимости от архитектуры проекта, монтируются, как правило, между стойками с помощью дополнительных элементов.

Элементы заземления конструкции должны быть предусмотрены согласно требованиям «Инструкции по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах» [313].

Шумозащитный экран и его основные составляющие могут быть снабжены дополнительными элементами в зависимости от конструкционных особенностей применяемых элементов: уплотнителями, крепёжными деталями, поручнями и др.

5.4.2 Нагрузки на конструкции экрана при высокоскоростном движении

При выборе экрана для высокоскоростной магистрали одним из основных требований к нему является его надежность к воспринимаемым нагрузкам. Расчёт элементов экрана должен вестись с учётом условий его эксплуатации, т.е. с учётом не только постоянных нагрузок – ветрового давления и весовой нагрузки, но также с учётом значительных аэродинамических нагрузок, возникающих при движении вблизи экрана поезда на больших скоростях.

Постоянные ветровые нагрузки определяются известным путем и суммируются с дополнительными нагрузками.

В ходе выполнения работы рассмотрено применение методики проведения вычислительного моделирования для определения аэродинамического воздействия проходящего высокоскоростного поезда на конструкцию шумозащитного экрана и определены предельные нагрузки, которые воспринимает шумозащитный экран в заданных условиях. Исходными данными для проведения расчётов послужила информация о размерах и форме шумозащитных экранов, и их расстоянии от оси пути.

Расчеты проводились в несколько этапов, в итоге можно выделить основные из них:

- построение геометрических и сеточных моделей;
- выбор математической модели;
- расчёт или серия расчётов, последующая обработка и анализ результатов, как интегрированными средствами визуализации расчётного модуля, так и с использованием специальных программ постобработки.

Для данной работы геометрические модели создавались в специализированных программах SpaceClaim и Unigraphics NX. Для построения расчётных сеток использовались программы Gambit и ANSYS ICEM CFD, в которых имеются возможности производить расчёты на динамических перестраивающихся структурированных сетках.

В расчётах использовалась упрощённая модель экрана в виде прямоугольного щита высотой 6 метров, длиной 100 метров, толщиной 0,2 метра (рисунок 5.11).

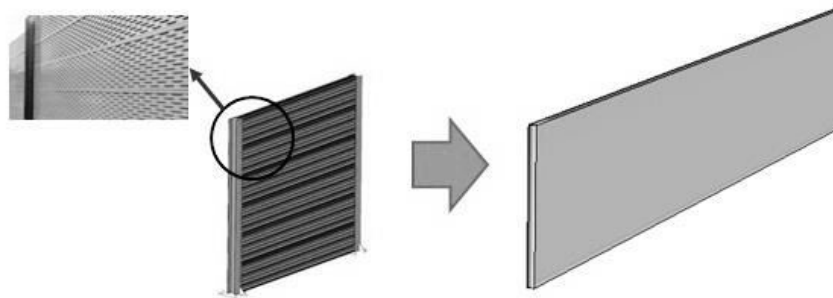


Рисунок 5.11 – Упрощённая модель акустического экрана

Для выполнения расчётов были построены геометрические модели для различных положений экрана относительно оси путей. Так рассматривались случаи с расстоянием между осью экрана и осью поезда $X=3, 4, 5, 6$ метров, а также случаи с двумя установленными параллельно экранами. Модель поезда принималась упрощённая (без зазоров между вагонами, без колёс и механизмов подвагонном пространстве, без токоприемников), так как предполагается, что указанные элементы не играют большой роли в аэродинамическом воздействии на конструкции ограждений, модель поезда отражена на рисунке 5.12–5.13. Геометрическая модель расчета и расположение экрана отображены на рисунках 5.14–5.15.



Рисунок 5.12 – Общий вид высокоскоростного поезда

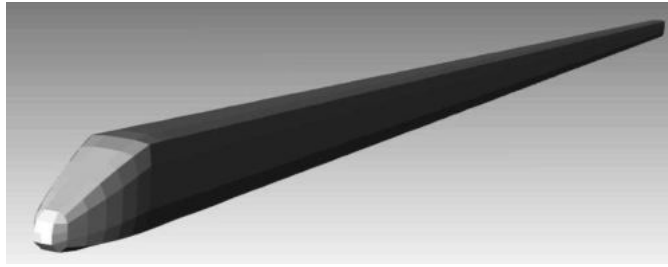


Рисунок 5.13 – Упрощённая модель поезда

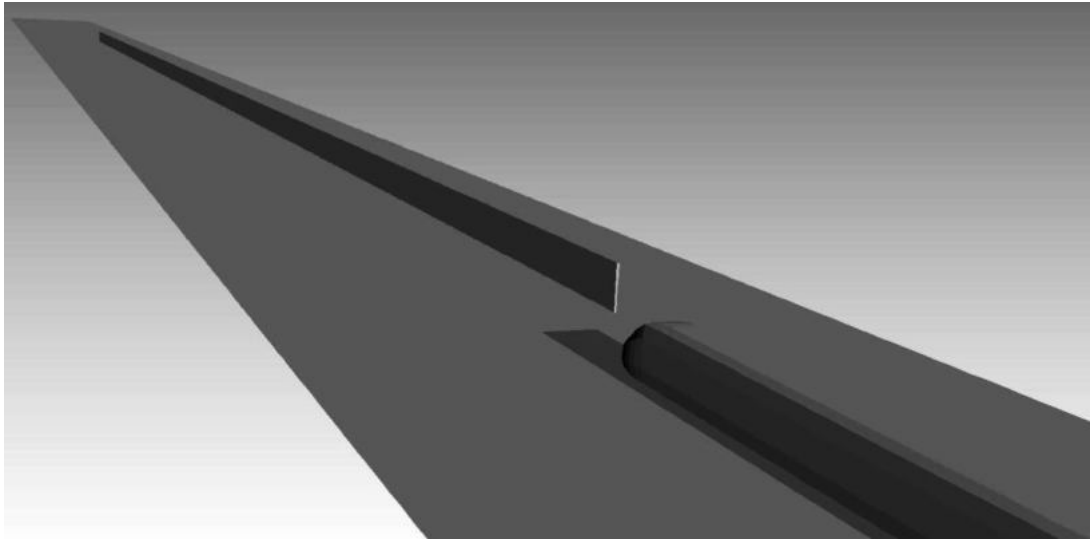


Рисунок 5.14 – Геометрическая модель расчёта



Рисунок 5.15 – Варианты положения экрана относительно поезда

Решение задачи предусматривает расчёт трёхмерного нестационарного процесса движения модели поезда, с использованием метода динамического перестроения сетки, по горизонтальной поверхности вдоль модели шумозащитного экрана конечной длины.

Для построенных моделей (расстояние от оси путей до экрана 3, 4, 5 и 6 м) были проведены расчёты, в которых скорость движения поезда принималась равной 200, 250, 300, 350 и 400 км/ч. Для моделей с двумя установленными экранами расчёт произведён при скорости движения поезда равной 400 км/ч.

Для инженерных расчётов при проектировании шумозащитных экранов прямой формы в поперечном сечении аэродинамическую нагрузку от проходящего высокоскоростного поезда допускается принимать по графику на рисунке 5.16, где P (кг/м²) – это величина максимального давления на единицу площади экрана, L (м) – расстояние от оси ближайшего пути до оси установки шумозащитного экрана.

Разработана методика определения аэродинамических нагрузок на конструкции экрана при высокоскоростном движении совместно с ветровой нагрузкой (рисунок 5.16). При проектировании двух экранов, находящихся друг напротив друга, для каждого из них при расчёте прочности и устойчивости принимается величина аэродинамического давления по верхнему графику согласно рисунку 5.16.

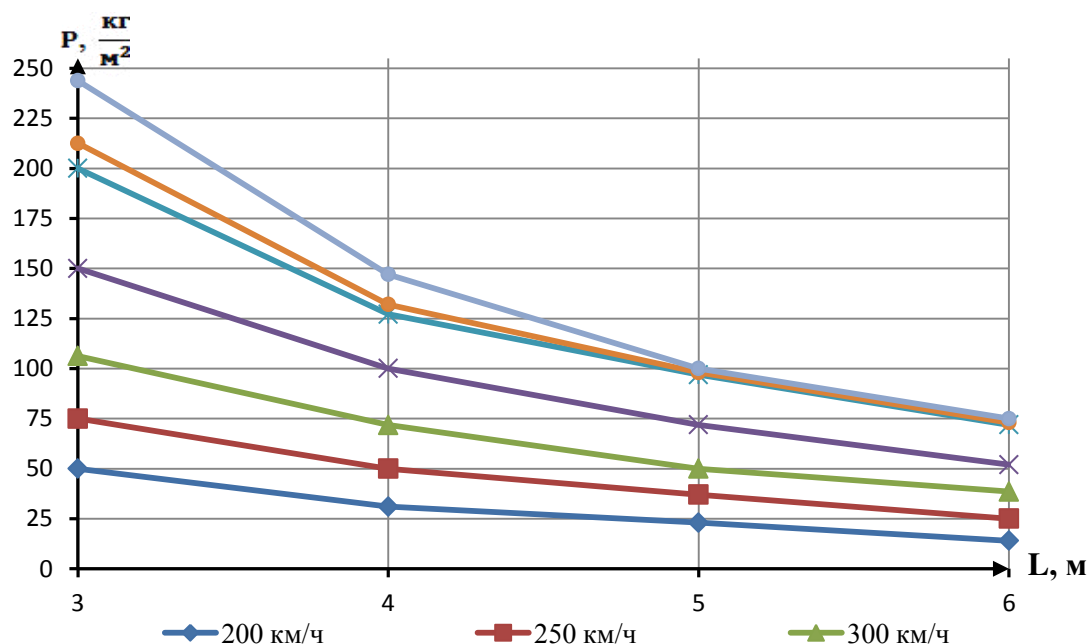


Рисунок 5.16 – График учёта аэродинамической нагрузки для прямого шумозащитного экрана на высокоскоростных магистралях

В случае, когда форма экрана в поперечном сечении отличается от прямой (прямая с козырьком, парусообразная, наклонная и пр.) величина дополнительного давления должны быть установлена специальными расчётами применительно к конкретно заданным условиям. При этом учитывается только максимальная нагрузка из полученных расчётом (в зоне сжатия или разряжения).

В случае, когда экран выполнен в виде замкнутого шумозащитного тоннеля, величина дополнительного давления также должна быть установлена специальными расчётами. При этом расчёт должен проводиться применительно к двум условиям:

- с учётом нагрузки от снега и наледи на поверхности шумозащитного тоннеля;
- без учёта нагрузки от снега и наледи на поверхности шумозащитного тоннеля.

Выполненные расчёты позволяют сделать выводы о значительном совместном аэродинамическом воздействии (свыше 350 кг/м^2) проходящего высокоскоростного поезда на шумозащитные экраны и определить численно максимально возможные нагрузки для применения их значений при расчёте и проектировании шумозащитных экранов на ВСМ.

5.4.3 Требования к панелям экрана для ВСМ

Выбор шумозащитных панелей осуществляется исходя из акустических расчетов и архитектурных требований.

Шумозащитные панели должны соответствовать требованиям стандартов организаций или техническим условиям, утверждённым в установленном порядке.

Шумозащитные панели по составу могут быть:

- однослойные;
- многослойные.

Рекомендуемые материалы для изготовления панелей:

- алюминий;
- коррозионно-стойкие стали и сплавы;
- сталь оцинкованная тонколистовая, при условии выполнения дополнительных требований: минимальная толщина листа без учета толщины цинкового покрытия – 1,5 мм; цинковое покрытие должно быть выполнено после механической обработки; дополнительное лакокрасочное покрытие с учётом степени агрессивности среды, в которой предполагается эксплуатация, в соответствии с [233]; антикоррозионные покрытия (оцинковка и окрашивание) должны наноситься на перфорированные панели строго после осуществления перфорации), гармонизированных с зарубежными стандартами;
- железобетон (при обосновании прочностным расчётом допускается использовать неармированный бетон);
- закалённое стекло;
- полиметилметакрилат (ПММА);
- монолитный поликарбонат.

Все прозрачные элементы (стекло, ПММА, поликарбонат) должны иметь внутреннее армирование (металлической или геосинтетической сеткой), обеспечивающей дополнительную прочность прозрачного материала и предотвращающее его распад при разрушении.

Не допускается использовать панели из материалов, срок службы которых ограничен прочностными и коррозионными недостатками, например, сталь углеродистая без защитных покрытий.

Допускается применять при соответствующем технико-экономическом обосновании в качестве материалов панелей – композиты, в состав которых входят материалы, удовлетворяющие вышеперечисленным требованиям.

Выбор того или иного материала основывается на технико-экономическом обосновании с учётом требований архитектурного проекта.

Типовая многослойная панель состоит из звукоизолирующего каркаса замкнутой вытянутой формы, внутри которого размещается звукопоглощающий негидрофильный материал, каркас закрывается крышками, из которых одна

крышка звукопроницаема – имеет перфорацию по площади составляющую не менее 0,3 площади крышки.

Особенностью панелей для высокоскоростного движения является повышенная прочность, которая обеспечивается увеличенными геометрическими и физико-механическими характеристиками панели и применяемых материалов, а также вводом дополнительных элементов в конструкцию панели.

Многослойные панели по конструкции могут выполняться с воздушными прослойками или без таковых. Звукопоглощающий материал в многослойных панелях не является элементом силовой конструкции ШЭ.

Средняя плотность применяемого звукопоглощающего материала должна быть не менее 110 кг/м³.

Для защиты от влаги и преждевременного разрушения от климатических изменений находящийся внутри многослойной панели звукопоглощающий материал должен быть обернут одним слоем стеклоткани или другим звукопроницаемым негорючим материалом.

Соединения элементов многослойных панелей и форма элементов должны защищать внутреннюю полость панелей от попадания влаги. Если конструктивно обеспечить полную изоляцию внутренней полости от влаги не представляется возможным, то в конструкции панели должны быть предусмотрены специальные мероприятия по отводу воды наружу.

Однослойные панели выполняются в виде монолитных элементов (полиметилметакрилат, стекло, бетон и др.), которые, в свою очередь, для обеспечения необходимой жёсткости и прочности могут быть заключены в замкнутую раму.

Применение прозрачных панелей из полиметилметакрилата, поликарбоната, стекла и пр. материалов без рамы не допускается.

Прозрачные панели должны обладать стойкостью к абразивной пыли и действию ультрафиолетовых лучей.

Для предотвращения гибели птиц от ударов о прозрачные панели шумозащитных экранов рекомендуется нанесение силуэтов птиц на поверхности

панели в соответствии с рисунком 5.17. Суммарная толщина применяемого монолитного материала прозрачной панели (стекло, ПММА и пр.), а также конструкция рамы панели должны обеспечивать прочность панели при запроектированных нагрузках.



Рисунок 5.17 – Нанесение силуэтов хищных птиц на прозрачные экраны

К однослойным панелям также относятся панели из бетона и железобетона, выполненные с использованием съёмной (металлической, деревянной и др.) или несъёмной (древобетонной, щепоцементной или др.) опалубки.

Для обеспечения ремонтпригодности экрана панели из бетона или железобетона должны быть изготовлены в заводских условиях и доставляться на место как готовое изделие.

Все металлические элементы шумозащитных панелей должны быть защищены от коррозии.

Нанесение защитного слоя на поверхности панели осуществляется в заводских условиях по окончании всех механических работ по изготовлению.

Для защиты панелей из алюминия использование лакокрасочных покрытий обязательно. Окраска панелей из коррозионностойких сталей и сплавов необязательна для любых климатических районов.

В составе панелей не допускается прямой контакт между материалами, образующими недопустимую гальваническую пару (без защитного покрытия).

В зависимости от типа панели и материала, из которого она изготовлена, рекомендуются следующие минимальные поперечные размеры панели (толщина панели):

- для рамы панелей из закаленного стекла, ПММА или поликарбоната – исходя из условий обеспечения прочности;
- для панелей из бетона, железобетона – не менее 120 мм;
- для многослойных панелей – не менее 100 мм.

Рекомендуется при проектировании шумозащитных экранов высотой более 5-ти метров в нижних рядах устанавливать монолитные железобетонные панели, обладающие большей массой для смещения центра тяжести экрана и увеличения его устойчивости против опрокидывающих нагрузок. Применение подобных схем раскладки при проектировании необходимо обосновывать соответствующими расчётами в зависимости от массы применяемых панелей.

Самостоятельные крепления могут быть различного вида и конфигурации (пружинные механизмы, адаптеры, распорные резьбовые устройства и пр.), их выбор при проектировании зависит от выбора определённого вида панелей и рекомендуемого производителем панелей вида крепления.

В случае отсутствия у панелей самостоятельного крепления, а также если по мнению проектной организации самостоятельное крепление не удовлетворяет требованиям надёжности, назначается зависимое крепление (защемление панелей при помощи стальных профилей, резьбовыми соединениями шарнирного типа и пр.).

Установка панелей и крепление их к стойкам должны обеспечивать звукоизоляцию экрана при общей его прочности и устойчивости. Щели и проёмы в конструкции экрана недопустимы.

Шумозащитные панели должны быть снабжены технологическими отверстиями для возможности установки специальных удерживающих или

антивандальных устройств – проволочных тросов либо других приспособлений, принятых проектной организацией.

Конструкция технологических отверстий, а также улавливающих и удерживающих приспособлений должны быть приняты с учётом возможности выдержать нагрузку, равную пятикратному весу элементов, в случае падения панелей с высоты.

При разрушении экрана панель должна удерживаться улавливающими устройствами в висячем положении, свободное падение панели должно быть не более 20 см от места выпадения.

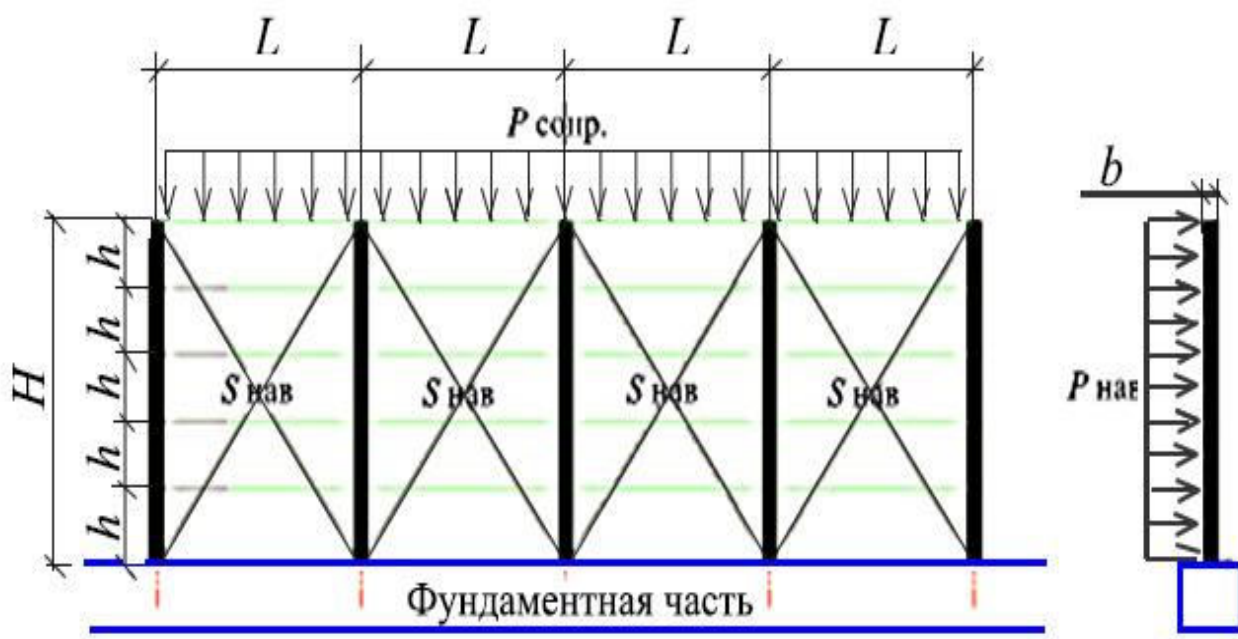
Улавливающими устройствами должны быть оборудованы все панели, которые устанавливаются на искусственных сооружениях, а также панели экранов высотой более 4 метров, и панели находящиеся в козырьке экрана независимо от высоты экрана.

Минимальные рекомендуемые толщины элементов панелей (передние и задние крышки многослойных панелей, прозрачные элементы) для различных материалов:

- алюминий толщиной не менее 1,5 мм;
- нержавеющая сталь толщиной не менее 1,2 мм;
- стекло, ПММА, поликарбонат толщиной не менее 15 мм.

Панели шумозащитного экрана должны выдерживать статическое распределённое давление (рисунок 5.18) на наветренную площадь не менее 350 кг/м² и не разрушаться. Кроме того, прочность панелей должна быть подтверждена испытаниями на динамические нагрузки и долговечность в зависимости от материала, из которого они сделаны.

Шумозащитные панели в составе секции должны работать при приложении горизонтальных нагрузок как единое целое, для чего в конструкции панелей сверху и снизу должны быть предусмотрены специальные соединяющие элементы (канавки, штифты, зубья и пр., рисунок 5.19) по прочности сопоставимые с основными элементами панели.



