



На правах рукописи

БОРЦОВА СВЕТЛАНА СЕРГЕЕВНА

**МЕТОДИКА ВЫБОРА И ОПТИМИЗАЦИИ ШУМОЗАЩИТНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ
ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

1.3.7 – Акустика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Буторина Марина Вадимовна

Официальные оппоненты:

Элькин Юрий Иосифович – д.т.н., профессор кафедры «Техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва.

Иголкин Александр Алексеевич – д.т.н., профессор кафедры автоматических систем энергетических установок имени академика РАН Владимира Павловича Шорина ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

Ведущая организация – ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва.

Защита состоится «26» декабря 2024 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.2.272.02 в ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1, ауд. 214.

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

Автореферат разослан 22.10.2024 г. Отзывы на автореферат направлять по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 1-ая Красноармейская ул., д. 1, каф. Е5.

И.о. учёного секретаря
диссертационного совета

Тюрина Наталья Васильевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Снижение вредного шумового воздействия транспорта на население с минимальными затратами – важная социально-экономическая задача. Для её решения необходима точная оценка акустической и экономической эффективности шумозащитных конструкций (ШЗК) в их взаимосвязи. Оценка акустической эффективности шумозащитных экранов изучена достаточно полно и корректно определяется при помощи действующей нормативно-технической документации (НТД). Существующие же методики расчёта акустической эффективности земляных сооружений (насыпей, выемок и др.), отражённые в НТД, не точны, носят противоречивый характер и не позволяют однозначно сравнить применение разных ШЗК. Формулы расчёта и акустической, и экономической эффективности конструкций должны отражать их зависимость от высоты (ключевого параметра) и других конструктивных параметров.

Помимо ШЗК применяются меры защиты в источнике шума и самих зданиях, шумозащитные насаждения. Поиск экономически оптимального сочетания этих мер с конструкциями разных высот – путь к снижению затрат на шумозащитный комплекс. Необходима разработка методики, содержащей рекомендации по выбору состава шумозащитного комплекса требуемой акустической эффективности, и оптимального по критерию экономической эффективности.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами изучения и снижения шума транспорта в жилой застройке в нашей стране занимались В.А. Аистов, М.В. Буторина, А.В. Васильев, Н.И. Иванов, И.Л. Карагодина, С.Д. Ковригин, Д.А. Ку克林, П.В. Матвеев, Г.Л. Осипов, П.И. Пospelов, Б.Г. Прутков, Н.В. Тюрина, А.Е. Шашурин, И.А. Шишкин, И.Л. Шубин, И.Е. Цукерников, Ю.И. Элькин, Е.Я. Юдин; за рубежом Л. Беранек, М. Крокер, Л. Кремер, П. Кнудсен, Р. Стефенсон, Р. Тейлор, Л. Шрайбер, Р. Ретингер, Дж. Куртце, З. Маекава, Е. Скучик и другие. Эти и другие работы послужили основой для разработки нормативной документации, широко используемой проектировщиками.

Научно-техническая гипотеза

Разработка метода оценки акустической эффективности шумозащитных конструкций в зависимости от их конструктивных параметров позволит выбрать оптимальный шумозащитный комплекс.

Цель диссертационного исследования – разработка научных и методических основ выбора и оптимизации шумозащитных комплексов, применяемых для снижения акустического загрязнения автомобильных и железных дорог в черте жилой застройки.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо было решить следующие задачи:

1. разработать метод расчёта акустической эффективности искусственного земляного сооружения в зависимости от его высоты и других конструктивных параметров (форма, материал);
2. разработать методику и выполнить экспериментальные исследования акустической эффективности искусственных земляных сооружений, а также показателя дифракции;
3. получить экспериментальные зависимости акустической эффективности искусственных земляных сооружений (ИЗС) от высоты;
4. оценить точность разработанного метода оценки акустической эффективности ИЗС по сравнению с результатами эксперимента;
5. разработать методику оценки экономической эффективности шумозащитного комплекса автомобильных и железных дорог;
6. разработать методику выбора оптимального по экономическому критерию шумозащитного комплекса. Привести пример выбора и оптимизации шумозащитного комплекса.