L – длина секции экрана; $P_{сопр.}$ – статическая распределённая нагрузка по линии сопряжения панелей в секции; b – толщина панелей; H – полная высота экрана; h – высота одного ряда панелей; $S_{нав}$ – наветренная площадь экрана; $P_{нав}$ – статическое распределённое давление на наветренную площадь

Рисунок 5.18 – Распределение давления и нагрузки по наветренной площади и по линии сопряжения панелей

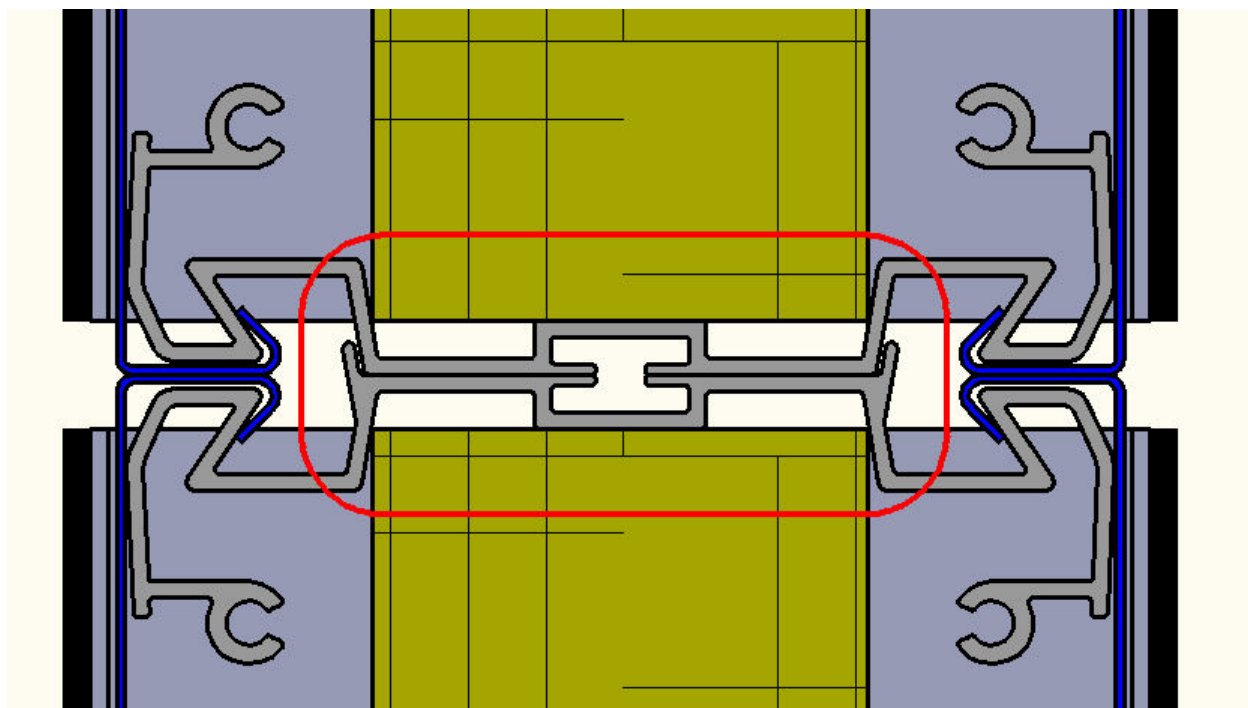


Рисунок 5.19 – Пример сопряжения панелей с вилочной и розеточной частями (поперечный разрез панелей)

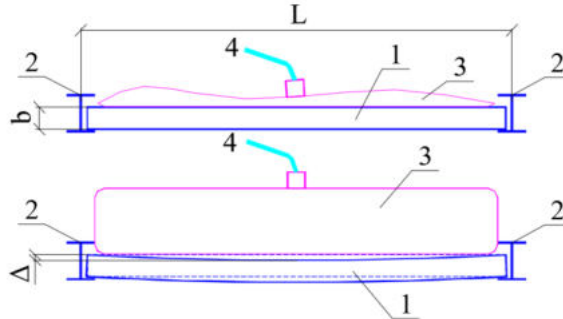
5.4.4 Испытание панелей

Для испытания панелей на способность выдерживать нагрузку автором разработана уникальная методика.

Примерная схема испытания шумозащитной панели на статическую нагрузку показана на рисунке 5.20 и включает следующие этапы:

- шумозащитная панель укладывается высотой h вдоль пола на определённом расстоянии от него и закрепляется своими концами так же, как должна быть закреплена в стойке экрана (принцип и механизмы закрепления выбираются производителем панелей);
- поверх шумозащитной панели укладывается эластичный резервуар (например, резиновый);
- постепенно резервуар наполняется жидкостью, объём и плотность жидкости подобраны таким образом, чтобы в конечном итоге масса резервуара с жидкостью была равна установленной нагрузке на панель в 350 кг/м^2 ;
- размеры резервуара должны быть подобраны таким образом, чтобы по окончании наполнения жидкостью он должен покрывать площадь панели не менее чем на 90%, а отдельные его края не должны свешиваться с панели;
- в таком состоянии образец выдерживается до тех пор, пока не остановятся деформации панели (но не менее 10 минут);
- по истечении времени испытания проводится визуальный осмотр панели на предмет механических повреждений или изменений в её конструкции, измеряется величина предельного прогиба, снимается нагрузка;
- после снятия нагрузки проводится повторный визуальный осмотр и измеряется величина остаточной деформации;
- величина предельного прогиба панели должна быть в соответствии с установленными значениями в проекте, исключаящими выпадение панелей из стойки, величина остаточной деформации должна быть равной нулю, механические повреждения и изменения в конструкции должны отсутствовать;

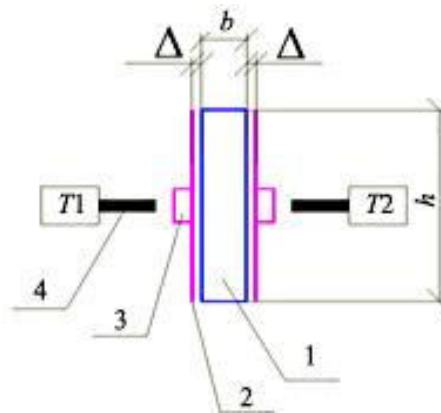
– в случае положительных испытаний на статическую нагрузку панель должна быть испытана на динамическое воздействие.



1 – испытываемая панель; 2 – элемент закрепления; 3 – резервуар с водой; 4 – вода

Рисунок 5.20 – Примерная схема испытательного стенда панели на статическую нагрузку

Примерная схема испытания шумозащитной панели на динамическую нагрузку и долговечность показана на рисунке 5.21.



1 – испытываемая панель; 2 – распределительный лист; 3 – площадка для штока толкателя; 4 – шток толкателя b – толщина панели; Δ – величина опытного прогиба; h – высота панели

Рисунок 5.21 – Примерная схема испытательного стенда панели на динамическую нагрузку и долговечность

Выше представленная схема испытания шумозащитной панели на динамическую нагрузку и долговечность включает следующие этапы:

– с обеих сторон панели в сечении, в котором при испытании на статическую нагрузку установлен максимальный прогиб, фиксируются толкатели,

которые настроены таким образом, чтобы продавить панель на величину опытного прогиба с погрешностью 2–3 мм (но не более 20 мм);

- для передачи равномерного усилия между толкателем и панелью на расстоянии не менее 20 мм от поверхности панели располагается распределительный лист (например, из фанеры) усиленный с площадкой для штока толкателя;

- в течение 0,1 секунды (время воздействия волн сжатия-разряжения от проходящего поезда на секцию экрана длиной до 5 метров) производится удар одного толкателя по площадке распределительного листа, который в свою очередь давит на панель и прогибает её на заданную величину;

- через 2,8–3,7 секунды после первого удара (время прохождения поезда через определённое поперечное сечение от головы вагона до хвоста) аналогично производится удар вторым толкателем с другой стороны;

- после удара вторым толкателем выдерживается пауза в течение 20 секунд для завершения колебательных процессов панели, на этом заканчивается один полный цикл нагружений;

- общее количество циклов, исходя из срока службы испытываемых панелей, назначается с учётом интенсивности движения высокоскоростных поездов (с расчётной скоростью 400 км/ч), один цикл соответствует прохождению одного поезда. Таким образом, учитывая среднюю интенсивность 40 поездов в сутки, количество циклов испытания для лёгких панелей составляет 219 тысяч, для тяжёлых панелей – 365 тысяч;

- у тяжёлых панелей из бетона, железобетона, щепобетона, а также лёгких прозрачных панелей в случае отсутствия прогиба при испытании на статическую нагрузку, испытания на динамическую нагрузку и долговечность по описанной методике допускается не проводить. Однако в данном случае у подобных панелей должны быть проведены испытания по внутренней методике на долговечность при воздействии аэродинамических нагрузок;

- по завершении испытания проводится визуальный осмотр конструкции панели. Шумозащитная панель должна не иметь совсем или иметь ограниченные

повреждения, которые не приводили бы шумозащитный экран к полной непригодности для эксплуатации, а также не ухудшали первоначальные акустические свойства панели.

Конструкция многослойной панели должна исключать эффект вздутости передней и задней крышек как без вертикально приложенных нагрузок на конструкцию каркаса, так и при наличии таких нагрузок (рисунок 5.22).

В панелях шумозащитного экрана должен отсутствовать эффект волнистости по длине и высоте панели (рисунок 5.22, где b – толщина панели, h – высота панели, L – длина панели).



Рисунок 5.22 – Недопустимые формы панелей

Элементы конструкции панели должны быть плотно скреплены друг с другом во избежание возникновения внутренних вибрационных процессов, все резьбовые соединения должны быть застопорены (контрованием, вязкой, пружинными элементами и другими общепринятыми способами).

Панели шумозащитного экрана должны выдерживать статическую распределённую нагрузку ($P_{сопр}$, согласно рисунку 5.20 по линии сопряжения панелей в секции не менее 450 кг/м для лёгких панелей и не менее 2500 кг/м для тяжёлых панелей и не разрушаться. Устанавливать тяжёлые панели на лёгкие в составе шумозащитного экрана не допускается.

Прогиб панелей под собственным весом во всех направлениях не допускается.

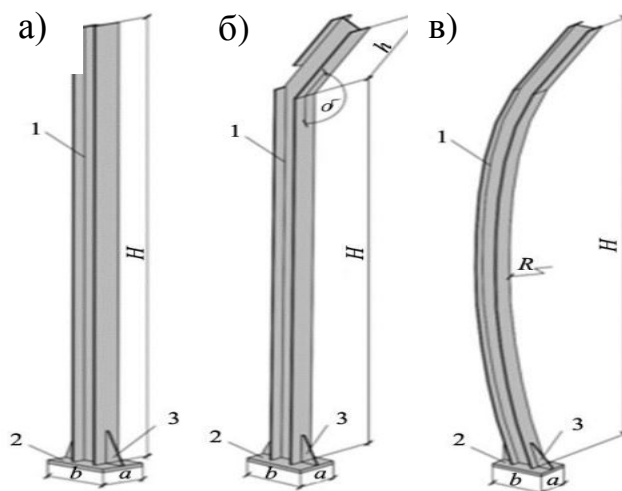
Прогиб панелей под нагрузкой, обусловленный особенностями конструкции экрана:

- в направлении горизонтальных нагрузок (ветровых, аэродинамических) не должен превышать величины $L/200$;
- в направлении вертикальных нагрузок (весовых, снеговых) не должен превышать 3 мм.

5.4.5 Стойки экранов для ВСМ

Исходя из выполненных расчетов и разработанных предложений, выделяются следующие типы стоек:

- по форме поперечного сечения экрана: прямые, прямые с козырьком, парусообразные и др. (рисунок 5.23);
- форме сечения несущего элемента (зависит от способа крепления панели и рекомендаций их производителя): фасонные (двутавр, швеллер и др.), прямоугольные, круглые.



а – прямая стойка; б – прямая стойка с козырьком; в – криволинейная стойка;
 1 – тело стойки; 2 – опорная пластина стойки; 3 – элементы усиления стойки
 Н – высота стойки, h – длина козырька стойки, R – радиус кривизны стойки
 a – ширина опорной пластины, b – длина опорной пластины, δ – угол наклона козырька

Рисунок 5.23 – Классификация по форме поперечного сечения экрана

Несущий каркас задаёт форму экрана в поперечном сечении, форма экрана выбирается исходя из возможных архитектурных решений, технико-экономического обоснования и рекомендаций акустических расчётов, причём предпочтение отдаётся последним (рисунок 5.24).



а)



б)



в)



г)

а – прямая форма; б – форма прямая с козырьком или наклонная;
в – криволинейная форма; г – закрытые и полуоткрытые галереи

Рисунок 5.24 – Примеры форм поперечного сечения экрана

5.5 Выводы по главе

1. Для увеличения акустической долговечности рекомендованы следующие параметры шумозащитных панелей:
 - параметры стенок акустических панелей: для алюминиевых и оцинкованных панелей 1,5 мм, для панелей из импрегнированной древесины толщина задней стенки не менее 18 мм, для композитных панелей 4 мм и для панелей из нержавеющей стали 1 мм соответственно;
 - Для обеспечения защиты панелей из стали требуется горячее цинкование, минимальная толщина слоя – 18 мкм (при толщине применяемого листа от 0,8 мм до 1,5 мм) и 23 мкм (при толщине применяемого листа от 1,5 мм до 3 мм) с последующим нанесением защитно-декоративного лакокрасочного покрытия. Антикоррозионное покрытие наносится на панели в заводских условиях после устройства перфорации или жалюзийных отверстий.
 - при применении панелей в щадящих условиях допускается применение оцинкованных панелей с толщиной листа 0,8мм и выше, алюминиевого листа от 1 мм и выше;
 - для защиты деревянных акустических панелей от влаги, химических реагентов и прочих воздействий, приводящих к преждевременному разрушению, следует обрабатывать деревянные конструкции способом импрегнирования. В местах, где необходимо применение экранов со сроком службы свыше 25 лет автором предлагается использовать панели из щепобетона, к которым разработаны рекомендации по изготовлению.
2. Конструкции панелей должны отвечать следующим требованиям и рекомендациям:
 - в металлической панели должны предусматриваться технологические отверстия в нижней части панели с целью ненакопления воды в теле панели. Детали конструкции шумозащитного экрана должны быть спроектированы таким образом, чтобы исключить возможность скопления влаги, которая способствует гниению или химической коррозии. Крепления из сплавов и

металлов должны быть подобраны должным образом, чтобы избежать разности в электрохимических потенциалах, которая усилит коррозию.

– для преждевременного разрушения звукопоглощающий находящийся внутри многослойной панели, должен быть кэширован или обернут стеклотканью.

-светопрозрачные панели должны обладать стойкостью к абразивной пыли и воздействию ультрафиолетовых лучей;

– допустимый прогиб панелей под собственным весом и/или приложенной ветровой нагрузкой не должен превышать 20 мм.

3. Приняты нагрузки на экран, обуславливающие выбор параметров стоек, фундаментов и креплений экрана, это нагрузка от собственного веса экрана, ветровая нагрузка, дополнительные нагрузки при размещении на конструкции экрана элементов инфраструктуры дороги, дорожных знаков и пр. Разработана методика определения аэродинамических нагрузок на конструкции экрана при высокоскоростном движении совместно с ветровой нагрузкой.
4. Для достижения требуемого звукопоглощения и обеспечения акустической долговечности звукопоглощающий материал в многослойных панелях не должен являться элементом силовой конструкции ШЭ. Средняя плотность применяемого звукопоглощающего материала должна быть от 90 до 120 кг/м³.
5. Разработаны требования к конструкциям экранов на высокоскоростных магистралях с учетом аэродинамических нагрузок и разработана методика испытания панелей.
6. Выполненные автором исследования позволили разработать новые подходы к проектированию шумозащитных экранов, задать жесткие требования к конструкциям экранов и разработать новые технологии экранов обеспечивающие требованиям долговечности, более высокого звукопоглощения, звукоизоляции и эффективности, а также экономической целесообразности.

ГЛАВА 6 АПРОБАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

6.1 Апробация предложенных решений панелей из импрегнированной древесины, щепобетона и панелей для ВСМ

6.1.1 Применение панелей из импрегнированной древесины на практике

С целью проверки предложенных рекомендаций были выполнены измерения при установке ШЭ различного конструктивного исполнения

По рекомендации автора были разработаны проекты установки экранов и смонтированы экраны с шумопоглощающими панелями из импрегнированной древесины на нескольких участках.

В основном рекомендуемые шумозащитные экраны установлены вдоль федеральных автомагистралей.

На объекте РОСАВТОДОРА (автодороге Р-23 «Псков» (км 303), установлен АЭ фирмы ООО «ДорМеталл» с панелями из импрегнированной древесины, представленный на рисунке 6.1.



Рисунок 6.1 – Общий вид АЭ, установленных на автодороге Р-23 «Псков (км 303)

Справа по ходу движения а/д в сторону латвийской границы установлен шумозащитный экран высотой 5 м, протяженностью 620 м на расстоянии 4 м от оси крайней полосы автодороги. Шумозащитная конструкция состоит из 3 рядов панелей: 1 ряд – звукопоглощающая усиленная панель, 2 ряд – светопрозрачная звукоотражающая панель, 3 ряд – звукопоглощающая панель. Между основанием и нижней панелью акустического экрана, а так же между стойками и боковыми частями панелей, расположены металлический несущий профиль и резиновый фартук для перекрытия расстояния между нижней панелью и землей. Расстояние между стойками 3 м.

Основные элементы конструкции: шумозащитные панели, стойки.

В таблице 6.1 указаны уровни шума до и после установки экрана в г. Псков.

Таблица 6.1 – Снижение УЗД и УЗ шумозащитным экраном

Наличие АЭ	Звукоизоляция, дБ, в октавных полосах, со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
До установки	70	67	59	60	66	59	44	40	69
После установки	65	58	47	50	49	47	41	36	54
Норма шума СН 2.2.4/2.1.8.562-96	75	66	59	54	50	47	45	44	55

Установленная шумозащитная конструкция снижает уровень звукового давления на 12–15 дБ в средне-высокочастотных диапазонах и 15 дБА. ШЭ обеспечил снижения шума до требований СН 2.2.4/2.1.8.562-96.

Аналогично указаны примеры снижения шума экранами нового типа на других объектах. Уровни звука на защищаемой территории указаны в таблице 6.2.

Об эффективности разработанных рекомендаций свидетельствуют данные сравнительных испытаний акустической эффективности, приведенных на рисунке 6.2. Проведенные испытания соответствуют утвержденной Управлением автомобильных дорог Российской Федерации методике исследований

эффективности шумозащитных конструкций, а также проведению исследований уровней звука на селитебной территории.

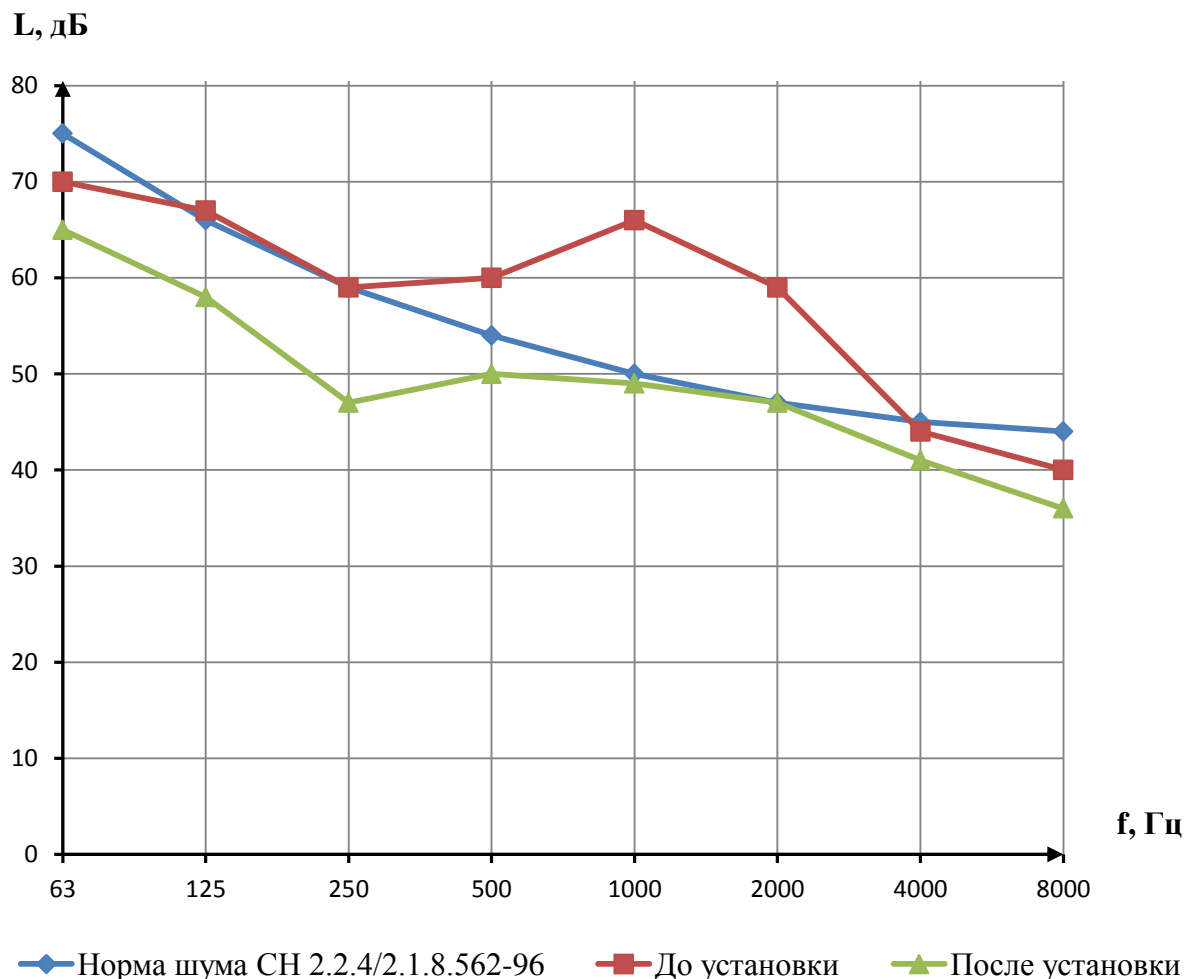


Рисунок 6.2 – Спектры шума до и после установки шумозащитного экрана в сравнении с нормируемыми значениями на автодороге Р-23

На объекте РОСАВТОДОРА (автодороге М-9 «Балтия» (км 615), у деревни Заситино установлен ШЭ фирмы ООО «ДорМеталл» с панелями из импрегнированной древесины. Общий вид данного экрана представлен на рисунке 6.3.

Справа по ходу движения а/д в сторону латвийской границы установлен акустический экран высотой 4 м, протяженностью 750 м на расстоянии 4–10 м от оси крайней полосы автодороги Шумозащитная конструкция состоит из 3 рядов

панелей: 1 ряд – звукопоглощающая усиленная панель, 2 ряд – светопрозрачная звукоотражающая панель, 3 ряд – звукопоглощающая панель. Между основанием и нижней панелью акустического экрана, а так же между стойками и боковыми частями панелей, расположены металлический несущий профиль и резиновый фартук для перекрытия расстояния между нижней панелью и землей. Расстояние между стойками 3 м.



Рисунок 6.3 – Общий вид АЭ, установленных на автодороге М–9 «Балтия» (км 615) дер. Заситино

В таблице 6.2 указаны уровни шума до и после установки экрана в дер. Заситино.

Таблица 6.2 – Снижение УЗД и УЗ шумозащитным экраном

Наличие АЭ	Звукоизоляция, дБ, в октавных полосах, со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
До установки	73	63	63	59	57	54	46	37	62
После установки	63	49	48	48	48	43	33	28	51
Норма шума СН 2.2.4/2.1.8.562-96	75	66	59	54	50	47	45	44	55

Описанная шумозащитная конструкция снижает уровень звукового давления на 8–12 дБ в средне-высокочастотных диапазонах. АЭ обеспечил снижения шума до требований СН 2.2.4/2.1.8.562–96.

Об эффективности разработанных рекомендаций свидетельствуют данные сравнительных испытаний акустической эффективности, приведенных в графике рисунка 6.4. Проведенные испытания соответствуют утвержденной Управлением автомобильных дорог Российской Федерации методике исследований эффективности шумозащитных конструкций, а также проведению исследований уровней звука на селитебной территории.

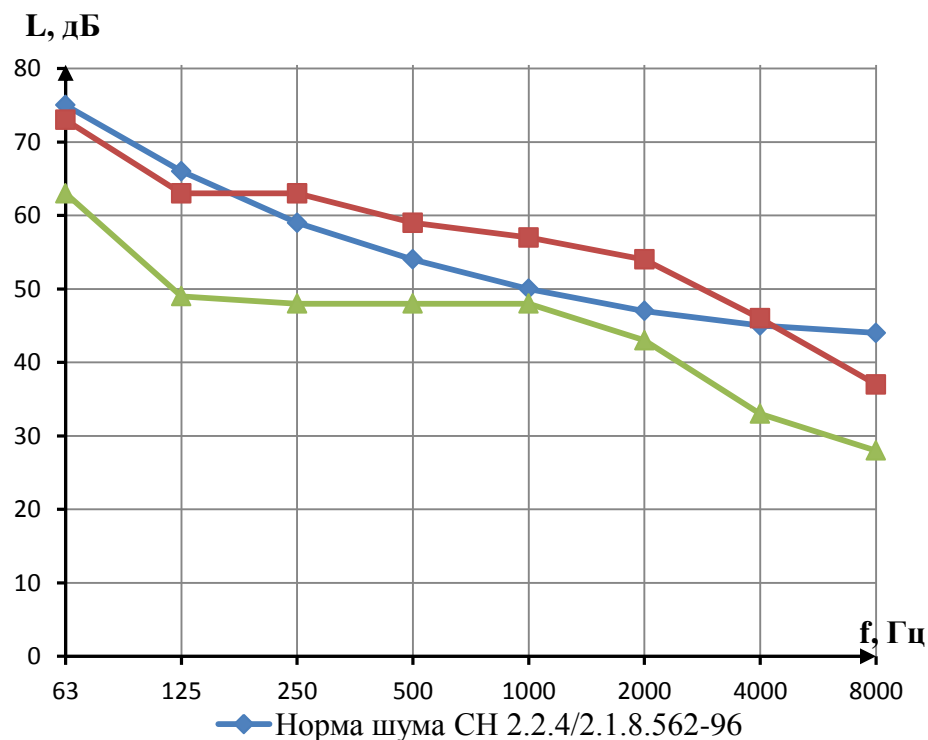


Рисунок 6.4 – Спектры шума до и после установки шумозащитного экрана в сравнении с нормируемыми значениями на автодороге М–9 «Балтия» (км 615) дер. Заситино

Анализ показал, что после установки ШЭ шум снижен до значений, установленных нормативами [35].

На объекте РОСАВТОДОРА (автодороге А–181 «Скандинавия» Санкт-Петербург - граница с Финляндской Республикой на участке обхода г. Выборга км 159+000 - км 159+600, Ленинградская область установлен ШЭ фирмы ООО «ДорМеталл» с панелями из импрегнированной древесины. Общий вид данного экрана представлен на рисунке 6.5.

Справа по ходу движения а/д в сторону финской границы установлен Г-образный акустический экран высотой 2,5 м, протяженностью 702 м на расстоянии 3 м от оси крайней полосы автодороги.



Рисунок 6.5 – Общий вид АЭ, установленных на (автодороге А–181 «Скандинавия» Санкт-Петербург - граница с Финляндской Республикой на участке обхода г. Выборга км 159+000 - км 159+600.

В таблице 6.3 указаны уровни шума до и после установки экрана на обходе г. Выборг.

Таблица 6.3 – Снижение УЗД и УЗ шумозащитным экраном

Наличие АЭ	Звукоизоляция, дБ, в октавных полосах, со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
До установки	63	69	64	60	60	62	58	47	64
После установки	64	56	47	51	50	45	35	29	55
Норма шума СН 2.2.4/2.1.8.562-96	75	66	59	54	50	47	45	44	55

Описанная шумозащитная конструкция снижает уровень звукового давления на 8-10 дБ в средне-высокочастотных диапазонах. АЭ обеспечил снижения шума до требований СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Были установлены следующие уровни шума, показанные в таблице 6.6.

Таблица 6.4 – Уровни шума на крайних границах территории жилой застройки

№ точки измерений	Эквивалентные уровни звука, дБА	Максимальные уровни звука, дБА	Расстояние до края проезжей части исследуемой автодороги, м
1	53	61	61
2	55	61	39
3	54	63	50
Норма шума СН 2.2.4/2.1.8.562-96	55	70	-

Об эффективности разработанных рекомендаций свидетельствуют данные сравнительных испытаний акустической эффективности, приведенных на рисунке 6.6. Проведенные испытания соответствуют утвержденной Управлением автомобильных дорог Российской Федерации методике исследований

эффективности шумозащитных конструкций, а также проведению исследований уровней звука на селитебной территории.

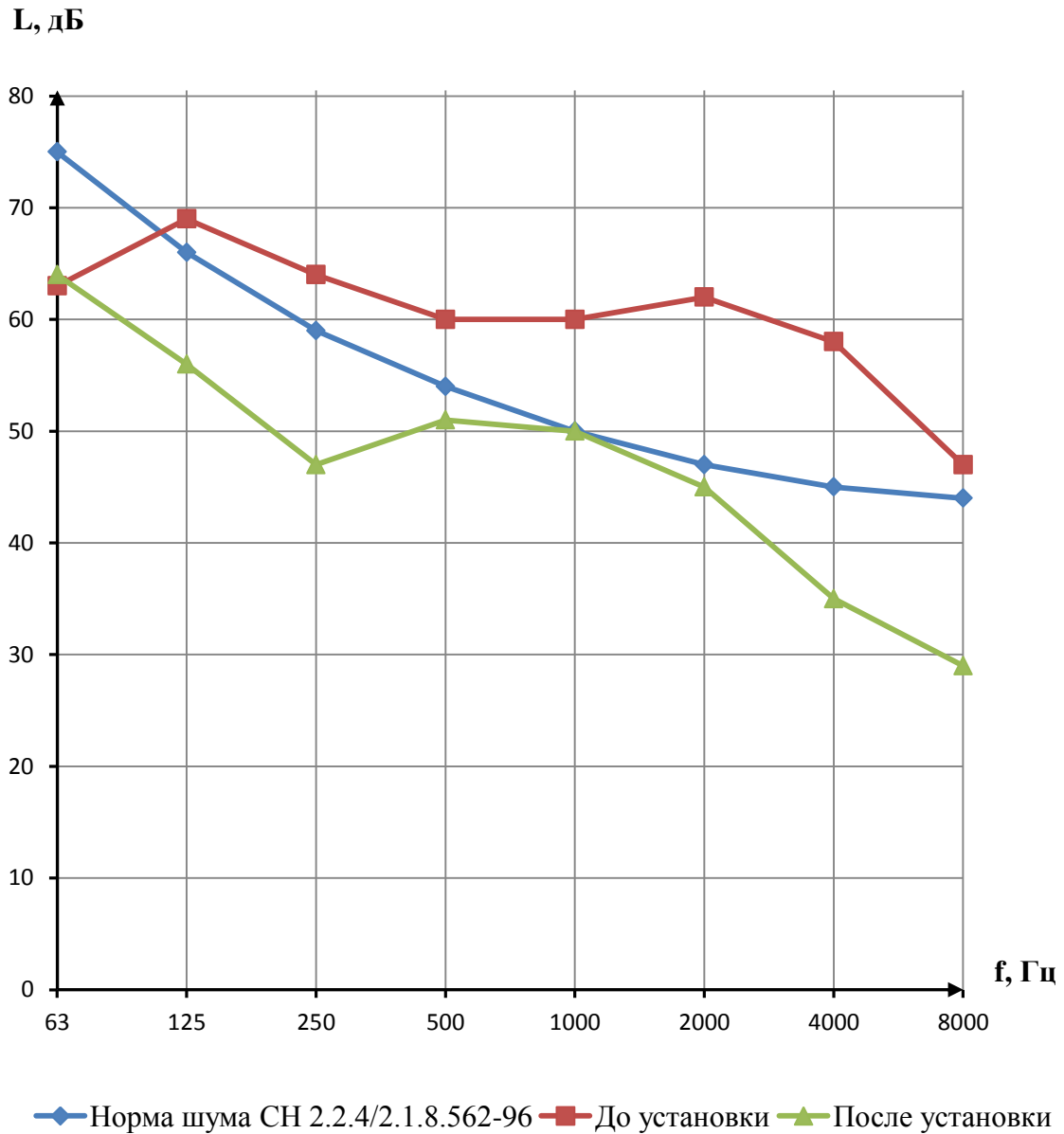


Рисунок 6.6 – Спектры шума до и после установки шумозащитного экрана в сравнении с нормируемыми значениями на автодороге А–181 «Скандинавия»

На участке строительства трансформаторной подстанции, Московская обл., Сергиево-Посадский р-н, деревня Лазарево установлен технологический шумозащитный экран фирмы ООО «ДорМеталл» с панелями из импрегнированной древесины. Общий вид данного экрана представлен на рисунке 6.6.

Три трансформатора огорожены шумозащитным экраном высотой 6 м. Расстояние до источника шума от 4 до 6 м. В таблице 6.5 указаны уровни шума до и после установки экрана на подстанции.

Описанная шумозащитная конструкция снижает уровень звукового давления на 4–19 дБ в средне-высокочастотных диапазонах. ШЭ обеспечил снижения шума до требований СН 2.2.4/2.1.8.562–96.



Рисунок 6.7 – Общий вид ШЭ, установленных на подстанции

Таблица 6.5 – Снижение УЗД и УЗ шумозащитным экраном

Наличие АЭ	Звукоизоляция, дБ, в октавных полосах, со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
До установки	68	64	56	49	49	51	47	36	53
После установки	64	56	48	38	37	32	23	17	41
Норма шума СН 2.2.4/2.1.8.562-96	65	56	49	44	40	37	35	34	45

Об эффективности разработанных рекомендаций свидетельствуют данные сравнительных испытаний акустической эффективности, приведенных на рисунке 6.8.

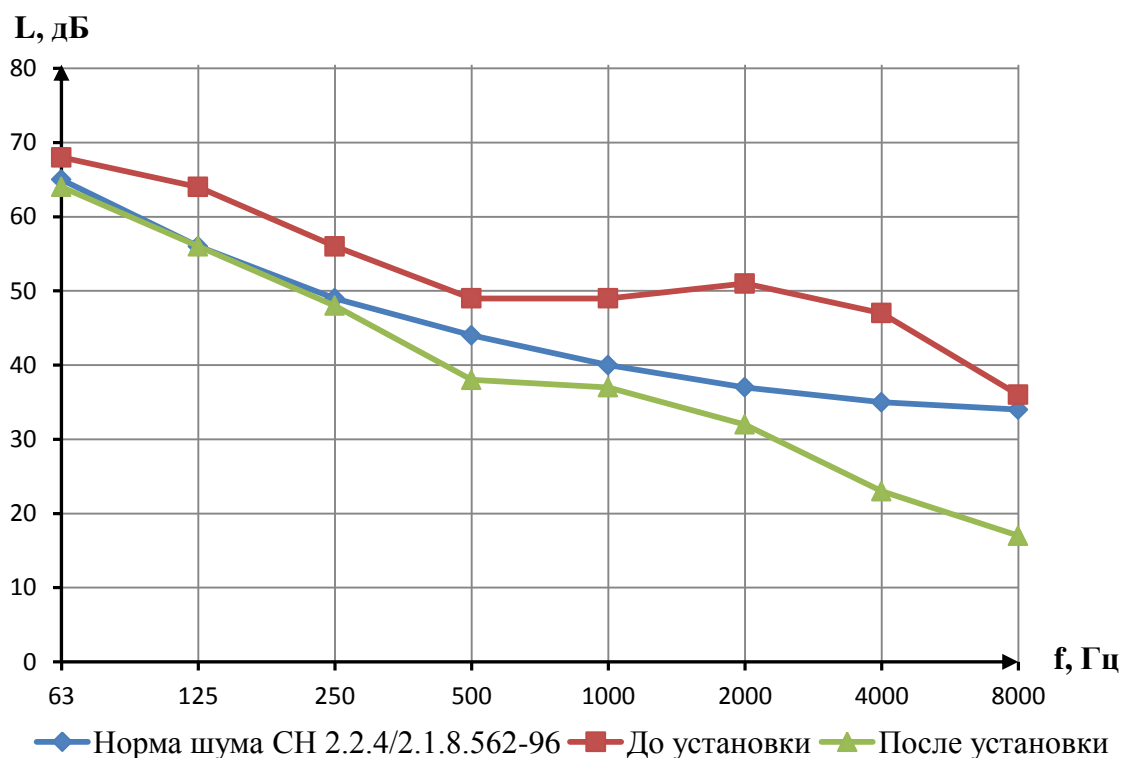


Рисунок 6.8 – Спектры шума до и после установки шумозащитного экрана в сравнении с нормируемыми значениями, установленного у трансформаторной подстанции

6.1.2 Применение панелей из щепобетона на практике

Шумозащитные экраны с панелями из щепобетона (ООО «Форт») активно устанавливаются на объектах автомобильных и железных дорог в виду их высокой долговечности и эффективности.

На Октябрьской железной дороге в пос. Дибуны с участием автора спроектирован и установлен шумозащитный экран с панелями из щепобетона. Общий вид ШЭ установленного на ст. Дибуны Октябрьской железной дороги представлен на рисунке 6.9.

В таблице 6.6 указаны уровни шума до и после установки экрана на ст. Дибуны.



Рисунок 6.9 – Общий вид ШЭ установленного на ст. Дибуны Октябрьской железной дороги

Таблица 6.6 – Уровни шума до и после установки экрана

Наличие АЭ	Звукоизоляция, дБ, в октавных полосах, со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
До установки	69	66	58	59	65	58	43	39	62
После установки	62	56	45	48	47	45	39	35	52
Норма шума СН 2.2.4/2.1.8.562-96	75	66	59	54	50	47	45	44	55

Описанная шумозащитная конструкция снижает уровень звукового давления на 8-10 дБ в средне-высокочастотных диапазонах. АЭ обеспечил снижения шума до требований СН 2.2.4/2.1.8.562-96.

На крайних границах территории жилой застройки были установлены следующие уровни шума, указанные в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Уровни шума на крайних границах территории жилой застройки

№ точки измерений	Эквивалентные уровни звука, дБА	Максимальные уровни звука, дБА	Расстояние до края проезжей части исследуемой автодороги, м
1	53	68	32
2	52	66	38
3	52	66	38
Норма шума СН 2.2.4/2.1.8.562-96	55	70	-

Об эффективности разработанных рекомендаций свидетельствуют данные сравнительных испытаний акустической эффективности, приведенных на рисунке 6.10.

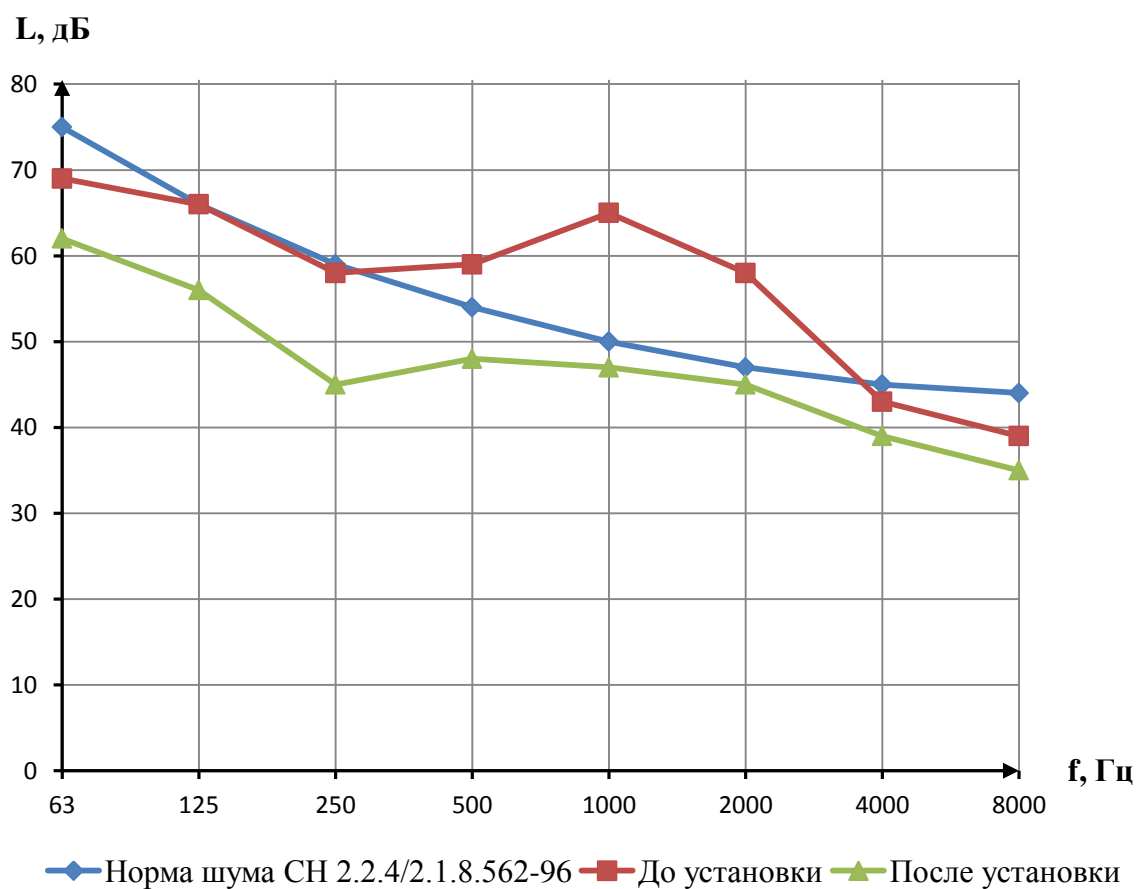


Рисунок 6.10 – Спектры шума до и после установки шумозащитного экрана фирмы «Форт» в сравнении с нормируемыми значениями, установленного вдоль железной дороги

6.1.3 Применение шумозащитных экранов на ВСМ

По разработанной автором методике спроектированы шумозащитные конструкции на высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань. Предложены к установке шумозащитные экраны, обеспечивающие высоким требованиям шумозащитных конструкций для ВСМ согласно рисунку 6.11.

Всего на участке спроектировано свыше 300 км шумозащитных экранов высотой от 3 до 6 м. Эффективность экранов достигает от 6 до 18 дБА на разных участках. Спроектированные конструкции позволят достигнуть нормативных значений по шуму на всем протяжении трассы, а предложенные по разработкам автора конструкции обеспечат высокую акустическую долговечность.



Рисунок 6.11 – Пример проектирования ШЭ на ВСМ

Для примера, на участке Владимирской области предложена установка на следующих пикетах трассы, отображенных в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Участки Владимирской области для установки ШЭ

Начало	Конец	Объект защиты
95+000 ПК	102+000 ПК	ДОЛ «Луч», СТ Дружба, СТ Эхо, СТ Междуречье, Молодино, СТ Колос, Репихово
112+500 ПК	114+700 ПК	ДНТ «Омутищи», КП Покровские дачи
116+100 ПК	117+900 ПК	Старое Аннино
123+400 ПК	124+700 ПК	Березка
140+400 ПК	142+700 ПК	Пески
144+200 ПК	146+000 ПК	Филатьево
153+400 ПК	157+500 ПК	Вишняково, СТ Михаловское, Уварово
160+600 ПК	162+600 ПК	Дубровка
166+000 ПК	169+000 ПК	ДОЛ «Тонус», Юрино
170+100 ПК	170+400 ПК	Батюшково
181+000 ПК	185+800 ПК	Филиппуши, Загорье
187+600 ПК	193+000 ПК	КП Милино, Содышка, Садовый
196+500 ПК	201+200 ПК	Ославское, Новое, Добрынское
216+000 ПК	223+500 ПК	Дворики, Леонтьево, Гаврильцево, Пенкино
233+000 ПК	237+000 ПК	Дроздовка, Дмитриево
241+200 ПК	243+100 ПК	Пестово
244+600 ПК	246+400 ПК	Спорткомплекс
265+600 ПК	268+400 ПК	Плохово, Серково
277+500 ПК	279+900 ПК	Поздняково
298+300 ПК	300+500 ПК	Воробьевка
309+300 ПК	311+500 ПК	Григорово
315+400 ПК	317+400 ПК	Колесниково
323+100 ПК	324+400 ПК	Гаврильцево
330+000 ПК	332+100 ПК	Совхоз "Гороховецкий"
333+600 ПК	336+100 ПК	Морозовка
338+400 ПК	340+300 ПК	Кондюрино

6.2 Техничко-экономический эффект от внедрения

Оценка эффективности приведена в таблице 6.9 согласно «Методическим подходам при оценке эффективности внедрения новых технологий».

Таблица 6.9 – Оценка эффективности внедрения новых технологий

Эффект работы	Эффектообразующие факторы
1. Положительные эффекты	
Экономия инвестиционных затрат	Увеличение срока службы шумозащитного экрана до 25 лет
Экономия эксплуатационных расходов	Сокращение трудозатрат (монтаж, демонтаж конструкции шумозащитного экрана)
2. Отрицательные эффекты	
Увеличение расхода на конструкцию шумозащитного экрана со сроком эксплуатации не менее 25 лет	Переход на новую конструкцию шумозащитного экрана со сроком службы не менее 25 лет

Установка экранов из импрегнированной древесины или щепобетона является экономичным вариантом применения при высоких акустических характеристиках. Автором проработаны варианты и предложены разработки по изменению конструкций металлических панелей для увеличения их акустической долговечности. Применение предложенных рекомендаций на практике приведет к появлению более жестких требований к различным конструкциям экранов, что является необходимым в виду недобросовестного исполнения шумозащитных конструкций поставщиками, низким качеством шумозащитных экранов из-за существенного роста числа производителей. Расчет эффективности экранов по уточненной методике позволит выбрать оптимальные геометрические

характеристики экранов, что позволит добиться нормативных значений уровней шума на защищаемых объектах с обоснованными проектными решениями.

Для обоснования эффективности принимаемых решений выбран вариант применения различных шумозащитных конструкций на Российских железных дорогах.

Срок службы экранов из оцинкованной стали, которые сегодня применяют на РЖД составляет 7–8 лет. При введении более жестких требований к шумозащитным экранам, которые рекомендует автор, гарантийный срок составит 15 лет, а срок службы до 25 лет, что более чем в 3 раза выше, чем в настоящее время.

Стоимость шумозащитных панелей принята по базовым ценам сборника ОЕРЖ–2001 ОАО РЖД на 3 кв. 2017 г.:

– Панель звукоизолирующая шумозащитная из оцинкованной стали, окрашенная полиэфирной порошковой краской, с глухой или перфорированной фасадной крышкой (ОССЦЖ 2000 ОАО РЖД ОЕРЖ-2001 244) = 1251,74 руб. (в базовых ценах), в текущих: $1251,74 * 1,18 * 8,24 = 12\,170,91$ руб. за 1 м^2 .

– Панель звукоизолирующая шумозащитная из алюминия, окрашенная полиэфирной порошковой краской, с глухой фасадной крышкой (ОССЦЖ 2000 ОАО РЖД ОЕРЖ–2001 244) – сметная цена в 2001 г. – 1525,74 руб., согласно Письму Минстроя России № 35948–ХМ/09 от 05.10.2017 индекс к ОСНБЖ–2001 для Москвы составляет 8,24, в текущих: $1525,74 * 1,18 * 8,24 = 14\,835,07$ руб. за 1 м^2 .