Объект исследования – шумозащитный комплекс, включающий в качестве основных мероприятий шумозащитные конструкции (экраны, насыпи, выемки).

Предмет исследования – оптимизация шумозащитного комплекса по экономическому критерию.

Научная новизна:

1. С использованием преобразования звуковых полей разработан метод оценки акустической эффективности искусственных земляных сооружений.
2. Получены формулы расчёта акустической эффективности ИЗС в зависимости от высоты и других его конструктивных параметров, расположения в пространстве, акустических свойств (звукопоглощения) и показателя дифракции.
3. Разработан подход, устанавливающий связь между акустической и экономической эффективностями шумозащитного комплекса.
4. Предложена методика выбора состава шумозащитного комплекса при проектировании и реконструкции автомобильных и железных дорог и его оптимизация по экономическому критерию.

Теоретическая значимость работы:

1. Представлена физическая модель преобразования звуковых полей при наличии ИЗС, на основе которой разработан метод оценки акустической эффективности земляных сооружений.
2. Уточнены расчётные схемы распространения звука при наличии ИЗС, используемые в методиках, основанных на оптико-дифракционной теории, а также влияние конструктивных параметров и звукопоглощающих свойств сооружений на их эффективность.

3. Описан способ формирования функции экономической эффективности шумозащитных конструкций в зависимости от их конструктивных параметров.

4. Сформулирована задача оптимизации шумозащитного комплекса по акустическому и экономическому критериям.

Практическая значимость работы:

1. Разработана методика акустических испытаний выемки и насыпи для оценки их акустической эффективности.

2. Получены результаты экспериментальных исследований, позволяющие установить связь между высотой насыпи, глубиной выемки и их акустической эффективностью.

3. Разработан инженерный метод оценки акустической эффективности искусственных земляных сооружений.

4. Разработана методика оценки экономической эффективности шумозащиты (как отдельной шумозащитной конструкции, так и шумозащитного комплекса в целом), позволяющая оценить полные затраты на шумозащиту в течение жизненного цикла транспортного объекта.

5. Разработаны рекомендации по выбору оптимального шумозащитного комплекса для нормализации акустического воздействия автомобильных и железных дорог.

На защиту выносятся:

1. метод оценки акустической эффективности ИЗС с использованием преобразования звуковых полей, описывающий её связь с высотой, звукопоглощающими свойствами и дифракцией на кромках сооружения;

2. методика акустических испытаний искусственного земляного сооружения на примере выемки и насыпи;

3. результаты экспериментальных исследований, позволивших установить связь высоты ИЗС с его акустической эффективностью;

4. преобразованные формулы расчёта эффективности ИЗС по методикам оптико-дифракционной теории;

5. методика оценки экономической эффективности комплексов шумозащиты;

6. методика выбора оптимального шумозащитного комплекса для автомобильных и железных дорог.

Степень достоверности

Достоверность диссертационного исследования подтверждается серией экспериментов, выполненных в натурных условиях с использованием прецизионной акустической аппаратуры, использованием современных методик испытаний и обработки информации, результатами апробации согласно теме диссертации.

Апробация результатов исследования:

Основные положения диссертации представлены и обсуждались на заседаниях кафедры «Экология и производственная безопасность» БГТУ «ВОЕНМЕХ» в 2006, 2007, 2021, 2022 гг.; на Научно-практической конференции с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия», Санкт-Петербург, 21-22 марта 2006 г.; IV Всероссийской школе-семинаре с международным участием «Новое в теоретической и прикладной акустике», Санкт-Петербург, 21 ноября 2007 г.; VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», 23-25 марта 2021 г.

Внедрение результатов исследования:

Результаты работы послужили основой для разработки «Методических указаний по выбору шумозащитных мероприятий при выявлении сверхнормативного акустического воздействия от объектов железнодорожного транспорта» по заказу ОАО «РЖД». Методика выбора и оптимизации шумозащитного комплекса использована в ООО «ТранспроектИнжиниринг» для выполнения акустических расчётов при проектировании объектов транспортной инфраструктуры.