Для представления экономического эффекта от применения рекомендаций автора выполнен расчет для шумозащитных панелей из оцинкованной стали и алюминия протяженностью 100 км и высотой 3 м. Рассматриваемый временной период – 25 и 30 лет соответственно.

Стоимость 100 км шумозащитных панелей из оцинкованной стали высотой 3 м на 3 кв. 2017 г. по базовым ценам сборника ОЕРЖ–2001 ОАО «РЖД» составит: $12170,91 \text{ руб} \times 100\,000 \text{ м} \times 3 \text{ м} = 3,65 \text{ млрд. руб.}$

Стоимость 100 км шумозащитных панелей из алюминия высотой 3 м на 3 кв. 2017 г. по базовым ценам сборника ОЕРЖ–2001 ОАО «РЖД» составит: $14\,835,07 \text{ руб} \times 100\,000 \text{ м} \times 3 \text{ м} = 4,45 \text{ млрд. руб.}$

Следует отметить, что стоимость шумозащитных панелей, устанавливаемых ОАО «РЖД» выше среднерыночной цены более чем в 2 раза. Так, среднерыночная стоимость шумозащитных панелей из оцинкованной стали составляет 4500 руб. за 1 м^2 , а шумозащитных панелей из алюминия – 5000 руб. за 1 м^2 .

При возможном увеличении себестоимости шумозащитных панелей из оцинкованной стали (на 30 %) и алюминия (на 10%) среднерыночная стоимость составит:

– шумозащитных экранов из оцинкованной стали – $4500 \text{ руб.} \times 130 \% = 5850 \text{ руб.}$ за 1 м^2 ;

– шумозащитных экранов из алюминия – $5000 \text{ руб.} \times 110 \% = 5500 \text{ руб.}$ за 1 м^2 .

Сравнивая цифры увеличенной себестоимости шумозащитных панелей и стоимость панелей, устанавливаемых ОАО «РЖД» видно, что среднерыночная стоимость шумозащитных панелей по-прежнему будет значительно ниже (более чем в 2 раза), что исключит дополнительные расходы ОАО «РЖД» на установку экранов, но увеличит срок их службы с 7–8 лет для оцинкованной стали до 25 лет, и с 10 лет для алюминия до 15 лет.

Расчет экономии эксплуатационных расходов работы дан в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Экономия эксплуатационных расходов работы

Наименование ресурса	Расход ресурса «без проекта» (ед. изм.)	Расход ресурса «с проектом рекомендаций» (ед. изм.)	Экономия ресурса (ед. изм.) (графа 4 - графа 3)	Цена (тариф) ресурса (руб.)	Экономия эксплуатационных расходов (руб.) (графа 5*графа 6)
1	2	3	4	5	6
По базовым ценам РЖД на 1 кв. 2018 г. (согласно сборнику ОЕРЖ-2001 ОАО РЖД)					
Шумозащитные панели из оцинкованной стали протяженностью 100 км и высотой 3 м	За 25 лет при сроке службы 7-8 лет: 900 000 м ² (ШЭ 300 000 м высотой 3 м)	За 25 лет при сроке службы 25 лет: 300 000 м ² (ШЭ 100 000 м высотой 3 м)	600 000 м ²	12 436,78 руб. (за 1 м ²)	7,46 млрд. руб. за 25 лет (298,48 млн. в год)
Шумозащитные панели из алюминия протяженностью 100 км и высотой 3 м	За 30 лет при сроке службы 10 лет: 900 000 м ² (ШЭ 300 000 м высотой 3 м)	За 30 лет при сроке службы 15 лет: 600 000 м ² (ШЭ 200 000 м высотой 3 м)	300 000 м ²	15 159,14 руб. (за 1 м ²)	4,55 млрд. руб. за 30 лет (151,59 млн. в год)

Таким образом, по данным таблицы 2 на каждые 100 км экранов высотой 3 м, установленных на железных дорогах России, при применении рекомендаций автора экономический эффект составит 7,46 млрд. руб. для панелей из оцинкованной стали за 25 лет (298,48 млн. в год) и 4,55 млрд. руб. для панелей из алюминия за 30 лет (151,59 млн. в год).

При этом следует отметить, что при относительном повышении себестоимости шумозащитных панелей на 10–30%, их среднерыночная стоимость будет более чем в 2 раза ниже стоимости панелей, устанавливаемых в настоящее время ОАО «РЖД».

6.3 Масштабы внедрения результатов исследований

Основные результаты работы были учтены при разработке новых конструкций ШЭ ООО «ДорМеталл», ООО «Форт» и компании «Теколит». По рекомендациям автора были установлены ШЭ свыше, чем на 30 объектах.

При разработке новых проектов (Высокоскоростная железнодорожная магистраль Москва–Казань, ЦКАД г. Москвы, Западно-скоростной диаметр г. Санкт-Петербург) были учтены рекомендации автора по проектированию и по применению конструкций и материалов экрана.

Таблица 6.11 – Установка ШЭ по рекомендациям автора

№ п/п	Наименование изолируемого объекта	Тип экрана	Местность, город
1	Западно-скоростной диаметр г.Санкт-Петербург	Металлический экран с прозрачными вставками	г. Санкт-Петербург
2	Железнодорожный подъезд к станции Бронка	Металлический экран	г. Санкт-Петербург
3	«Чилер»	Алюминиевый экран	г. Санкт-Петербург, Московский п-т 156
4	«Чилер»	Алюминиевый экран	г. Санкт-Петербург, Долгоозерная 14 к.2
5	Подъезд к аэропорту г.Нижний Новгород	Металлический экран	г. Нижний Новгород, шоссе Авиаторов
6	Подъезд к аэропорту г.Волгоград	Металлический экран	г. Волгоград, шоссе Авиаторов
7	«Чилер»	Экран из импрегнированной древесины	г. Хабаровск
8	«Чилер»	Алюминиевый экран	г. Норильск
9	Автомобильная дорога	Экран из импрегнированной древесины	ст. Динская Краснодарский край
10	Автомобильная дорога	Экран из импрегнированной древесины	г.Псков, Ленинградское шоссе
11	Автомобильная дорога	Экран из импрегнированной древесины	дер. Заситино Псковской области
12	Автомобильная дорога	Экран из импрегнированной древесины	дер. Бурачки Псковской области

Продолжение таблицы 6.11

№ п/п	Наименование изолируемого объекта	Тип экрана	Местность, город
13	Автомобильная дорога	Экран из импрегнированной древесины	МАПП Лобок Псковской области
14	Автомобильная дорога	Экран из импрегнированной древесины	Обход г.Выборг
15	Трансформаторная подстанция	Экран из импрегнированной древесины	г. Санкт-Петербург, ул. Ольги Берггольц д. 34
16	Трансформаторная подстанция	Экран из импрегнированной древесины	г. Санкт-Петербург, ул. Бородинская д.3
17	Октябрьская ж.д.	Экран из щепобетона	Пос. Дибуны Ленинградской обл.
18	Московская ж.д.	Экран из щепобетона	Московская обл.
19	Детский садик	Экран из щепобетона	г. Санкт-Петербург, Канонерский остров
20	Трансформаторная подстанция	Экран из щепобетона	Московская область
21	Детский садик	Металлический экран с прозрачными вставками	г. Санкт-Петербург, Канонерский остров
22	Детский садик	Металлический экран с прозрачными вставками	г. Санкт-Петербург, пр-т Обуховской Обороны 110 к.1
23	ГРС Кингисеппское	Металлический экран	г. Кингисепп Ленинградской области
24	Детский садик	Металлический экран с прозрачными вставками	г. Санкт-Петербург, пр-т Обуховской Обороны 110 к.1
25	Детский садик	Металлический экран с прозрачными вставками	г. Санкт-Петербург, ул. Михаила Дудина 23 к.2
26	Детский садик	Металлический экран с прозрачными вставками	г. Санкт-Петербург, пос. Новое Девяткино
27	Автомобильная дорога	Экран из алюминиевых панелей	Трасса М4 Ростовская обл.
28	Железная дорога	Экран из алюминиевых панелей	пос. Одинцово Московской области
29	Трансформаторная подстанция	Экран из импрегнированной древесины	г. Сергиев Посад, Московская область
30	Чиллер	Экран из алюминиевых панелей	г.Мытищи Московской области
31	Чиллер	Экран из алюминиевых панелей	пос. Золотухино Курской области
32	Градирни	Экран из алюминиевых панелей	г.Светлый Калининградской области
33	Трансформаторная подстанция	Металлический экран с прозрачными вставками	г.Курган

Основные результаты исследований учтены при разработке следующих документов:

– СТО АВТОДОР 2.9–2014 Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации акустических экранов на автомобильных дорогах государственной компании «Автодор»;

– Специальные технические условия Шумозащитные мероприятия для участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству (редакции 2014 г., 2016 г.)

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

– СП 254.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от производственного шума».

– СП «Защита от шума для высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства»;

– ГОСТ 33325 «Шум. Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом» в новой редакции.

– СТО 05362653–01–2017 Панель шумопоглощающая из импрегнированного дерева (ПШД);

– Технические условия 5741-001-26265888-2016 ПАНЕЛИ ЗП и ЗИ из Теколита (Tecolit);

– Технические условия 5741-001-80560517-2011 «Панели звукопоглощающие и звукоизолирующие из Дюрисола», ООО «Форт».;

В результате исследований автором оформлены патенты на полезную модель. Список патентов отражен в таблице 6.12. Патенты приведены в приложении В

Таблица 6.12 – Список полученных патентов

№	Наименование	Номер	Дата начала отсчета срока действия патента
1	Секция малого шумозащитного устройства рельсового пути	147879	17 октября 2014г.
2	Строительная шумозащитная панель	147880	17 октября 2014г.

Продолжение таблицы 6.12

№	Наименование	Номер	Дата начала отсчета срока действия патента
3	Устройства для защиты от шума	104943	27 мая 2011г.
4	Строительная шумозащитная панель	105311	10 июня 2011г.
5	Панель резонатор	172673	05 апреля 2016 г.
6	Звукопоглощающая панель для шумозащитной конструкции	171794	20 октября 2016 г.
7	Дифрагирующая панель для шумозащитного экрана	168981	05 апреля 2016г.

Выводы по главе:

- 1 Предложенные автором технические решения и технологии прошли апробацию при проектировании, изготовлении и монтаже ШЭ из импрегнированной древесины, щепобетона, алюминия. Акустическая эффективность новых экранов достигает 10-18дБА. Все ШЭ снижают шум в жилой застройке до требований санитарных норм.
- 2 Рассмотрен экономический эффект от внедрения новых технологий и материалов для применения в шумозащитных экранов. Согласно представленным расчетам экономический эффект на каждые 100 км экранов высотой 3 м, установленных на железных дорогах России, при применении рекомендаций автора составит 7,46 млрд. руб. для панелей из оцинкованной стали за 25 лет (298,48 млн. в год) и 4,55 млрд. руб. для панелей из алюминия за 30 лет (151,59 млн. в год).
- 3 По рекомендациям автора были установлены ШЭ свыше, чем на 30 объектах, на которых удалось снизить шум до нормируемых значений.
- 4 Рекомендации автора учтены при проектировании первой в России ВСМ, где будут установлено свыше 300км шумозащитных экранов в соответствии с требованиями, изложенными в диссертации.
- 5 Основные результаты исследований учтены при разработке 10 НТД (СТО, ГОСТ, СТУ, СП и др.).
- 6 Новизна и оригинальность предложенных основных технических решений подтверждена 7 патентами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана актуальность проблемы акустического загрязнения городов, основные вклады в которое вносят автомобильный, железнодорожный транспорт и промышленные предприятия. На приведенном расстоянии 100 м значения составили:
 - автомобильные дороги: эквивалентные уровни звука 63–75 дБА, максимальные 56–75 дБА, превышения эквивалентных УЗ на 8-20 дБА;
 - железные дороги: эквивалентные уровни звука 64–69 дБА, превышения 9–14 дБА, максимальные 78–81 дБА, превышения 8–11 дБА;
 - промышленные предприятия: эквивалентные УЗ в жилой застройке 64–69 дБА, а превышения на расстоянии 100 метров составляют 13-19 дБА.
2. Установлено, что средняя акустическая эффективность шумозащитных экранов на автодорогах составляет 5–12 дБА, на железных дорогах 8–14 дБА. Более 80% обследованных шумозащитных экранов не выполняют свои функции, отмечено превышение эквивалентных уровней звука у защищаемых от шума зданий от 1 до 14 дБА. Причинами недостаточной эффективности шумозащитных экранов являются: ошибки при проектировании (в 38% случаев неправильно выбрана высота экрана, а в 85% случаев длина, неправильно выбирается шаг стоек и другое), что обусловлено недостатками в существующей НТД, недостаточной изученностью акустических процессов и акустических свойств экранов (исследованиями доказано, что в 68% звукоизоляция экранов не превышает 15–18 дБА, что почти вдвое меньше заявляемых изготовителями значений, а коэффициент звукопоглощения не превышает на отдельных частотах 0,5–0,7 при заявленных изготовителями значений равных 1); применением устаревших малоэффективных технологий, не обеспечивающих акустическую долговечность экранов (80% ШЭ для автодорог

изготавливаются из оцинкованной стали, что ведёт к их разрушению через 5–7 лет вместо предписанного срока службы 15 лет).

3. Предложена уточнённая теория шумозащитных экранов, основным положением которой является допущение об образовании квазидиффузного звукового поля с множеством отражений в условном объёме, образованном источниками шума, экраном и опорной поверхностью (по признаку изотропности) и допущение о дивергенции звука по высоте экрана, введено понятие эффективной высоты экрана. Акустические свойства условного объёма определяется средним коэффициентом звукопоглощения. Свободное ребро экрана рассматривается как вторичный линейный излучатель звука, а источники звука как линейные излучатели цилиндрических звуковых волн (транспортные экраны) и точечные источники сферических звуковых волн (технологические экраны). Используется понятие показателя дифракции. Интерферентные явления не учитываются.
4. Предложено 10 расчётных схем, в том числе 7 для транспортных шумозащитных экранов, 2 для технологических и одна обобщенная. Получены математические модели для рассматриваемых расчётных схем, теоретический анализ которых показал следующее:
 - эффективность шумозащитных экранов определяется акустическими и геометрическими свойствами условного объёма, эффективной высотой экрана, величиной дифракции звука через свободное ребро, степенью приближения звукового поля к диффузному;
 - влияние геометрических параметров объема изменяется в пределах от 3 до 10 дБА, влияние эффективной высоты составляет от 7 до 12 дБА, коэффициент диффузности и средний коэффициент звукопоглощения объёма от 1 до 4 дБА.
 - Г-образная надстройка на свободном ребре обеспечивает дополнительно от 0,5 до 2 дБА, Т-образная от 2–3 дБА до 7–8 дБА, антидифрактор до 2–3 дБА;

- при установке экрана на эстакаде, за счёт существенного увеличения эффективной высоты экрана, эффективность шумозащитного экрана возрастает от 10 до 20 дБА по сравнению расположения экрана вне эстакады;
 - при расположении экрана в составе акустически необработанной галереи эффективность его не превышает 2–6 дБА;
 - появление в конструкции экрана щели может снизить его эффективность на 5–6 дБА в зависимости от высоты щели.
5. Разработаны опытные стенды для испытаний транспортных и технологических экранов, а также методики проведения акустических испытаний на стендах и в натурных условиях, включающие:
- исследования зависимости акустической эффективности шумозащитных экранов от высоты экрана, расположения точки измерений (по расстоянию от экрана и высоте), наличия и отсутствия ЗПМ, наличия надстроек на свободном ребре и других конструктивных особенностей;
 - проверку основных допущений теории о характере звукового поля в условном объёме перед экраном;
 - измерения показателя дифракции, звукоизоляции и звукопоглощения экрана.
6. Измерения характера звуковых полей экранов, проведённые в натурных условиях, подтвердили корректность основных допущений теории о квазидиффузном характере звуковых полей в условном объёме: отклонение измеренных УЗД в нижней части экрана в продольном и поперечном направлениях не превышают ± 2 дБ, а УЗ ± 2 дБА. Измерения характера звукового поля на высоте экрана от 1,5 до 4 м показало уменьшение УЗД от 2 до 6 дБ в нормируемом частотном диапазоне, а УЗ от 3 до 5 дБА, то есть приближенное снижение УЗ см на каждый 1 м высоты 1–1,5 дБА.
7. Выполнены измерения показателя дифракции (ПД) в натурных условиях и на стендах, показатель дифракции имеет частотно-зависимый характер,

увеличиваясь приблизительно на 1,5 дБ на октаву от 4 (63Гц) до 14(8000Гц) дБ, интегральное значение ПД=12 дБА.

8. Экспериментально исследованы факторы, влияющие на акустическую эффективность шумозащитных экранов, результаты исследования показали:
 - при изменении высоты экранов в диапазоне от 1 до 6 м эффективность экранов возрастает на 9–13 дБ (по спектру) и на 10 дБА, при удвоении высоты экрана увеличения по спектру на 2–6 дБ (3–5 дБА), подтверждён нелинейный характер зависимости эффективности экрана от высоты;
 - с увеличением расстояния от экрана его эффективность снижается приблизительно на 1–1,5 дБА при каждом его удвоении, при увеличении высоты точки измерений с 1,5 до 7 м снижение эффективности за счёт уменьшения угла дифракции составило 4 дБА;
 - применение отражающих панелей в составе экрана взамен отражающе-поглощающих снижает его эффективность в зависимости от эквивалентной площади звукопоглощения (при высоте экрана 2 м на 1–3 дБ по спектру (2 дБА), а при высоте 6 м на 3–5 дБ по спектру (5 дБА).
9. Исследования звукоизолирующих свойств экранов показало, что на опытных стендах и в натурных условиях их звукоизоляция заметно (от 3 до 8 дБА) ниже, чем звукоизоляция акустических панелей, измеренных в акустических камерах. При сравнении звукоизоляции с измеренными значениями акустической эффективности выявлено, что для экранов из различных материалов экранов эта связь различна. Для экранов из импрегнированной древесины звукоизоляция выше, чем акустическая эффективность на 5–8 дБ по спектру (разница 6 дБА), что позволяет утверждать, что звукоизоляция этих экранов достаточна. Для металлических экранов разница составила 1–7 дБ (5 дБА), т.е. звукоизоляция сказывается на эффективности экрана, снижая её на отдельных частотах на 2–3 дБ (на 1,5 дБА).
10. Дано обоснование применения новых технологий изготовления ШЭ из импрегнированной древесины и щепобетона, обладающих высокой

акустической долговечностью и более высокими акустическими качествами, чем применяемые на практике.

11. Выполненные автором исследования позволили разработать новые подходы проектирования шумозащитных экранов, задать жесткие требования к конструкциям экранов и разработать новые технологии экранов обеспечивающие требованиям долговечности, эффективности и экономической целесообразности, в том числе:
 - приняты нагрузки на экран для ВСМ, обуславливающие выбор параметров стоек, фундаментов и креплений экрана.
 - разработаны требования к характеристикам панелей из щепобетона, деревянных экранов, металлических экранов и пр.
 - разработана методика определения аэродинамических нагрузок на конструкции экрана при высокоскоростном движении совместно с ветровой нагрузкой.
 - разработаны требования к конструкциям экранов на высокоскоростных магистралях с учетом аэродинамических нагрузок и разработана методика испытания панелей.
12. Предложенные автором технические решения и технологии прошли апробацию при проектировании, изготовлении и монтаже ШЭ из импрегнированной древесины, щепобетона, алюминия. Акустическая эффективность новых экранов достигает 10-18дБА. Все ШЭ снижают шум в жилой застройке до требований санитарных норм.
13. Рассчитан технико-экономический эффект от внедрения новых технологий и материалов для применения в шумозащитных экранах, составивший на каждые 100 км экранов высотой 3 м, установленных на железных дорогах России, 7,46 млрд. руб. для панелей из оцинкованной стали за 25 лет (298,48 млн. в год) и 4,55 млрд. руб. для панелей из алюминия за 30 лет (151,59 млн. в год).
14. Результаты диссертации внедрены как в проектной документации на ВСМ, так и при сооружении ШЭ, в том числе, по рекомендациям автора были

установлены ШЭ свыше, чем на 30 объектах, на которых снижен шум до нормируемых значений.

15. Основные результаты исследований учтены при разработке 10 нормативно-технических документов.
16. Новизна и оригинальность предложенных основных технических решений подтверждена 7 патентами.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

а/д – автомобильная дорога (автомобильные дороги).

АЭ – акустические экраны.

БГТУ «Военмех» – Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова.

ж.д. – железная дорога.

ЗИ – звукоизоляция.

ЗП – звукопоглощение.

ЗПМ – звукопоглощающий материал.

ИСО – Международная организация по стандартизации.

ИШ – источник шума.

КАД – кольцевая дорога вокруг Санкт-Петербурга.

МАДИ – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет.

МГЭ – метод граничных элементов.

МКЭ – метод конечных элементов.

НИИСФ – Научно-исследовательский институт строительной физики.

НТД – нормативно технические документы.

ООПТ – особо охраняемые природные территории.

ПШД – панель шумопоглощающая, деревянная.

РТ – расчетная точка

СН – санитарные нормы.

СП – свод правил.

СТУ – специальные технические условия.

ТУ – технические условия.

УЗ – уровни звука.

УЗД – уровни звукового давления.

ФКУ – Федеральное казенное учреждение.

ШЭ – шумозащитный экран.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 О состоянии и об охране окружающей среды в Российской Федерации в 2016 г: Государственный доклад. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2017. – 760 с.
- 2 Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Г. Л. Осипова, Е. Я. Юдина. – М: изд-во Стройиздат, 1987. – 558 с.
- 3 Осипов, Г. Л. Защита зданий от шума / Г. Л. Осипов. – М: изд-во Стройиздат, 1972. – 216 с.
- 4 Тупов, В. Б. Снижение шума от энергетического оборудования: учебное пособие для вузов по направлению «Теплоэнергетика» / В. Б. Тупов. – М.: Изд-во МЭИ, 2005 . – 232 с.
- 5 Градостроительные меры борьбы с шумом / Г. Л. Осипов, Б. Г Прутков, И. А. Шишкин, И. Л. Карагодина. – Москва: изд-во Стройиздат. 1975. – 215 с.
- 6 Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н. И. Иванов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: изд-во Логос, 2015. – 432 с.
- 7 Иванов, Н. И. Защита от шума и вибрации / Н. И. Иванов. – Санкт-Петербург: изд-во «НИЦ АРТ». 2017. – 268 с.
- 8 Иванов, Н. И. Проблема акустического загрязнения Российской Федерации и пути его решения / Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2005 – Спец. выпуск «ELPIT-2005», Т. 1. – С. 119-121.
- 9 Towards a Comprehensive Noise strategy Policy. Department Economic and Scientific Policy. European Parliament: Environment, Public Health and Food Safety. Study EN, 2012. – 82 p.
- 10 Шашурин, А. Е Акустические свойства кабин / А. Е. Шашурин, Н. И. Иванов // Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности: сборник

трудов IV школы-семинара с международным участием 21 ноября 2007г. – СПб.: Балтийский государственный технический университет. – 2007. – С. 121-126

11 Иванов, Н. И. Акустические экраны для снижения шума в жилой застройке / Н. И. Иванов, Н. Г. Семёнов, Н. В. Тюрина // Приложение к журналу «Безопасность жизнедеятельности». 2012. – №4 – С. 1-24.

12 Иванов, Н. И. Применение акустических экранов для защиты от шума автомобильного и железнодорожного транспорта / Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина // Безопасность жизнедеятельности. – 2005 – № 8. – С. 13-18.

13 Тюрина, Н. В. Решение проблемы снижения шума на селитебных территориях и рабочих местах в помещениях акустическими экранами: автореф. дис. на соиск. уч. степени доктора техн. наук: 01.04.06 / Тюрина Наталья Васильевна. – СПб., 2014. – 54 с.

14 Шашурин, А. Е Новое поколение акустических экранов на автодорогах России / А. Е. Шашурин, Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина // Мир Дорог. – 2010. – №45. – С. 41 – 43.

15 Шашурин, А. Е Комплексные требования к проектированию шумозащитных мероприятий для высокоскоростных железнодорожных магистралей / А. Е. Шашурин [и др.] // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте (ТЭБТРАНС-2014): материалы IV Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22-24 октября 2014г. – Шашурин, А. Е Комплексный подход к защите территорий и жилой застройки от шума транспортных потоков различного вида / А. Е. Шашурин [и др.] //Бюллетень строительной техники. – 2016. – №6. – С. 22-23. – ISSN 0007-7690.

16 Пospelов, П. И. Прогнозирование и расчёт транспортного шума и средств защиты при проектировании автомобильных дорог: автореф. дис. на соиск. уч. степени доктора техн. наук: 05.23.11. / Пospelов Павел Иванович. – М., 2003. – 43 с.

17 Минина, Н. Н. Проблема снижения акустического воздействия на жилую застройку при проектировании, строительстве и функционировании

транспортных сооружений: автореф. дис. на соиск. уч. степени доктора техн. наук: 01.04.06 / Минина Наталья Николаевна. – СПб., 2012. – 48 с.

18 Шубин, И. Л. Основы проектирования транспортных шумозащитных экранов: учебное пособие / И. Л. Шубин [и др]. – М.: ИД «Бастет», 2015. – 208 с.

19 Николов, Н. Градоустройственная акустика. – София, Университетское изд-во «им. Св. Климента Охридского», 2006. – 236 с.

20 ГОСТ 33329-2015 «Экраны акустические для железнодорожного транспорта. Технические требования». – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.

21 Справочник проектировщика. Защита от шума. / Под ред. Е. Я. Юдина. – М.: «Стройиздат», 1974. – 134 с.

22 Źuchowski R., Marchacz M.: Evaluation of the effectiveness of screening with noise barriers with account to an edge noise reducer. : «ACEE», 2009. – Vol. 2, No.3. – P. 49-56.

23 Иванов, Н. И. Проблемы конструирования акустических экранов и их применение для снижения шума железнодорожного и автомобильного транспорта / Н. И. Иванов, Н. Г. Семёнов, Н. В. Тюрина // Сборник трудов IV научно-практической конференции с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия». – СПб., 26-28 марта, 2013. – с. 52-88.

24 Специальные технические условия. Шумозащитные мероприятия для участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству. Пояснительная записка. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ПГУПС, 2014. – 34 с.

25 Johansen K., Möser M. The influence of the surface of small barriers on the sound reflection efficiency of Shroud-Barrier combination : Fourth Int. congress of Sound and Vibration, 1996. – Russia, St. Petersburg, June 24-27, 1996. – P. 2623-2630.

26 Журбинский, Л.Ф. Исследование эффективности звукоэкранирования источников шума в помещениях обогатительных фабрик методом акустического моделирования / Л. Ф. Журбинский, А. И. Цукерман, В. В. Бобриков //Совер.

техн. и технол. для техн. перевооруж. углеобогат. фабрик – Люберцы, 1988. – С.84-92.

27 Зюзликова, Н. В. Снижение шума на рабочих местах в помещениях акустическими экранами: автореферат диссертации на соискание уч. ст. кандидата технических наук: 05.26.01. / Зюзликова Наталья Васильевна. – СПб., 1999. – 24с.

28 Kotarbinska E. How to calculate the efficiency of an acoustic barrier in a flat room :Applied acoustics, 1988. – Vol. 23 (2). – P. 99-108.

29 Кудяев, А. В. Снижение шума силовых установок строительно-дорожных машин звукоизолирующими капотами: автореф. дис-и на соиск. уч. степени канд. техн. наук: 01.04.06 / Кудяев Александр Владимирович. – СПб., 2011. – 25 с.

30 Тюрина, Н. В Расчёт эффективности акустических экранов сложной формы / Н. В. Тюрина, Ю. И. Элькин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2005. – Спец. выпуск «ELPIT-2005», Т.2. – С. 86-88.

31 Сухорукова, И. А. К вопросу проведения шумозащитных мероприятий приаэродромных территорий / И. А. Сухорукова // Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции «Защита населения от повышенного шумового воздействия» 17-19 марта 2009г.; под ред. Н. И. Иванова. – СПб.: БГТУ. – С. 405-409.

32 СП 51.13330.2011 Свод правил. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. – М.: Минрегион России, 2011. – 41 с.

33 СП 28.13330.2017 Свод правил. Защита строительных конструкций от коррозии Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 [электронный ресурс]. – [2018]. – Режим доступа: <http://borge.ru/uploads/industry/sp28.13330.2012.pdf>

34 Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г. N 36) [электронный ресурс]. – [2014]. – Режим доступа: <https://www.stroimdom.com.ua/files/docs/sn-2.2.4-2.1.8.562-96.pdf>

35 Technical assessment of the effectiveness of noise walls : Noise/News

36 International, 1999. – Volume (7). – P. 137-161.

- 37 Kurze U. J. Noise reduction by barriers : Journal off the Acoustical Society of America, 1974. – Vol. 55, №3. – P. 157-173.
- 38 38 Keller J. B. Geometrical theory of diffraction : Journal of the Optical Society of America, 1962. – Vol. 52 (2). – P.116-130.
- 39 Иванов, Н. И. Требования к шумозащите при проектировании железнодорожных магистралей / Н. И. Иванов [и др] // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Применение акустических экранов для снижения шума и увеличения безопасности движения поездов». – Москва, 14 декабря, 2006. – С.90-95.
- 40 Иванов, Н. И. Проблема снижения шума железнодорожного транспорта / Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Применение акустических экранов для снижения шума и увеличения безопасности движения поездов». – Москва, 14 декабря, 2006. – С.9-34.
- 41 Иванов, Н. И. Применение акустических экранов для снижения транспортного шума в Финляндии / Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Применение акустических экранов для снижения шума и увеличения безопасности движения поездов». – Москва, 14 декабря, 2006. – С.104-111.
- 42 van Leeuwen J. J. Noise Prediction Models to Determine the effect of Barriers Placed alongside Railway Lines : Journal of Sound and Vibration, 1996. – Vol. 193, No. 1. – P. 269-276.
- 43 Kurze U.J. Noise reduction barriers performance and other Problems of German rules and Regulations for the Prediction of Road Traffic Noise : Inter Noise, 1994. – Yokohama-Japan, august 29-31. – P. 301-306.
- 44 Matsumoto T., Yamamoto K., Iimura K., Sakamoto G. Scale model studies of new type highway noise barriers : Inter Noise, 1994. –Yokohama-Japan, august 29-31. – P. 579-582.

- 45 Hothersall D. C., Horoshenkov K. V., Morgan P. A., Swift N. J. Scale Modelling of Railway Noise Barriers : Journal of Sound and Vibration, 2000. – Vol. 234(2). – P. 209-222.
- 46 Morgan P. A., Hothersall D. C. Influence of Shape and Absorbing Surface – a Numerical Study of Railway Noise Barriers : Journal of Sound and Vibration 1998. – Vol. 217(3). – P. 405-416.
- 47 Jones C. J. C. & Jones R. R. K. Railway Noise Propagation Control – an Investigation of Re-Radiated Sound from Very Low Trackside Barriers: Inter Noise, 1996. – 25th Anniversary Congress-Liverpool. – P. 831-836.
- 48 Luzzi S., Baldacchini A., Bellomini R. A Standard Procedure for Acoustic Design of Railway Noise Barriers : Twelfth Internatoinal Congress on Sound and Vibration, ICSV12, 2005. – Lisbon, 11-14 July. – P. 1-6.
- 49 Houtave P., Clarbois J. P. Specific designs of noise barriers for trains, Part I: Theoretical study of forms and materials: Inter Noise, 1997. – Congress Budapest-Hungary, August 25-27. – P. 421-424.
- 50 Horoshenkov K. V., Rehman S., Martin S. J. The Influence of the Noise Spectra on the Predicted Performance of Railway Noise Barriers : Ninth International Congress on Sound and Vibration, ICSV9. – P. 1-8.
- 51 Ландвер, Е Шумозащитные стенки на железнодорожных линиях / Е. Ландвер // Железные дороги мира. – 1997. – №6. – С. 1-6.
- 52 Высокоскоростное движение и экология // ЖДМ. – 2000. – №7. – С.1-6.
- 53 Vogiatzis C. Results of a Measurement Campaign at Athens tram Network : The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, ICSV13-Vienna. – Vienna, Austria, July 2-6, 2006. – P. 1-8.
- 54 Фитцджеральд, В. Барьеры для снижения шума железных дорог. / В. Фитцджеральд, М. Харрисон // Железные дороги мира. – 1998. – №4. – С. 48-50.
- 55 Иванов, Н. И. Снижение шума и вибрации железнодорожных магистралей / Иванов, Н. И. [и др] // Сборник докладов Всероссийской «Защита населения от

повышенного шумового воздействия». – Санкт-Петербург, 21-22 марта 2006 г. – С. 235-240.

56 van Leeuwen J. J. Prediction Models to Determine the Acoustic Effect of Barriers Along Railway Lines : Transactions on the Built Environment, 1995. – Vol. 10. – P. 65-72.

57 Jonasson H. G. Sound reduction of low railway barriers : Inter Noise, 1997. – Budapest-Hungary, august 25-27. – P. 417-420.

58 Тюрина Н. В. Стандарты ИСО и новый ГОСТ Р по экспериментальной оценке эффективности акустических экранов для автодорог / Н. В. Тюрина // Сборник трудов научно-технического семинара «Применение акустических экранов при строительстве автомобильных дорог для снижения шума в жилой застройке». – СПб.: Павловск, 17-19 декабря 2002. – С. 47-54.

59 Иванов, Н. И. Будущее – за экраном / Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина, В. П. Бобровских // Мир дорог. – 2007. – № 29. – С. 85-88.

60 Буторина, М. В. Акустическая защита на кольцевой автодороге вокруг Санкт-Петербурга / М. В. Буторина, Н. В. Тюрина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2005. – Спец. выпуск «ELPIT-2005», Т.2. – С. 27-33.

61 Акустические экраны: конструкция, материалы, эффективность // Мир дорог. – 2008. – № 35. – С. 64-66.

62 Буторина, М. В. Оценка акустического загрязнения от автомобильных дорог и выбор мероприятий по снижению шума / М. В. Буторина, Н. В. Тюрина // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – №10. – С. 21-25.

63 Буторина, М. В. Снижение шума при проектировании транспортного обхода вокруг Санкт-Петербурга / М. В. Буторина, Н. В. Тюрина // Безопасность жизнедеятельности. – 2006. – №1. – С. 30-35.

64 Буторина, М. В. Выбор акустических экранов для установки на кольцевой автодороге вокруг Санкт-Петербурга / М. В. Буторина, Н. В. Тюрина // Труды первой Всероссийской школы-семинара с международным участием

«Новое в теоретической и прикладной акустике». – СПб.: 17-18 октября 2001. – С. 63-73.

65 Martin S. J., Hothersall D. C. Numerical modeling of median road traffic noise barriers : Journal of Sound and Vibration, 2002. – Vol. 251, No. 4. – P. 671-681.

66 Fyfe K. R., Harrison C. C., Cremers L. Performance of barriers and berms for road noise attenuation : 15th International Congress on Acoustics Trondheim, Norway 26-30 June 1995. – P. 101-104.

67 Samuels S., Ancich E. Recent developments in the design and performance of road traffic noise barriers : «Acoustics Australia», 2001. – Vol. 29, No. 2. – P. 73-78.

68 Wu W., Migneron J. G., Côté P. Application of the «IMPACT» Noise Prediction Model for the Acoustical of Traffic Noise Barriers : Building Acoustics, 1998. – Vol. 5, №4. – P. 249-270.

69 Рекомендованные значения для транспортного шума // Выступление на семинаре «Технологическая поддержка КАД, шумозащитные сооружения», 27 сентября 2001. – С. 2-8

70 European Standardization for Sound Barriers : The Wall Journal, May/jun 1995 – Issue No. 17. – P. 4-5.

71 Fyfe K. R., Harrison C. C. Insertion Loss Performance of Road Noise Barriers : The Wall Journal, 1995 – Issue No. 17. – P. 10-11.

72 Тюрина, Н. В. Классификация акустических экранов // Сборник трудов 2-ой Всероссийской школы-семинара «Новое в теоретической и прикладной акустике», под ред. Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург, 17-18 октября, 2002. –С.115-121.

73 Сергеев, М.В. Мониторинг шума окружающей среды. Новые возможности / М. В. Сергеев, С. Ю. Макашов // Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия». – Санкт-Петербург, 21–22 марта 2006 г. – С. 184-189.

74 Применение акустических экранов для снижения шума на автомобильных дорогах // Мир дорог. – 2006. – № 23. – С. 48-50.

- 75 Пospelов, П. И. Щумозащитные сооружения – элемент автомобильных дорог / П. И. Пospelов, Д. М. Строков, Б. А. Щит // Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции «Защита населения от повышенного шумового воздействия»: под ред. Н. И. Иванова. – СПб.: БГТУ, 17-19 марта 2009г. – С. 112-116.
- 76 Пospelов, П. И. Проектирование шумозащитных сооружений при реконструкции МКАД / П. И. Пospelов, Д. М. Строков, Б. А. Щит // Доклад на научно-практической конференции «Промышленная экология – 97». – СПб., 12-14 ноября 1997 г. – С. 283-288.
- 77 Патент США №6016888 08/963214, 03.11.1997 Противозумное ограждение площадки для наземных испытаний авиационных ГТД в аэропорту. (Stable flow enhancements for ground runup enclosure) // Патент США №6016888 08/963214 МПК⁷ В 64 F 1/26. Заявл. 03.11.1997: Опубл. 25.01.2000; НПК 181/218. / Lynn Christopher.
- 78 Тригопи, В. Е. Математическая модель оценки акустической эффективности шумозащитных экранов на аэродромах. Проектирование и расчет прочности сооружений аэропортов / В. Е. Тригопи, Ю. А. Плотникова // Москва: Московский государственный автомобильно-дорожный институт, 1996. – С. 4-12. (Депеша в ВИНТИ 05.07.96, №2173-В96).
- 79 Практика снижения шума в международном аэропорту Копенгагена. A Breath of-fresh air [текст на английском] : Airport Support, 1993. – Vol. 11 (10). – P. 20.
- 80 Минина, Н. Н. Снижение шума при строительстве / Н. Н. Минина [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – №8. – С. 22-25.
- 81 Преснов, Г. В. Эффективный способ подавления шума башенной градирни ТЭЦ-23 ОАО «МОСЭНЕРГО» / Г. В. Преснов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2006. – № 11. – С. 47-49.
- 82 Тупов, В. Б. Опыт снижения шума энергетических установок / В. Б. Тупов // Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции «Защита

населения от повышенного шумового воздействия»: под ред. Н.И. Иванова. – СПб.: БГТУ, 17-19 марта 2009г. – С. 190-200.

83 Wolfgang S. Innovativer Schallschutzzaun für Dach-Technikzentrale : Heizung. Luftung/ Klima, Nauatechn, 2001. – Vol. 52, № 9. – P. S22-S24.

84 Иванов, Н. И. Снижение технологического шума акустическими экранами / Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина //Безопасность жизнедеятельности. –2003. – №6. – С. 19-24.

85 Шило, В. Ф. Основание эффективности использования акустических экранов в аэропортах гражданской авиации. / В. Ф. Шило // Материалы международной научно-практической конференции «Обеспечение безопасности полётов в новых экономических условиях». – Киев, 1997. – С. 319-320.

86 Патент Великобритании № 022198.4, 16.09.2002 Экран вокруг сопла авиационного ГТД. Aircraft engine exhaust shroud // Патент Великобритании № 022198.4, Заявка 2407133, МПК⁷ F 02 К 1/00. BAE Systems pic № 022198.4; Заявл. 16.09.2002; Опубл. 20.04.2005; Приор. 25.09.2001, № 0122987 (Великобритания); НПК F1J. (Английский). / Colosimo Nicholas, Giacomo Robert.

87 ГОСТ 33328–2015 Экраны акустические для железнодорожного транспорта. Методы контроля. – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.

88 ГОСТ Р 51943–2002. Экраны акустические для защиты от шума транспорта. Методы экспериментальной оценки эффективности. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 8 с.

89 Daigle Grilles A. Report by the International Institute of Noise Control Engineering Working Party of the Effectiveness of Noise Walls : Noise / News., 1999. – Francesco Astrubali, Giulio Pispola, Francesco D'Allesandro. Acoustic intrinsic performances of noise barriers: accuracy of situ measurement techniques : Twelfth International congress on Sound and Vibration. – Lisbon. Portugal. 11-14 July 2005.

90 Шубин, И. Л. Акустический расчет и проектирование шумозащитных экранов: автореферат дис-и на соиск. уч. степени д-ра техн. наук: 05.23.01 / Шубин Игорь Любимович. – М.: 2011. – 46 с.

- 91 Тюринa, Н. В Проблема снижения шума акустическими экранами / Н. В. Тюринa, Н. И. Иванов // Дорожная держава. – 2008. – №12. – С. 38-40.
- 92 Куклин, Д. А. Исследования акустических экранов для снижения шума поездов / Д. А. Куклин, Н. В. Тюринa // Безопасность жизнедеятельности. – 2009 – № 8(104). – С. 30-34.
- 93 Иванов, Н. И. Проблема шума железнодорожного транспорта и пути ее решения / Н. И. Иванов, Д. А. Куклин // Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия». – СПб., 22-24 марта 2011 г. – С. 108-123.
- 94 Буторина, М. В. Проблема защиты от шума / М. В. Буторина, Н. И. Иванов // Вестник МГСУ. – 2015. – № 3. – С. 136.
- 95 Тюринa, Н. В. Влияние размеров и формы на эффективность акустического экрана / Н. В. Тюринa, Ю. И. Элькин // Труды четвёртой Всероссийской школы-семинара с международным участием «Новое в теоретической и прикладной акустике». – СПб.: 21 ноября 2007. – С. 66-75.
- 96 Clairbois J. P., Houtave P., Nicolas N. Specific designs of noise barriers for trains: Part II: In situ verification of : Inter Noise, 1997. – Budapest-Hungary, august 25-27. – P. 425-428.
- 97 Saif G., Mahmoud A. A. Effectiveness of Noise Barriers Tilted Towards the Traffic Way Over Bridges : 14th International Congress on Sound and Vibration, ICSV14. – Cairns, Austria, July 9-12, 2007. – P. 1-8.
- 98 van Tol P. F. An array measurement technique applied to high speed train noise barriers: first results : Inter Noise, 1997. – Budapest-Hungary, august 25-27. – P. 429-432.
- 99 Eng. Franca Conti, Traffic noise abatement by means of acoustical barriers: an example of reliability of prediction models : 5th International Symposium «Transport Noise and Vibration», Russia. – St. Petersburg, 6-8 June 2000. – P. 1-4

- 100 Plotkin K. J., Gurovich Y. A., Laboratories W. Truck noise source heights for barrier analysis as determined from beamforming : Inter Noise, 2009. – Ottawa, Canada, august 23-26. – P. 1-9.
- 101 Tyurina N. Noise Barriers for St. Petersburg Ring Road: Design Features and Parameters : Eleventh International Congress on Sound and Vibration, Russia. – St. Petersburg, 4-8 July 2000. – P. 1377-1382
- 102 Maffei L., Masullo M., Aletta F. Influence of the design of railway noise barriers on soundscape perception : Inter Noise, 2012. – USA, New York City, august 19-22. – P. [21-24].
- 103 Koussa F., Defrance J., Jean P. Optimization of low height sonic crystal noise barriers for tramway noise reduction : Euronoise. – Prague, 2012. – P. 1278-1282.
- 104 Minina N., Butorina M., Ivanov N., Tyurina N. Effect of construction on acoustical pollution of city environment : 15th International Congress on Sound and Vibration, ICSV15. – Korea, Daejeon, July 6-10, 2008. – P. 813-820.
- 105 Watts G. Acoustic performance of parallel traffic noise barriers: full scale tests : Inter Noise, 1994. –Yokohama-Japan, august 29-31. – P. 583-585.
- 106 Ughi S., Artom F., Cingolani S., Aste L. Behaviour of normal height sound barriers combined with low barriers placed at minimum distance from the railway tracks : Inter noise, 1995. – Newport Beach, CA, USA, 10-12 July. – P. 377-380.
- 107 Шашурин, А. Е Снижение шума стационарного оборудования акустическими экранами / А. Е. Шашурин, Н. Г. Семёнов // Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 50-летию первого полета человека в космос и 75-летию регулярных исследований ионосферы в России. – Томск: Томское университетское издательство, 2011. – с. 199-203.
- 108 Guidorzi P., Klepáček J., Garai M. On the of reflection Index measurements on noise barriers : Euronoise. – Prague, 2012. – P. 1314-1319.
- 109 Иванов, Н. И. Влияние звукоизоляции на эффективность акустических экранов / Н. И. Иванов, Д. А. Куклин, Н. В. Тюрина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т.12, №1(9). – С. 2223-2228.

- 110 Скворцов, А. Н. Современное проектно-конструкторское решение для защиты населения от энергии шума / А. Н. Скворцов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2016. – №1. – С. 78-86.
- 111 Тюрина, Н. В. Применение акустических экранов для снижения шума в жилой застройке / Н. В. Тюрина // Сборник докладов научно-практической конференции с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия». – Санкт-Петербург, 21-22 марта, 2006. – С. 97-112.
- 112 Cheng W. F., Ng C. F. The use of image source in the prediction of reflection effects in parallel barriers : Inter Noise, 1999. – USA, Florida, Fort Lauderdale, December 06-08. – P. 1-6.
- 113 Fahy F. J., Ramble D., Walker J. G., Suguira M. Development of a novel modular form of sound absorbent facing for traffic noise barrier : Inter Noise, 1993. – Belgium, Leuven, August 24-26. – P. 1687-1690.
- 114 Sugie S., Yoshimura J., Ogawa H. Influence of facing for fibrous sound absorber in noise barrier : Inter Noise, 2002. – USA, MI, Dearborn, august 19-21. – CD-ROM
- 115 Jabben J., Nijland H., Odijk M. Costs and benefits of noise barriers and porous pavements for motorways in the Netherlands : Inter Noise, 2002. – USA, MI, Dearborn, august 19-21. – CD-ROM
- 116 McGrath B., Pan J., Wang J. Wave trapping barriers and the effects of the tilting angle on scattered noise : 15th International Congress on Sound and Vibration, ICSV15. – Korea, Daejeon, July 6-10, 2008. – P. 400-407.
- 117 Lutgendorf D., Wessela P. W., van der Eerden F. J. M., de Roo F. Far field effects of complex noise barrier reflections: Euronoise. – Prague, 2012. – P. 1309-1313.
- 118 Moleron M., Felix S., Pagneux V., Richoux O. Control of absorption and directivity properties of noise barriers using periodic surfaces : Inter Noise, 2012. – USA, New York City, august 19-22. – CD-ROM.
- 119 Anfosso-Ledee F. Sound absorption of non flat road noise barriers: Inter Noise, 1997. – Budapest-Hungary, August 25-27. – P. 441-444.

- 120 Highway Noise: Sloped Barriers as an Alternative to Absorptive Barriers : Noise Control Engineering Journal, 1980 . – № 14(2) – P. 74-78.
- 121 Fujiwara K., Furuta N. Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge : Noise Control, 1991. – №37. – P. 5-11.
- 122 Busch T. A., Nugent R. E. A reduced-scale railway noise barrier's insertion loss and absorption coefficients: comparison of. field measurements and predictions : Journal of Sound and Vibration, 2003. – №267. – P. 749-759.
- 123 Bugaru M., Enescu N., Stanila R., Vasile O. Reflection and absorption properties of the acoustical barriers of finite length : Twelfth Internatoinal Congress on Sound and Vibration, ICSV12, 2005. – Lisbon, 11-14 July. – P. [12-16].
- 124 Cotana F., Rossi F., Filipponi M. Performances of resonant barriers for transport noise abatement : Twelfth Internatoinal Congress on Sound and Vibration, ICSV12, 2005. – Lisbon, 11-14 July. – P. 1-8.
- 125 Калиниченко, М. В. О возможности применения акустических экранов, выполненных на основе резонаторов Гельмгольца, для снижения шума / М. В. Калиниченко // Noise Theory and Practice. – 2015. – С. 46-54.
- 126 Калиниченко, М. В. О возможности применения акустических экранов-резонаторов для снижения шума в зоне передэкраном/ М. В. Калиниченко, В. В. Булкин, А. А. Балашова. // Noise Theory and Practice. – 2016. – С. 16-22.
- 127 Watts R., Chandler-Wilde S. N., Morgan P. A., Richardson I. D., Ross C. R. The Combined Effects of Porous Asphalt Surfacing and Barriers on Traffic Noise : Inter Noise, 1996. – 25th Anniversary Congress-Liverpool. – P. 3103-3108.
- 128 Duhamel D., Sargent P. Sound propagation over noise barriers with absorbing ground : Journal of Sound and Vibration, 1998. – №218(5). – P. 799-823.
- 129 Makarewicz R. Influence of Ground Effect and Refraction on Road Traffic Noise : Applied Acoustics, 1997. – Vol. 52., No. 2. – P. 125-137.
- 130 Makarewicz R. Attenuation of outdoor noise due to air absorption and ground effect : Applied Acoustics, 1998. – Vol. 52., No. 1-3. – P. 133–151.
- 131 Lutgendorf D., de Roo F., van der Eerden F. J. M., Jean P., Ecotièrre D., Dutilleux G. Numerical simulation of the sound reflection effects of noise barriers in near and far

field : 6th Forum Acusticum 2011. – Denmark, Aalborg, 27 June – 1 July 2011. – P. 149-154.

132 Makarewicz R., Rasmussen K. B., Kokowski P. Ground Attenuation of Railroad Noise : *Acustica/Acta Acustica*, 1996. №82. – P. 636-641.

133 Weston D. E, Ainslie M. A. Reflection with beam displacement from simple barriers : *Acta Acust*, 1996. – No 82. – P. 607–614.

134 Farina A., Fausti P. Motorway traffic noise reduction by means of barriers : A design example based on prediction models and experimental verification : University of Parma and University of Ferrara, 1995. – Italy. – CD-ROM.

135 Daltrop S., Hodgson M., Wakefield C. Experimental Investigation of the Effects of Absorptive Surfaces on the Acoustical Performance of a Barrier in an Anechoic Chamber : *Canadian Acoustics*, 2010. Vol. 38, No 3. – P. 182-183.

136 Fujiwara K., Ohkubo T. Sound shielding efficiency of a noise barrier with soft surface and soft round obstacle at the edge : *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics Trondheim, Norway 26-30 June 1995*. – P. 97-100.

137 Johansen K., Möser M. The Influence of the Surface of Small barriers on the sound reduction efficiently of shroud-barriers combinations : *Thirteenth International Congress on Sound and Vibration*. – Germany, Garmisch-Partenkirchen, July 4-7, 2000. – P. 17-24.

138 Fujiwara K., Hothersall D. C. Noise barriers with reactive surfaces : *Inter Noise*, 1996. – 25th Anniversary Congress-Liverpool. – P. 819-824.

139 Пospelов, П. И. Совершенствование метода расчета шумозащитных барьеров, расположенных на поверхности земли с заданным импедансом / П. И. Пospelов, В. Н. Покидько // *Труды «Вопросы архитектурной акустики, защиты от шума в акустической экологии»*. – М.: НИИСФ, 1989. – С. 168-175.

140 Arenas J. P., Monsalve A. M. Scale-model experiments on diffraction produced by different noise barrier edge designs : *Fourth International Congress on Sound and Vibration, Russia*. – St. Petersburg, 24-26 June 1996. – P. 1127-1133.

- 141 Fujiwara K., Ohkubo T., Omoto A. A Note on The Noise Shielding Efficiency of a Barrier with Absorbing Obstacle at the Edge: Inter noise, 1995. – Newport Beach, CA, USA, 10-12 July. – P. 393-396.
- 142 Yamamoto K., Shono Y., Ochiai H., Hirao Y. Measurements of noise reduction by absorptive devices mounted at the top of highway noise barriers: Inter noise, 1995. – Newport Beach, CA, USA, 10-12 July. – P. 389-392.
- 143 Alfredson R. J., Du X. Special shapes and treatment for noise barriers: Inter noise, 1995. – Newport Beach, CA, USA, 10-12 July. – P. 381-384.
- 144 Ohkubo T., Yamamoto K. Determination of intrinsic efficiency of edge-modified noise barriers : Inter Noise, 2006. – USA, Honolulu, Hawaii, December 3-6. – CD-ROM.
- 145 Lam Y. W. A study of random jagged edge noise barrier performance using an analytical approximation : Inter Noise, 2006. – USA, Honolulu, Hawaii, December 3-6. – CD-ROM.
- 146 Amram M., Yang M., Wu K. Cylindrical Anti-Noise Device: 6th International Symposium «Transport Noise and Vibration», Russia. – St. Petersburg, 4-6 June 2002. – P. 2-8.
- 147 Ouis D. Scale model experiments on new types of noise barriers : 5th International Symposium «Transport Noise and Vibration», Russia. – St. Petersburg, 6-8 June 2000. – P. 1-4.
- 148 Möser M. The influence of barrier edge treatments : 16th International Congress on Sound and Vibration. – Poland, Krakow, July 5-7, 2009. – P. 1213-1214.
- 149 Hasebe M. Study on Noise Reduction by T-profile barrier: Inter Noise, 1994. – Yokohama-Japan, august 29-31. – P. 591-594.
- 150 Watts G., Morgan A. Acoustic performance of an interference-type noise-barrier profile : Applied Acoustics, 1996. – Vol. 49, No1. – P. 1–16.
- 151 Watts G. Acoustic Performance of new designs of traffic noise barriers : NOISE-93, Russia. – St. Petersburg, May 31- June 3, 1993. – P. 211-216.
- 152 Ibrahim M. A. Effectiveness of Noise Barriers Tilted Towards the Traffic Way Over Bridges : Noise & Vibration Worldwide, 2004. – Vol.35, No11. – P. 16-24.

- 153 Castineira-Ibanez S. Characterization of an Acoustic Barrier Made up of arrangements of Multi-Phenomena Cylindrical scatterers based on Fractal Geometries : Euronoise. – Prague, 2012. – P. 1289-1293.
- 154 Hasebe M. Barrier with a wedge-shaped device composed of wells on the top plane: Inter Noise, 2012. – USA, New York City, august 19-22. – P. [1555-1564].
- 155 Yoon J.-W., Kim Y.-C., Jang K.-S. A study on the acoustic performance prediction and evaluation of lattice type noise reducing devise installed on the top of noise barrier: Inter Noise, 2012. – USA, New York City, august 19-22. – P. [490-504].
- 156 Rettinger M.: Noise Level Reductions of Barriers : Noise Control, 1957. – Vol. 3, No5. – P. 50-52.
- 157 Möser M., Volz R. Improvement of sound barriers using headpieces with finite acoustic impedance : Journal off the Acoustical Society of America, 1999. – Vol. 106, No. 6 – P. 3049-3060.
- 158 Yamamoto K., Yamashita M., Yoshida Y., Shono Y. Application of noise abatement devices at the top highway noise barrier : Inter Noise, 1993. – Belgium, Leuven, August 24-26. – P. 1719-1722.
- 159 Diez I., Galvan J., Vazquez M., Fernández P. MAITE II: 3D Numerical Simulation for sound diffraction of added device : Inter Noise, 2010. – Portugal, Usbon, 15-16 June. – P. 1-8.
- 160 Burret M., Li K. M., Iu K. K., Law M. Screening by edge-modified barriers of road traffic noise in high-rise buildings : Inter Noise, 2009. – Ottawa, Canada, august 23-26. – P. 2-7.
- 161 Enflo B., Pavlov I. diffraction of sound against barriers with simple edge profiles : Sixth International Congress on Sound and Vibration, 1999. – Denmark, Copenhagen, 5 – 8 July 2011. – P. 695-698.
- 162 Enflo B., Pavlov I., Sandvist H. Sound diffraction at noise barriers with straight and non- straight edge profiles : Tenth International Congress on Sound and Vibration, 2003. – Sweden, Stockholm, 7-10 July. – P. 1453-1459.

- 163 van Leeuwen H., Nota R. Effects of the double diffraction edge on traffic noise levels in the far fields : 19th International Congress on Acoustics, 2007. –Madrid, 7-6 September. – P. 2-6.
- 164 Gharabegian A. Improving the Performance of Highway Soundwalls : Sound and Vibration, 1996. – Vol. 30, No.7. – P. 30-33.
- 165 Fujiwara K., Ohkubo T. Efficiency of a noise barrier with an acoustically soft cylindrical edge for practical use : Journal off the Acoustical Society of America, 1999. – Vol. 105, No. 6 – P. 3326-3335.
- 166 Parnell J., Samuels S., Tsitsos C. The acoustic performance of novel noise barrier profiles measured at the roadside : «Acoustics Australia», 2010. – Vol. 38, No. 3. – P. 123-128.
- 167 Hasebe M. Sound reduction by a T-profile noise barrier : Journal off the Acoustical Society of America, 1995. – Vol. 16, No. 3. – P. 173-179.
- 168 Maekava Z. Recent problems nose barriers : NOISE-93, Russia. – St. Petersburg, May 31- June 3, 1993. – P. 125-131.
- 169 Nordin L., Abom M. Some investigations concerning barriers for road traffic noise control : NAM 98. – Stockholm, 7-9 September, 1998. – P. 1-4.
- 170 Yamamoto K. Comparison of Calculated and Measured Data for the Attenuation of Improved Noise Barrier: 16th International Congress on Sound and Vibration. – Poland, Krakow, July 5-7, 2009. – P. 99-100.
- 171 Menounou P., Busch-Vishniac I. J., Blackstock D. T., Jagged-edge noise barriers : 16th International Congress on Sound and Vibration. – Poland, Krakow, July 5-7, 2009. – P. 97-98.
- 172 Fujiwara K., Kim C., Ohkubo T. Excess attenuation by reactive obstacle at noise barrier edge : 16th International Congress on Acoustics, 1998. – Seattle, WA. – P. 95-96.
- 173 Sandqvist H. Efficiency of noise barriers with non-straight edge profiles : Audio Engineering Society, Conference Paper, presented at the 21st Conference, 2002. – Russia, St. Petersburg, 1-3 June. – P. 220-221.

- 174 Shono Y. Development of noise reducers applied at the top of highway noise barriers : Transport noise, 1994. – P. 257-260.
- 175 Arenas J. P., Monsalve A. M. Modification of the Diffracted Sound Field by Some Noise Barrier Edge Designs : International Journal of Sound and Vibration, 2001. – Vol. 6, No. 2. – P. 76-82.
- 176 Diez I., Fernández P., Vázquez M. Methodology to evaluate the efficiency of additional devices on noise barriers : The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration. – Poland, Krakow, July 5-9, 2009. – P. 1-9.
- 177 Egan C. A., Chilekwa V., Oldham D. J. An investigation of the use of top edge treatments to enhance the performance of a noise barrier using the boundary element method : The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, ICSV13-Vienna. – Vienna, Austria, July 2-6, 2006. – P. 2-8.
- 178 Baulac M., Defrance J., Jean P. Optimization of performance of T-shared barriers with reactive top surfaces: The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, ICSV13-Vienna. – Vienna, Austria, July 2-6, 2006. – P. 2-8.
- 179 Crombie D. H., Hothersall, D.C. The acoustic performance of multiple edge noise barriers : Inter Noise, 1994. – Yokohama-Japan, august 29-31. – P. 587-589.
- 180 Okubo T., Fujiwara K. Efficiency of a noise barrier on the ground with an acoustically soft cylindrical edge : Journal of Sound and Vibration 1998. – Vol. 217(3). – P. 771-790.
- 181 Аистов, В. А. Исследование влияния формы шумозащитного экрана на его акустическую эффективность / В. А. Аистов, И. Л. Шубин // ACADEMIA. Архитектура и строительство. – 2009. – №5. – С. 200-208.
- 182 Аистов, В. А. Оценка влияния шума железнодорожных поездов на жилые территории и комплекс мероприятий по его снижению / В. А. Аистов, И. Л. Шубин, Д. Н. Николов // ACADEMIA. Архитектура и строительство. – 2009. – №5. – С. 216-223.
- 183 Иванов, Н. И. Сравнительный анализ акустических экранов / Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина // Мир дорог. – 2006. – № 23. – С. 56-58.

- 184 Иванов, Н. И. Влияние материала на акустическую эффективность шумозащитного экрана / Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин, Ю. С. Бойко // *Noise Theory and Practice*. – 2016. – С. 24-28.
- 185 Massimo G., Guidorzi P. Case history: in situ verification of the intrinsic characteristics of the acoustic barriers installed along a new high speed railway line : *Inter Noise*, 2006. – USA, Honolulu, Hawaii, December 3-6. – CD-ROM.
- 186 Horoshenkov K. V., Khan A., Benkreira H. The effect of moisture and soil type on the acoustical properties of green noise⁴ control elements : *6th Forum Acusticum* 2011. – Denmark, Aalborg, 27 June – 1 July 2011. – P. 845-849.
- 187 Koussa F., Defrance J., Jean P., Blanc-Benom P. Efficiency of gabion noise barriers: theoretical approach and scale model measurements : *6th Forum Acusticum* 2011. – Denmark, Aalborg, 27 June – 1 July 2011. – P. 683-688.
- 188 Pospelov P., Stokov D. Motorway noise barriers : *5th International Symposium «Transport Noise and Vibration»*, Russia. – St. Petersburg, 6-8 June 2000. – P. [11-14].
- 189 Garcia E. F., Romero-Garcia V., Garcia-Raffi L. M., Sánchez-Pérez J. V., Martinez-Sala R. M., Michavila C. R. A design procedure for acoustic barriers based on Sonic Crystals : *Inter Noise*, 2007. – Turkey, Istanbul, august 28-31. – P. 2-6.
- 190 Harris R. A. Vegetative Barriers: An Alternative Highway Noise Abatement Measure : *Noise Control Engineering Journal*, July-August 1986. – Vol. 27, No. 1. – P. 4-8.
- 191 Arenas J. P. Sound barriers and environmental impact studies : *The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, ICSV13-Vienna*. – Vienna, Austria, July 2-6, 2006. – P. 2-16.
- 192 Conti I. F. Traffic noise abatement by means of acoustical barriers: an example of reliability of prediction models with different kind of barriers and different context: *The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, ICSV14*. – Cairns, Austria, July 9-12, 2007. – P. 2-8.
- 193 Jean P. The effect of structural elasticity on the efficiency of noise barriers : *Journal of Sound and Vibration*, 2000. – Vol. 237, No. 1. – P. 2-21.

- 194 Conference of European Directors of Roads (CEDR). Transnational Road Research Programme. Call 2012: Noise: Integrating strategic noise management into the operation and maintenance of national road networks : Funded by Belgium/Flanders, Germany, Ireland, Norway, Sweden, United Kingdom. March 2014. – 111 p.
- 195 Kotzen B., English C. Environmental Noise Barriers. A guide to their acoustic and visual design : Second edition, 2009. – P.10-197.
- 196 Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н. И. Иванов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Логос, 2013. – 432 с.
- 197 Инженерная экология и экологический менеджмент / М. В. Буторина [и др.]; под ред. Н.И. Иванова, И.М. Фадына. – Изд. 3-е. – М.: Логос, 2011. – 520 с.
- 198 Towards a Comprehensive Noise Strategy, Policy Departament Economic and Scientific Policy : Environment, Public, Health and Food Safety, 2012. – 82 p.
- 199 Kim S. A sound solution. Planning USA Шумозащитные стенки в США [текст на английском] : Schallschutzwand fur Verkehrswege, 2001. – Заявка 19938676. – Т. 67, №4. – С. 10-15.
- 200 ГОСТ 32957-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Экраны акустические. Технические требования». – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
- 201 State of the art in managing road traffic noise: noise barriers : Conference of European Directors of Roads (CEDR), 2016. – Technical Report, 2017-02 December. – P. 8-28.
- 202 Integrating strategic noise management into the operation and maintenance of national road networks : Conference of European Directors of Roads (CEDR), Transnational Road Research Programme, Call 2012. – Noise:. Funded by Belgium/Flanders, Germany, Ireland, Norway, Sweden, United Kingdom, 26-30 April 2014. – P. 40-60.
- 203 Guidelines on Design of Noise Barriers : Environmental Protection Department Highways Department Government of the Hong Kong SAR Second Issue, January 2003. – P. 10-31.

- 204 Haider M., Rauscher G., Bohrn J. In-situ investigation of Austrian noise barriers using the Adrienne method : Inter Noise, 2007. – Turkey, Istanbul, august 28-31. – P. 2-7.
- 205 Wehr R., Conret M., Haider M., Gasparoni S. Far-Field Measurements of the Acoustic Properties of Noise Barriers : Euronoise. – Prague, 2012. – P. 1320-1323.
- 206 Altreuther B., Schubert S., Maennel M. Insertion loss estimate for a hedge and a greened noise barrier : Euronoise. – Prague, 2012. – P. 1324-1328.
- 207 Rubio C., Castineira-Ibanez S., Romero-Garcia V., Sánchez-Pérez J. V. Characterization of the diffraction on the upper edge acoustic barriers based on sonuc crystals. Comparison with the case of classic barriers : Euronoise. – Prague, 2012. – P. 1329-1333.
- 208 Swart W. J. R., Odijk M., Jabben J. Experimental validation of a model for barrier noise attenuation : Inter Noise, 2002. – USA, MI, Dearborn, august 19-21. – [123-134].
- 209 Yoo T., Mongeau L., Bolton J. S. Modeling the performance of noise with complex top geometries : Inter Noise, 2002. – USA, MI, Dearborn, august 19-21. – [135-140].
- 210 Suh S., Mongeau L., Bolton J. S. Performance of Highway Noise Barriers with Absorptive Edge Treatments: Inter Noise, 2002. – USA, MI, Dearborn, august 19-21. – [141-153].
- 211 Wadsworth G. J., Clambers J. P. Scale Model Experiments of the Insertion Loss of Double and Wide Barriers : 16th International Congress on Sound and Vibration. – Poland, Krakow, July 5-7, 2009. – P. 121-122.
- 212 Тюрина, Н. В. Сравнение методов оценки эффективности акустических экранов / Н. В. Тюрина, Д. А. Никитин. // Труды Международного семинара «Экологическое планирование кольцевой автодороги и устойчивое развитие транспорта» Санкт-Петербурга. – СПб, 5 октября 2001 г. – С. 74-81.
- 213 Тюрина, Н. В. Новейшие нормативные документы для оценки эффективности акустических экранов / Н. В. Тюрина // Материалы научно-

технической конференции «Строительная физика в XXI веке» НИИСФ РААСН, 23-25 сентября 2006г.. – Москва, 2006. – С. 392-395.

214 Bart van der Aa, Jens Forssén Numerical comparison of traditional noise screens and refractive graded index sonic crystal noise barriers in downwind sound propagation perception : Inter Noise, 2012. – USA, New York City, august 19-22. – P. [1044-1053].

215 Rychtarikova M., Roozen N. B., Chmelik V., Geentjens G., Bruyninckx W., Wursten E., Frederickx R., Glorieux C. Determination of the sound reflection index of noise barriers: guidelines to improve the measurement accuracy : Inter Noise, 2012. – USA, New York City, august 19-22. – P. [898-902].

216 Garai M., Guidorzi P., Barbaresi L. Progress in sound reflection measurements on noise barriers in situ : Inter Noise, 2012. – USA, New York City, august 19-22. – P. [301-312].

217 Weyna S. An experimental investigation on the acoustic energy over the flat barriers : ISMA21 – Noise and Engineering. – P. 1701-1706.

218 Hothersall, D.C., Efficiency of single noise barriers : Journal of Sound and Vibration, 1991. – Vol. 146, No. 2. –P. 303–322.

219 Buret M., Li K. M., Attenborough K. Scale model measurements of the sound field due to dipole sources in the presence of a barrier : The 8th International Congress on Sound and Vibration. – China, Hong Kong, July 2-6, 2001. – P. 1345-1352.

220 Asdrubali F., Pispola G., Baldinelli G. Optimization of in situ barrier intrinsic characteristics measurements : Eleventh International Congress on Sound and Vibration, Russia. – St. Petersburg, 4-8 July 2000. – P. 1473-1479.

221 Sauvage P. Impulsive method for road barriers: a first schedule of ten years of fracture : Inter Noise, 1996. – 25th Anniversary Congress-Liverpool. – P. 787-790.

222 Matui Y., Kaneko R., Murese M., Mizuno K. research on visualization of noise distribution between the Shinkansen and a noise barrier : Inter Noise, 1994. – Yokohama-Japan, august 29-31. – P. 135-138.

223 Lam Y. W., Monazzam M. R. A near field measurement method for the study diffusive barrier designs : Inter Noise, 2007. – Turkey, Istanbul, august 28-31. – P. 1-10.

- 224 Haberl J. Traffic management measures in Austria to reduce road noise: Inter Noise, 2007. – Turkey, Istanbul, august 28-31. – P. 2-10.
 - 225 Li K. M., Wong H. Y. In-situ determination of the barrier insertion loss in high-rise cities : Inter Noise, 2007. – Turkey, Istanbul, august 28-31. – P. 2-7.
 - 226 Amram M., Chvojka V. J., Droin L. Phase Reversal Barriers for Better Noise Control at Low Frequencies: Laboratory Versus Field Measurements : Noise Control Engineering Journal, 1987 . – № 28, No. 1. – P. 16-24.
 - 227 Matui Y., Kaneko R., Murase M., Mizuno K. Research on visualization of noise distribution between the Shinkansen and a noise barrier : Inter Noise, 1994. – Yokohama-Japan, august 29-31. – P. 135-144.
 - 228 Parzych D. Handling of Barriers in ISO 9613-2 : NOISE-CON, 2004. – Maryland, Baltimore, 12-14 July 2004. – [112-145].
 - 229 Swart W. J. R., Odijk M., Jabben J. Experimental validation of a model for barrier noise attenuation : Inter Noise, 2002. – USA, MI, Dearborn, august 19-21. – CD-ROM
 - 230 Крышов, С. И. Методика оценки акустической эффективности шумозащитных экранов в лабораторных условиях / С. И. Крышов, А. И. Никольский, И. Л. Шубин // Сборник трудов XIII сессии РАО «Архитектурная акустика. Шумы и вибрации», НИИСФ РААСН, М., 2003 – Т.5. – С.105-111.
 - 231 McMullen P., Nicholson R., Don C. G., Swenson G. G. Use impulse techniques in measuring the performance of modified wide acoustic barriers : Third International Congress on Air- and Vibration, 1994. – Canada, Montreal 13-15 June 1994. – P. 963-970.
 - 232 Asdrubali F., Pispola G., D'Alessandro F. Acoustic intrinsic performances of noise barriers: accuracy of in situ measurement techniques : Twelfth International Congress on Sound and Vibration, ICSV12, 2005. – Lisbon, 11-14 July. – P. 1-8.
- ГОСТ 52766-2007 «Дороги автомобильные общего пользования. Элементы обустройства. Общие требования». – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

- 233 ВСН 25-86 «Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» (п.16.2) [электронный ресурс]. – [2018]. – Режим доступа: http://gostbank.metaltorg.ru/data/norms_new/vsn/63.pdf
- 234 СТО Автодор 2.9-2014 «Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации акустических экранов на автомобильных дорогах Государственной компании «Автодор» – М.: Издательство ФГУП «Информавтодор», 2014. – 76 с.
- 235 ОДМ 218.2.013-2011 «Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам». – М.: Издательство ФГУП «Информавтодор», 2011. – 123 с.
- 236 EN 1793-5:2016 Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. Intrinsic characteristics. In situ values of sound reflection under direct sound field conditions
- 237 CSN EN 14389-1 - Road traffic noise reducing devices - Procedures for assessing long term performance - Part 1: Acoustical characteristics Paperback – 2015/ by METROLOGY AND TESTING CZECH OFFICE FOR STANDARDS
- 238 Шашурин, А. Е Расчет внешнего шума строительно-дорожных машин, оборудованных звукоизолирующими капотами Защита от повышенного шума и вибрации: Сборник докладов Все-российской научно-практической конференции с международным участием, 26-28 марта 2013 г., СПб/ Под ред. Н.И. Иванова. – СПб., 2013. – ISBN 978-5-98340-306-2
- 239 Тюрина, Н. В. Акустические экраны как универсальное средство экологической безопасности автомобильных дорог / Н. В. Тюрина // Сборник трудов II Всероссийский научно-практический семинар с международным участием «Экологизация автомобильного транспорта: передовой опыт России и стран Европейского Союза». – СПб., 2004. – С. 117-121.
- 240 Тюрина, Н. В. Новые методики расчёта акустических экранов / Н. В. Тюрина, В. П. Бобровских // Сборник докладов Всероссийской «Защита населения от повышенного шумового воздействия». – Санкт-Петербург, 21-22 марта 2006 г. – С. 323-325.

- 241 Бобровских, В. П. О коэффициенте дифракции акустических экранов / В. П. Бобровских, Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина // Труды четвёртой Всероссийской школы-семинара с международным участием «Новое в теоретической и прикладной акустике». – СПб.: 21 ноября 2007. – С. 141-147.
- 242 Соколов, С. В. К вопросу о расчёте эффективности шумозащитных экранов / С. В. Соколов, А. В. Соколов // Актуальные вопросы науки и техники. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. – Самара, 2015. – 159-162.
- 243 Скворцов, А. Н. Расчёт эффективности переносного акустического экрана / А. Н. Скворцов, А. П. Савельев, С. В. Глотов // Вестник Мордовского университета. – 2016. – Т. 26, № 1. – С. 58-69.
- 244 Тюрина, Н. В. Исследование акустических экранов / Н. В. Тюрина // XXVII сессия Российского акустического общества, посвященная памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А. В. Смольякова и В. И. Попкова. – Санкт-Петербург, 16-18 апреля 2014. – С. 2-15.
- 245 Kawai Y., Toyoda M. sound insulation performance of edge-effect suppression barriers : Inter Noise, 2012. – USA, New York City, august 19-22. – P. [121-124].
- 246 Menge C. Barrier diffraction and sound propagation in usdot's new traffic noise model : Inter Noise, 1996. – 25th Anniversary Congress-Liverpool. – P. 3121-3125.
- 247 Jean P., Defrance J., Gabillet Y. The importance of source type on the assessment of noise barriers : Journal of Sound and Vibration, 1999. – Vol. 226(2). – P. 201-216.
- 248 Morgan P. A., Hothersall D. C. Influence of shape and absorbing surface – a numerical study of railway noise barriers : Journal of Sound and Vibration, 1998. – Vol. 217(3). – P. 405-417.
- 249 Lim C. W., Cheong C., Shin S.-R., Lee S. Time-domain numerical computation of noise reduction by diffraction and finite impedance of barriers : Journal of Sound and Vibration, 2003. – Vol. 268. – P. 385-401.
- 250 Kawai Y., and Terai T. Application of integral equation methods to the calculation of sound attenuation by barriers : Applied Acoustics, 1990. – Vol. 31, No 1-3. – P. 101-117.

- 251 Cheng W. F., Ng C. F. The acoustic performance of an inclined barrier for high-rise residents : *Journal of Sound and Vibration*, 2001. – Vol. 242, No. 2. – P. 295-308.
- 252 Pilipchuk V. N. Non-smooth spatio-temporal transformation for impulsively forced oscillators with rigid barriers : *Journal of Sound and Vibration*, 2000. – Vol. 237, No. 5. – P. 915-919.
- 253 Fyfe K. R., Harrison C., Cremers L. Wave-based road noise barrier attenuation modeling : *Inter noise*, 1995. – Newport Beach, CA, USA, 10-12 July. – P. 1325-1328.
- 254 Yeung M. K. L., Li K. M. An investigation of diffraction characteristics of a crank barrier in high-rise cities : *Inter Noise*, 2006. – USA, Honolulu, Hawaii, December 3-6. – CD-ROM.
- 255 Law M. K., Li K. M. Prediction of barrier effects in the vicinity of irregular facades : *Inter Noise*, 2006. – USA, Honolulu, Hawaii, December 3-6. – CD-ROM.
- 256 Pearse J., Trevathan J. A numerical approach to the consideration of small noise barriers : *Twelfth Internatoinal Congress on Sound and Vibration, ICSV12*, 2005. – Lisbon, 11-14 July. – P. 1-8.
- 257 Yamamoto K., Hotta R., Takagi K. A method for the calculation of noise attenuation by a finite length barrier : *Inter Noise*, 1993. – Belgium, Leuven, August 24-26. – P. 1715-1717.
- 258 Svensson P., Andersson R., Vanderkooy J. An analytical time-domain model of edge diffraction : *NAM*, 1998. – Stockholm 7-9 September 1998. – P. [4-7].
- 259 Enflo B., Pavlov I. Difrraction of sound against barriers with simple edge profiles : *NAM*, 1998. – Stockholm 7-9 September 1998. – P. 2-3.
- 260 Seznec R. Diffraction of sound around barriers: Use of the Boundary Elements technique : *Journal of Sound and Vibration*, 1980. – Vol. 73, No2. – P. 195–209.
- 261 Pfretzschner J., Simon F., de la Colina C., Moreno A. Rating the insertion loss of noise barriers by a single number : *15th International Congress on Acoustics Trondheim*, Norway 26-30 June 1995. – P. 247-250.
- 262 Cianfrini C., Corcione M., Fontana L. Screening performance of pairs of diffusively reflecting traffic noise barriers: theory and experiments : *NVB*, November 2008. – P. 309-317.

- 263 Jolibois A., Duhamel D., Sparrow V. W., Defrance J., Jean P. Application of admittance optimization to the design of a low-height tramway noise barrier : Inter Noise, 2012. – USA, New York City, august 19-22. – P. [736-741].
- 264 Defrance J., Leissing T., Grannec F., Jean P., Lutgendorf D., Heinkele C., Clairbois J.-P. Holistic optimization of noise barriers from acoustical and non-acoustical parameters : Inter Noise, 2012. – USA, New York City, august 19-22. – P. [742-749].
- 265 Cheng W. F., Ng C. F. The Image Source-Virtual Barrier Model for Prediction of Reflection Effects from Barriers : Building Acoustics, 1999. – Vol. 6. – P. 85-100.
- 266 Cheng W. F., Ng C. F., Fung K. C. The theoretical model to optimize noise barrier performance at the window of a high-rise building : Journal of Sound and Vibration, 2000. – Vol. 238, No1. – P. 51–63.
- 267 Ouis D. Noise attenuation by a hard wedge-shaped barrier : Journal of Sound and Vibration, 2003. – Vol. 262. – P. 347-364.
- 268 Duhamel D. Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier : Journal of Sound and Vibration, 1996. – Vol. 197, No5. – P. 547-571.
- 269 De Lacerda L. A., Wrobel L. C., Mansur W. J. A dual boundary element formulation for sound propagation around barriers over an impedance plane : Journal of Sound and Vibration, 1997. – Vol. 202, No2. – P. 235-247.
- 270 Thorsson P. J. Optimization of Low-Height Noise Barriers using the Equivalent Sources Method : Acta Acust, 2000. – Vol. 86, No 22. – P. 811-820.
- 271 Dezelak F. Calculation of additional dimensions of noise barriers with insufficient noise reduction : Inter Noise, 1996. – 25th Anniversary Congress-Liverpool. – P. 775-778.
- 272 Li K. M., Wang Q. A bem approach to assess the acoustic performance of noise barriers in a refracting atmosphere : Journal of Sound and Vibration, 1998. – Vol. 211, No4. – P. 663-681.
- 273 Pfretzschner J., Simon F., de la Colina C., Moreno A. A rating index for estimating insertion loss of noise barriers under traffic noise conditions : Acustica-Acta Acustica, 1996. – Vol. 82, No3. – P. 504–508.

- 274 Kawai Y., and Terai T. Application of integral equation methods to the calculation of sound attenuation by barriers : *Applied Acoustics*, 1990. – Vol. 31, No1-3. – P. 101–117.
- 275 Walerian E., Janczur R. Noise shielding efficiency an urban system : *Journal of Sound and Vibration*, 1998. – Vol. 212, No2. – P. 187-214.
- 276 Soenarko B., Seybert A. F. Application of the Boundary Element Method to Acoustic Barrier Analysis : *Third International Congress on Air- and Vibration*, 1994. – Canada, Montreal 13-15 June 1994. – P. 831-828.
- 277 Clairbois J.-P., de Roo F., Garai M., Conter M., Defrance J., Oltean-Dumbrava C., Fusco I. Quiesst: toward a better knowledge and understanding of how efficient noise barriers could actually be device : *Inter Noise*, 2010. – Portugal, Usbon, 15-16 June. – P. 1-8.
- 278 Defrance J., Teytu M., Jean P. Diffused sound reflection effect of non flat noise barriers : *Inter Noise*, 2007. – Turkey, Istanbul, august 28-31. – P. 1-9.
- 279 May D. N., Osman M. M. Highway noise barriers: New shapes: *Journal of Sound and Vibration*, 1980. – Vol. 71, No1. – P. 73–101.
- 280 Foss R. N. Measuring the Radiating Height of Vehicles for Calculating the Effectiveness of sound Barriers : *Noise Control Engineering Journal*, 1979 . – Vol. 13, No 3. – P. 122-128.
- 281 Legouis T., Berengier M. «Ecran» prediction software to evaluate the efficiency of traffic noise barriers : *International Institute of Noise Control Engineering*, 1995. – Vol. 1. – P. 263-268.
- 282 Menounou P. A correction to Maekawa's curve for the insertion loss behind barriers : *Journal off the Acoustical Society of America*, 2001. – Vol. 110, No. 4. – P. 1828-1838.
- 283 Sarigul-Klijn N., Karnopp D. Random and periodic square wave barriers in noise control : *NOISE-CON*, 2000. – USA, California, Newport Beach, CA, 03-05 December. – P. [393-396].
- 284 Rousseaux P. Sound attenuation by wide barriers on the ground : *Acustica*, 1984. – No. 55. – P. 293–300.

- 285 Salomons E. M. Diffraction by a screen in downwind sound propagation: A parabolic-equation approach : Journal off the Acoustical Society of America, 1994. – Vol. 95, No. 6. – P. 3109-3116.
- 286 Koh H., Möser M. Influence of Actively Controlled Surface Impedance of Upper Sections Attached to Noise Barriers : Building Acoustics, 2004. – Vol. 11, №2. – P. 115-131.
- 287 Gerges S. N. Y., Calza A. J. Acoustic Barriers: Analytical Methods, Boundary Element Method and Experimental Verification : Building Acoustics, 2002. – Vol. 9, №3. – P. 167-190.
- 288 Никольский, А. И. Расчёт эффективности акустических экранов / А. И. Никольский, Н. В. Тюрина // Сборник трудов 2-ой Всероссийской школы-семинара «Новое в теоретической и прикладной акустике», под ред. Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург, 17-18 октября, 2002. –С.109-114.
- 289 Embleton T.F.W. Tutorial on sound propagation outdoors : Journal of Acoustical Society of America, 1996. – Vol. 100, No. 1. – P. 31–48.
- 290 ГОСТ 30690-2000 Экраны акустические передвижные. Методы определения ослабления звука в условиях эксплуатации / Н. В. Тюрина [и др.]. – М: Издательство стандартов, 2000. – 19 с.
- 291 Скучик Е. Основы акустики: в 2 т. / Е. Скручик. – М.: Изд-во «Мир», 1976. – Т. 2. – 542 с.
- 292 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. 426-448.
- 293 Maekawa Z. Noise Reduction by Screens : Appl. Acoust, 1968. – Vol. 1. – P. 35-53.
- 294 Maekawa Z. Environmental and architectural acoustics : II UK, London. -E&FN-Spon. – 1994. – 377 p.
- 295 Maekawa Z. Recent problems with noise barriers : Proceedings of international conference Noise93, May 31 June 3,1993, St.Petersburg, Russia.

- 296 Maekawa Z. Experimental study on acoustical designing of a screen for noise reduction : J.Acoust.Soc.Japan. – Vol. 18. – P. 187-196.
- 297 Maekawa Z. Simple estimation methods for reduction by variously shaped barriers. : Arch. Acoustics, 1985. – Vol.10 (4). – P. 369-382.
- 298 Maekawa, Z. Shielding Highway Noise : Noise Control Engineering Journal, 1977. – Volume (9). – P. 38-44.
- 299 Kurze U.J., Anderson G.S. Sound Attenuation by Barriers : Applied Acoustics, 1971. – Vol. 4. №1. – P. 35-53.
- 300 Шубин, И. Л. Методика составления шумовых карт для оценки акустического загрязнения городов / И. Л. Шубин [и др.] // Academia. Архитектура и строительство. 2008. – № 3. – С. 60-61.
- 301 Шубин, И. Л. Шумовой мониторинг городских территорий / И. Л. Шубин, И.Е Цукерников // Academia. Архитектура и строительство. –2009. – № 5. – С. 94-100.
- 302 Кирюшина, Н. К. Перспективы снижения шумового загрязнения Москвы при реализации актуализированного генерального плана / Н. К. Кирюшина, И. А. Гончаренко, А. И. Пузакова // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 89-93.
- 303 Овсянников, М.С. Геометрическое моделирование распространения транспортного шума на примагистральных территориях городов / М. С. Овсянников // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 117-119.
- 304 Бобылев, В. Н. Снижение транспортного шума как основа благоприятной акустической среды жилища современных городов / В. Н. Бобылев [и др.] // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 120-127.
- 305 Аистов, В. В. Оценка влияния шума железнодорожных поездов на селитебные территории и комплекс мероприятий по его снижению / В. В. Аистов, И. Л. Шубин, Н. Д. Николов // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 216-223.

- 306 Николов, Н. Д. Теоретическое исследование характера снижения шума поездов» / Н. Д. Николов, И. Л. Шубин, // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 267-269.
- 307 ГОСТ Р 54932-2012 «Экраны акустические для железнодорожного транспорта. Методы контроля». – М.: Стандартиформ, 2013. – 12 с.
- 308 Куклин, Д.А. Проблема снижения внешнего шума поездов в источнике и на пути распространения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук 01.04.06. / Куклин Денис Александрович – СПб., 2015. – 36 с.
- 309 Матвеев, П.В. Расчёт и снижение шума качения поездов: автореферат дис. кандидата технических наук : 01.04.06 / Матвеев Пётр Владимирович; - СПб, 2014. – 23 с.
- 310 ГОСТ 8486-86 «Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия». – М.: Стандартиформ, 2007. – 8 с.
- 311 СТО 12601302–001–2014 Изделия блоки стеновые мелкие из Tecolit. Технические условия [электронный ресурс]. – [2018]. – Режим доступа: <http://www.tecolit.lt/cms/files/docs/%D0%A1%D0%A2%D0%9E-12601302%E2%80%93001%E2%80%932014-Ver.6-30.08.2016-%D0%90-%D0%A0.pdf>
- 312 «Инструкции по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах». [электронный ресурс]. – [2018]. – Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293777/4293777092.pdf>
- 313 ГОСТ 17187-2010 «Шумомеры. Часть 1. Технические требования». – М.: Стандартиформ, 2012. – 32 с.
- 314 СН 2.2.4/2.1.8.562–96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» [электронный ресурс]. – [2018]. – Режим доступа: <https://www.stroimdom.com.ua/files/docs/sn-2.2.4-2.1.8.562-96.pdf>
- 315 ГОСТ 20444–2014 «Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики». – М.: Стандартиформ, 2015. – 18 с.

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

ПРИЛОЖЕНИЯ

к диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

на тему:

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ
АКУСТИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОСНОВНЫМИ ТИПАМИ
ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ**

01.04.06 – Акустика

Санкт-Петербург
2018

Приложение А

Измерение звукоизоляции

Шумозащитные экраны из дерева

Таблица А.1

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Индекс звукоизоляции транспортного шума, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	12	16	15	17	14	18	16	16	Шумозащитный экран, установленный на объекте РОСАВТОДОРА (автодороге М-9 «Балтия» (км 615))

Таблица А.2

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Индекс звукоизоляции транспортного шума, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	12	14	18	19	18	19	17	17	Шумозащитный экран, установленный на объекте РОСАВТОДОРА (автодороге М-9 «Балтия» (км 615))

Таблица А.3

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Индекс звукоизоляции транспортного шума, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	13	15	18	18	21	23	25	18	Шумозащитный экран, установленный на объекте РОСАВТОДОРА (автодороге Р- 23 «Псков» (км 303))

Шумозащитные экраны из оцинкованной стали

Таблица А.4

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	12	14	15	16	16	19	23	15	Шумозащитный экран, установленный на кольцевой автодороге А-108 «Московское большое кольцо», Северный обход г. Дмитров (км 0+672 - км 0+852)

Таблица А.5

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	13	15	16	17	18	22	25	17	Шумозащитный экран, установленный на кольцевой автодороге А-108 «Московское большое кольцо», Северный обход г. Дмитров (км 0+466 + 0+730)

Таблица А.6

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	14	14	13	15	16	18	23	11	Шумозащитный экран, установленный на автодороге А- 108 «Московское большое кольцо», Северный обход г. Дмитров (км 4+410 – км 4+640)

Таблица А.7

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	16	16	17	18	18	25	27	18	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-4 «Дон» (км 57+264 – км 57+594)

Таблица А.8

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	13	13	14	17	16	18	21	16	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-4 «Дон» (км 57+171 – км 57+416)

Таблица А.9

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	12	17	16	14	16	19	21	15	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М- 10 «Россия» (км 55+237 – км 56+202)

Таблица А.10

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	11	13	12	11	13	15	17	12	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М- 10 «Россия» (км 50+745 – км 51+584)

Таблица А.11

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	11	13	12	11	13	15	17	12	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-10 «Россия» (км 50+666 – км 50+730)

Таблица А.12

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	11	12	13	15	17	21	24	15	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-5 «Урал» (км 57+920 – км 59+700)

Таблица А.13

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	19	20	21	21	23	24	27	22	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-8 «Холмогоры» (км 28+350 – км 29+450)

Таблица А.14

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	13	20	19	16	17	20	21	16	Шумозащитный экран, установленный на автодорога М-7 «Волга» (участок км 57+000)

Таблица А.15

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	12	19	18	14	15	19	22	15	Шумозащитный экран, установленный на автодорога М-7 «Волга» (участок км 57+000)

Таблица А.16

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	13	18	19	14	14	18	20	16	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-7 «Волга» (участок км 57+000)

Таблица А.17

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	15	15	15	17	18	23	26	17	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-9 «Балтия» (км 36+350 – км 37+010)

Таблица А.18

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	15	14	14	16	18	22	25	16	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-9 «Балтия» (км 31+600 – км 33+420)

Таблица А.19

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	12	12	11	10	12	13	13	11	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-5 «Урал», подъезд к г. Самара (км 9+500)

Таблица А.20

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	9	15	14	14	20	25	29	14	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-7 «Волга» (км 572+091 – км 572+160)

Таблица А.21

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	10	15	18	15	18	19	29	16	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-7 «Волга» (км 572+091 – км 572+160)

Таблица А.22

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	10	13	13	12	16	16	13	13	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-7 «Волга» (км 620+383 – км 620+575)

Таблица А.23

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	13	14	16	15	13	16	16	15	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-7 «Волга» (км 620+683 – км 620+917)

Таблица А.24

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	13	14	15	17	16	14	8	15	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-7 «Волга»

Таблица А.25

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	8	11	16	14	17	17	14	14	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-5 «Урал» (км 384)

Таблица А.26

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	10	14	15	13	16	17	15	14	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-5 «Урал» (км 1472+970 – км 1473+805)

Таблица А.27

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	8	10	12	12	12	16	12	11	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-5 «Урал» (км 1381 – км 1382)

Таблица А.28

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	11	11	16	19	18	15	14	18	Шумозащитный экран, установленный на автодороге А- 148 (у с. Эстосадок)

Шумозащитные экраны из металла и поликарбоната

Таблица А.29

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	9	10	11	13	14	17	21	13	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-2 «Крым» (км 36+500 – км 37+190)

Таблица А.30

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	12	12	11	13	13	14	15	12	Шумозащитный экран, установленный на автодороге М-8 «Холмогоры» (км 25+240 – км 27+970)

Таблица А.31

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	12	11	12	15	18	23	23	15	Шумозащитный экран, установленный на автодороге А- 147 (у с. Веселое)

Таблица А.32

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	12	13	17	20	20	25	29	19	Шумозащитный экран, установленный на кольцевой автодороге А-118 (54 км внешнего кольца). <i>Звукопоглощающая секция.</i>

Таблица А.33

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	11	11	13	18	18	20	25	17	Шумозащитный экран, установленный на кольцевой автодороге А-118 (36 км внешнего кольца)

Таблица А.34

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	13	14	10	13	13	11	15	13	Шумозащитный экран, установленный на автодороге Р-21 «Кола» (км 82+750 – км 82+850)

Таблица А.35

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	13	11	13	17	15	15	21	15	Шумозащитный экран, установленный на автодороге Р-21 «Кола» (км 175+050 - км 175+509)

Таблица А.36

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	10	11	12	14	18	18	20	13	Шумозащитный экран, установленный на автодороге Р-21 «Кола» (км 175+050 - км 175+509)

Таблица А.37

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	10	11	12	15	16	19	21	14	Шумозащитный экран, установленный на кольцевой автодороге А-118 (км 111+301 – км 111+767 внутреннего кольца)

Таблица А.38

№ п/п	Индекс звукоизоляции, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эквивалентные уровни звука, дБА	Примечание
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	13	14	14	17	20	19	21	17	Шумозащитный экран, установленный на кольцевой автодороге А-118 (59 км внешнего кольца)

Приложение Б

Измерение звукопоглощения

Шумозащитные экраны из оцинкованной стали

Таблица Б.1

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,45
2	1000	0,38
3	2000	0,18
4	4000	0,05
5	8000	0,80

Таблица Б.2

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,65
2	1000	0,59
3	2000	0,74
4	4000	0,71
5	8000	0,62

Таблица Б.3

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,71
2	1000	0,85
3	2000	0,85
4	4000	0,62
5	8000	0,80

Таблица Б.4

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,52
2	1000	0,09
3	2000	0,62
4	4000	0,55
5	8000	0,68

Таблица Б.5

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,42
2	1000	0,22
3	2000	0,01
4	4000	0,14
5	8000	0,71

Таблица Б.6

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,34
2	1000	0,26
3	2000	0,22
4	4000	0,38
5	8000	0,01

Таблица Б.7

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,22
2	1000	0,38
3	2000	0,14
4	4000	0,38
5	8000	0,34

Таблица Б.8

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,05
2	1000	0,01
3	2000	0,18
4	4000	0,22
5	8000	0,26

Таблица Б.9

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,05
2	1000	0,30
3	2000	0,83
4	4000	0,98
5	8000	0,85

Таблица Б.10

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,59
2	1000	0,26
3	2000	0,38
4	4000	0,71
5	8000	0,65

Таблица Б.11

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,30
2	1000	0,42
3	2000	0,34
4	4000	0,30
5	8000	0,18

Таблица Б.12

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,34
2	1000	0,26
3	2000	0,34
4	4000	0,22
5	8000	0,34

Таблица Б.13

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,34
2	1000	0,18
3	2000	0,45
4	4000	0,26
5	8000	0,22

Таблица Б.12

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,77
2	1000	0,95
3	2000	0,69
4	4000	0,85
5	8000	0,95

Таблица Б.15

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,90
2	1000	0,95
3	2000	0,80
4	4000	0,90
5	8000	0,80

Таблица Б.16

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0.95
2	1000	0.83
3	2000	0.98
4	4000	0.9
5	8000	0.95

Таблица Б.17

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,09
2	1000	0,05
3	2000	0,22
4	4000	0,38
5	8000	0,98

Таблица Б.18

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,05
2	1000	0,05
3	2000	0,14
4	4000	0,26
5	8000	0,42

Таблица Б.19

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,71
2	1000	0,34
3	2000	0,34
4	4000	0,34
5	8000	0,14

Таблица Б.20

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,01
2	1000	0,42
3	2000	0,42
4	4000	0,42
5	8000	0,74

Таблица Б.21

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,01
2	1000	0,42
3	2000	0,42
4	4000	0,74
5	8000	0,74

Таблица Б.22

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,01
2	1000	0,01
3	2000	0,42
4	4000	0,42
5	8000	0,42

Таблица Б.23

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,62
2	1000	0,49
3	2000	0,01
4	4000	0,49
5	8000	0,80

Таблица Б.24

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,26
2	1000	0,68
3	2000	0,59
4	4000	0,83
5	8000	0,65

Таблица Б.25

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,83
2	1000	0,88
3	2000	0,49
4	4000	0,68
5	8000	0,30

Таблица Б.26

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,18
2	1000	0,34
3	2000	0,49
4	4000	0,30
5	8000	0,30

Таблица Б.27

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,62
2	1000	0,52
3	2000	0,59
4	4000	0,62
5	8000	0,59

Таблица Б.28

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,22
2	1000	0,52
3	2000	0,38
4	4000	0,34
5	8000	0,34

Таблица Б.29

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,38
2	1000	0,65
3	2000	0,62
4	4000	0,22
5	8000	0,18

Таблица Б.30

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,65
2	1000	0,18
3	2000	0,26
4	4000	0,38
5	8000	0,14

Таблица Б.31

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,34
2	1000	0,65
3	2000	0,55
4	4000	0,62
5	8000	0,80

Таблица Б.32

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,68
2	1000	0,81
3	2000	0,65
4	4000	0,88
5	8000	0,34

Шумозащитные экраны из металла и поликарбоната

Таблица Б.33

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,30
2	1000	0,74
3	2000	0,88
4	4000	0,05
5	8000	0,09

Таблица Б.34

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,93
2	1000	0,74
3	2000	0,62
4	4000	0,71
5	8000	0,68

Таблица Б.35

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,52
2	1000	0,74
3	2000	0,98
4	4000	0,77
5	8000	0,77

Шумозащитные экраны из дерева

Таблица Б.36

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,85
2	1000	0,8
3	2000	0,38
4	4000	0,74
5	8000	0,85

Таблица Б.37

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,88
2	1000	0,93
3	2000	0,68
4	4000	0,95
5	8000	0,38

Таблица Б.38

№ п/п	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц	Коэффициент звукопоглощения панели акустической
1	500	0,88
2	1000	0,93
3	2000	0,68
4	4000	0,95
5	8000	0,38

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

**Полученные патенты и нормативно-
техническая документация, разработанная
при участии автора**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 104943

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ШУМА

Патентообладатель(ли): *ООО "ДорАмбиенте" (RU)*

Автор(ы): *Соколенко Филипп Вячеславович (RU), Сахно Сергей Степанович (RU), Семенов Николай Геннадьевич (RU), Тюрина Наталья Васильевна (RU), Иванов Николай Игоревич (RU), Шашурин Александр Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2010141811

Приоритет полезной модели **01 октября 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **27 мая 2011 г.**

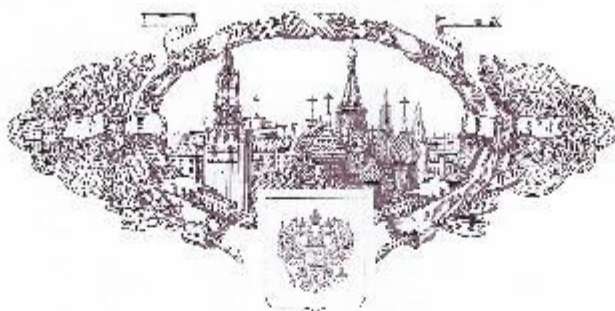
Срок действия патента истекает **01 октября 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 105311

СТРОИТЕЛЬНАЯ ШУМОЗАЩИТНАЯ ПАНЕЛЬ

Патентообладатель(и): *ООО "ДорАмбиенте" (RU)*

Автор(ы): *Соколенко Филипп Вячеславович (RU), Сахио Сергей Степанович (RU), Семенов Николай Геннадьевич (RU), Тюрина Наталья Васильевна (RU), Иванов Николай Игоревич (RU), Шанурин Александр Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2010141812

Приоритет полезной модели 01 октября 2010 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений
моделей Российской Федерации 10 июня 2011 г.

Срок действия патента истекает 01 октября 2020 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симанов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 147880

СТРОИТЕЛЬНАЯ ШУМОЗАЩИТНАЯ ПАНЕЛЬ

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью "Институт акустических конструкций" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014110581

Приоритет полезной модели 19 марта 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 17 октября 2014 г.

Срок действия патента истекает 19 марта 2024 г.

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 147879

**СЕКЦИЯ МАЛОГО ШУМОЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА
РЕЛЬСОВОГО ПУТИ**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной
ответственностью "Институт акустических конструкций"*
(RU)

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014125612

Приоритет полезной модели 24 июня 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 17 октября 2014 г.

Срок действия патента истекает 24 июня 2024 г.



Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 168981

Дифрагирующая панель для шумозащитного экрана

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
"Институт акустических конструкций" (RU)*

Авторы: *Шашурин Александр Евгеньевич (RU), Бужинский
Константин Владимирович (RU), Светлов Валерий
Валериевич (RU), Бойко Юлия Сергеевна (RU), Ким Виталий
Игоревич (RU), Клюпа Татьяна (RU)*

Заявка № 2016113102

Приоритет полезной модели 05 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 01 марта 2017 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 05 апреля 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 172683

Панель резонатор

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
"Институт акустических конструкций" (RU)*

Авторы: *Шашурин Александр Евгеньевич (RU), Бужинский
Константин Владимирович (RU), Светлов Валерий
Валериевич (RU), Бойко Юлия Сергеевна (RU), Ким Виталий
Игоревич (RU), Гришина Софья Юрьевна (RU)*

Заявка № 2016113103

Приоритет полезной модели 05 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 19 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 05 апреля 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Налиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 147880

СТРОИТЕЛЬНАЯ ШУМОЗАЩИТНАЯ ПАНЕЛЬ

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью "Институт акустических конструкций" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014110581

Приоритет полезной модели 19 марта 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 17 октября 2014 г.

Срок действия патента истекает 19 марта 2024 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий





УТВЕРЖДЕН
приказом Государственной компании
«Российские автомобильные дороги»
от «16» сентября 2014 г. № 193

**Стандарт
Государственной
компании «Автодор»**

**СТО АВТОДОР
2.9-2014**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ,
СТРОИТЕЛЬСТВУ И ЭКСПЛУАТАЦИИ
АКУСТИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ
НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ
ГОСУДАРСТВЕННОЙ КОМПАНИИ
«АВТОДОР»**

Москва 2014

ОС ПП «Техэксперт»

4/

**МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА
И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

СВОД ПРАВИЛ

СП *254* .1325800.2016

**ЗДАНИЯ И ТЕРРИТОРИИ
ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШУМА**

Издание официальное

Москва 2016

ОС НТИ "Техэксперт"

УТВЕРЖДЕН
приказом Министерства строительства и
жилищно-коммунального хозяйства
Российской Федерации
от « 3 » сентября 2016 г. № 893/пр

**ЗДАНИЯ И ТЕРРИТОРИИ. ПРАВИЛА
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ШУМА
ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ**

Издание официальное

Москва 2016

ЭСПИИ "Техэксперт"

613/03-16



Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I»
(ФГБОУ ВО ПГУПС)
190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

СОГЛАСОВАНО

ЗАМЕСТИТЕЛЬ МИНИСТРА
СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-
КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Е.О. ШЧЕПА

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Шумозащитные мероприятия для участка Москва – Казань
высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань –
Екатеринбург. Технические нормы и требования к
проектированию и строительству

Изменения №1

РАЗРАБОТАНО

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО ПГУПС



Т.С. Титова

Санкт-Петербург 2016

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ"

РАСПОРЯЖЕНИЕ

от 20 марта 2015 года N 698р

Об утверждении и введении в действие Методических указаний по применению комплекса средств шумозащиты и технических требований к шумозащитным накладкам на шейку рельса, Альбома технических решений для проектирования комплекса шумозащитных мероприятий

В целях применения различных средств защиты от шума и их оптимального сочетания в процессе устройства для повышения эффективности шумозащитных мероприятий:

1. Утвердить и ввести в действие с 1 апреля 2015 года для опытного применения прилагаемые:

а) Методические указания по применению комплекса средств шумозащиты и технических требований к шумозащитным накладкам на шейку рельса*;

* Приложение не приводится. - Примечание изготовителя базы данных.

б) Альбом технических решений для проектирования комплекса шумозащитных мероприятий*.

* Приложение не приводится. - Примечание изготовителя базы данных.

2. Начальникам департаментов и управлений, руководителям филиалов и других структурных подразделений ОАО "РЖД", генеральному директору ОАО "Росжелдорпроект" Волкову А.Н. (по согласованию) обеспечить в установленном порядке изучение методических указаний и альбома технических решений, утвержденных настоящим распоряжением, и их применение в работе.

Старший
вице-президент ОАО "РЖД"
В.А.Гапанович

Электронный текст документа
подготовлен АО "Кодекс" и сверен по:
рассылка

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО
ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

	СП –
С В О Д	2016
П Р А В И Л	(проект, 1-я редакция)

**Защита от шума для высокоскоростных
железнодорожных линий**

Правила проектирования и строительства

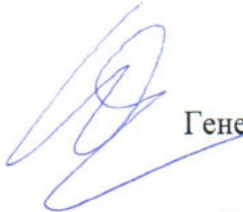
СП

Настоящий проект свода правил не подлежит применению до его принятия

Санкт-Петербург
2016

Общество с ограниченной ответственностью «ФОРТ»

ИНН /КПП 7816566266 / 781601001
Р/сч. № 40702810910000007608
Филиал Красногвардейский ПАО Банк ВТБ
в г.Санкт-Петербурге
БИК 044030704
Р/сч. № 40702810910000007608
Телефон: (812) 245-24-80


УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Форт»

24 апреля 2018 года

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук Шашурин А.Е.

Комиссия в составе руководителя направления шумозащитных конструкций Добровольского Юрия Викторовича и технического директора Кайдалова Андрея Николаевича составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Научное обоснование и применение новых технических и технологических решений для снижения акустического загрязнения основными типами шумозащитных экранов» соискателя степени доктора технических наук Шашурина А.Е. использованы при проектировании и производстве шумозащитных экранов для объекта: «Установка акустического экрана со стороны 2 главного пути на ПК247-ПК249 перегона Левашово-Белоостров на участке Санкт-Петербург-Выборг» и др. объектах.

По рекомендациям автора изготавливаются долговечные экраны из щепобетона, которые зарекомендовали себя как надежный качественный материал для снижения шума от автотранспорта, железных дорог и промышленных установок.

Состав комиссии:

Руководитель направления
шумозащитных конструкций



Добровольский Ю.В.

Технический директор



Кайдалов А.Н.

Генеральный директор
ООО «ФОРТ»





Б.П. Юрченко

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования

**«Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I»
(ФГБОУ ВО ПГУПС)**

Московский пр., д.9, Санкт-Петербург, 190031
Телефон: (812) 457-86-28, факс: (812) 315-26-21
E-mail: dou@pgups.edu, http://www.pgups.ru
ОКПО 01115840, ОГРН 1027810241502,
ИНН 7812009592/ КПП 783801001

УТВЕРЖДАЮ

**Первый проректор - проректор
по учебной работе**



 **Л.С. Блажко**
2018

14.05.2018 № 004.837.880/193

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов докторской диссертационной работы

Шашурина Александра Евгеньевича

**на тему «Научное обоснование и применение новых технических и
технологических решений для снижения акустического загрязнения
основными типами шумозащитных экранов»**

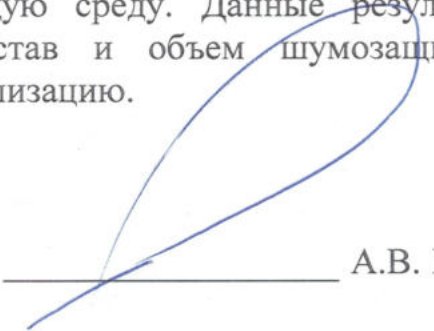
Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Шашурина А.Е. «Научное обоснование и применение новых технических и технологических решений для снижения акустического загрязнения основными типами шумозащитных экранов» использованы при разработке специальных технических условий:

– «Шумозащитные мероприятия для участка Москва-Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва-Казань-Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству.» (2014 г.);

– «Шумозащитные мероприятия для участка Москва-Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва-Казань-Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству. Изменения №1» (2016 г.).

Результаты диссертационной работы используются для оценки и разработки мероприятий по снижению акустического воздействия высокоскоростных поездов на окружающую среду. Данные результаты позволяют более точно определить состав и объем шумозащитных мероприятий, и сократить затраты на их реализацию.

Начальник НИЧ


А.В. Бенин

Исх. № 144/ от « 15 » мая 2018 годаУТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «ДорМеталл»
И.В. Рязанцев**АКТ**о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук Шашурин А.Е.

Комиссия в составе начальника производственно-технического отдела Дручевского Д.Н. и ведущего специалиста группы строительного контроля Воронина А.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Научное обоснование и применение новых технических и технологических решений для снижения акустического загрязнения основными типами шумозащитных экранов» соискателя ученой степени доктора технических наук Шашурина А.Е. использованы при производстве новых конструкций шумозащитных экранов из импрегнированной древесины. Предложенные автором конструкции обладают высокой долговечностью, низкой себестоимостью и высокой акустической эффективностью.

Экраны, произведенные по рекомендациям Шашурина А.Е. установлены на таких объектах, как:

-«Строительство и реконструкция автомобильной дороги М-20 Санкт-Петербург – Псков – Пустошка – Невель до границы с Республикой Беларусь: Реконструкция подъезда к МАПП Лобок от автомобильной дороги М-20 Санкт-Петербург – Псков – Пустошка – Невель до границы с Республикой Беларусь, Псковская область»;

-«Установка шумозащитного экрана на автомобильной дороге Р-23 Санкт-Петербург-Псков-Пустошка-Невель-граница с Республикой Белоруссия в г. Псков на участке км 290+650 – км 291+200, Псковская область» и др.

За срок эксплуатации экраны не ухудшили своих заявленных характеристик. Компания «ДорМеталл» продолжает выпускать продукцию по рекомендациям автора.

Главный инженер
ООО «ДорМеталл»

А.П. Комаров



ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"Институт "Трансэкопроект"

(ЗАО "Институт "Трансэкопроект")
ул. Новорощинская, д. 4, лит. А, Санкт-Петербург, 196084
Тел.: +7 (812) 331 68 74; Факс: +7 (812) 331 68 75
E-mail: tep@transecoproject.ru

ОГРН 1137847041683

ИНН 7810409330 КПП 781001001

28.05.18 № 548/1/18
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ЗАО «Институт «Трансэкопроект»



Н.Н. Минина

2018 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук А.Е. Шашурина**

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы А.Е. Шашурина «Научное обоснование и применение новых технических и технологических решений для снижения акустического загрязнения основными типами шумозащитных экранов» были учтены при разработке СТО АВТОДОР 2.9-2014 «Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации акустических экранов на автомобильных дорогах Государственной Компании «Автодор», в частности, с участием автора были разработаны следующие разделы СТО:

- раздел 8 «Нагрузки и воздействия на акустические экраны»;
- раздел 9 «Требования к элементам конструкции акустических экранов»;
- раздел 12 «Требования к размещению акустических экранов»;
- раздел 13 «Требования к устройству дверей и контр-экранов»;
- раздел 14 «Эксплуатационные характеристики акустических экранов»;
- раздел 15 «Требования к содержанию акустических экранов»;
- раздел 17 «Регламент проведения периодической проверки»;
- каталог типовых конструктивных решений акустических экранов;
- типовые поперечные профили и решения по обочине, типовые решения по обеспечению водоотвода с проезжей части в местах установки акустических экранов, типовые решения, обеспечивающие совмещение конструкции акустических экранов с элементами обустройства дороги.

Данный СТО рассмотрен на техническом совете ГК «Автодор» и утвержден приказом Государственной компании «Российские автомобильные дороги» от «16» сентября 2014 г. №193.

Заместитель технического директора
ЗАО «Институт «Трансэкопроект»

П.О. Лебедев



**федеральное государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук»
(НИИСФ РААСН)**

Исх. от 30.05.2018 № 335-1/34

УТВЕРЖДАЮ
Директор НИИСФ РААСН
Шубин И.Л.

« » 20 г.

**АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук Шашурин А.Е.**

Настоящим подтверждаю, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук Шашурин А.Е. «Научное обоснование и применение новых технических и технологических решений для снижения акустического загрязнения основными типами шумозащитных экранов» внедрены в практику посредством СП 276.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков»

Свод правил введен в действие на территории Российской Федерации приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 03.12.2016 N 893/пр с датой введения с 04.06.2017 г.

Старший научный сотрудник НИИСФ РААСН В.А. Аистов

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

АО «МОСГИПРОТРАНС»

В. П. Левшунов

«31» мая 2018 г.

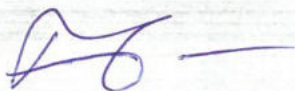


АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук Шашурина А.Е.

Комиссия в составе начальника технического отдела — главного специалиста Гризова К.А. и главного инженера проекта Васюковой О.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук Шашурина А.Е. «Научное обоснование и применение новых технических и технологических решений для снижения акустического загрязнения основными типами шумозащитных экранов» использованы при разработке проекта «Участок Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва — Казань — Екатеринбург». Разработанные А.Е. Шашуриным шумозащитные экраны с высокой акустической долговечностью были предложены к установке при проектировании средств шумозащиты. На участке работ «Комплекс работ по подготовке территории строительства участка ст. Железнодорожная 23 км (вкл.) — ст. Владимир ВСМ (вкл.)», «Строительство участка ст. Железнодорожная 23 км(вкл.) — ст. Владимир ВСМ (вкл.)», «Комплекс работ по подготовке территории строительства участка ст. Владимир ВСМ (искл.) — ст. Аэропорт ВСМ (вкл.) (Н. Новгород)», «Строительство участка ст. Владимир ВСМ (искл.) — ст. Аэропорт ВСМ (вкл.) (Н. Новгород)» по разработанному автором, в котором учтены предлагаемые автором конструкции было получено положительное заключение Федерального автономного учреждения «Главное управление государственной экспертизы».

Начальник технического отдела —
главный специалист



К. А. Гризов

ГИП



Васюкова О. А.