Личный вклад соискателя учёной степени в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в том, что автором выполнены: обзор литературных источников, теоретические и экспериментальные исследования, оптимизационное моделирование. Диссертационная работа в полном объёме является самостоятельным исследованием. В работах, написанных в соавторстве, автор сформулировал принципы постановки задач, предложил акустические модели, модель оптимизации, разработал алгоритмы решения поставленных задач, описал проводимые эксперименты и их результаты, результаты оптимизации, сформулировал окончательные выводы по проведённым исследованиям.

Публикации:

По материалам диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 10 в списке журналов, рекомендованных ВАК.

Соответствие научно-квалификационной работы паспорту научной специальности

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

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

Структура и объём работы:

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 185 наименований, 4 приложений; изложена на 222 страницах машинописного текста, в т. ч. содержит 60 таблиц, 35 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы и основные задачи, выполнен анализ темы исследования. Дано описание теоретической и практической значимости работы, методологии проведения исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту, приведено описание публикационной активности и личного вклада автора.

В первой главе проанализировано состояние проблемы, дано описание объектов и предмета исследования.

В качестве объекта исследования и оптимизации выбран шумозащитный комплекс, включающий в качестве основных мероприятий шумозащитные конструкции (ШЗК): шумозащитные экраны (ШЭ) и искусственные земляные сооружения (ИЗС): насыпи и выемки. Дополнительными мероприятиями защиты выбраны: средства снижения шума в источнике образования (вибродемпфирующие накладки на рельсы или шлифование рельсов, пористый асфальт), средства снижения шума в защищаемом объекте (шумозащитное остекление), шумозащитные зеленые насаждения; их акустическая эффективность известна.

Акустическая эффективность ШЗК зависит от: высоты, длины, материала и формы. Форма и материал определяют типы конструкций (звукопоглощающие, звукоотражающие, наклонные, с уклоном 1:1, 1:2 и т.д.), ключевой параметр сооружения определённого типа – его высота. Акустическая эффективность шумозащитных экранов изучена исчерпывающе, получены многократно проверенные зависимости акустической эффективности от высоты, формы и звукопоглощающих свойств (разными методами); в нормативной документации есть отражение этих результатов. Методики же расчёта акустической эффективности ИЗС, базирующиеся главным образом на оптико-дифракционной теории, противоречивы: расхождения в расчётах достигают 10-12 дБ(А); экспериментальные данные разнятся и не позволяют вывести аналитическую зависимость акустической эффективности от высоты ИЗС. Отсутствуют методики измерения акустической эффективности ИЗС.

Задача оптимизации состоит в выборе шумозащитного комплекса с минимальными затратами (как показателя экономической эффективности) при условии, что его акустическая эффективность не ниже требуемого снижения шума. В числе искомых переменных – высоты ШЗК. Поэтому требуется разработка метода расчета акустической эффективности ИЗС и методики оценки экономической эффективности ШЗК в зависимости от высоты сооружения. Для более точной оценки последняя должна учитывать полные затраты в течение жизненного цикла транспортного объекта и срок службы конструкций.

Во **второй главе** приведены результаты теоретических исследований и разработан метод расчёта акустической эффективности искусственных земляных сооружений (ИЗС), приведены результаты экспериментальных и аналитических исследований акустической эффективности ИЗС.

В основе разработанного метода физическая модель преобразования звуковых полей при наличии ИЗС, учитывающая положения статистической, геометрической и волновой теорий акустики. Звуковое поле в расчётной точке формируется вторичными излучателями шума (основанием со стороны источника шума и кромками ИЗС), преобразующими звуковое поле источника. В ходе преобразования учитываются геометрические размеры ИЗС и звукопоглощающие свойства их элементов, расположение сооружений в пространстве по отношению к источнику шума и защищаемому объекту. При распространении звука учитываются явления отражения, поглощения, дифракции и дивергенции звука. Согласно разработанной расчётной схеме приведены последовательные переходы от акустической мощности к интенсивности звука при каждом изменении характера звукового поля.

Приняты допущения: источник шума (ИШ) линейный, фронт звуковой волны цилиндрический; длина ИЗС условно принимается равной длине ИШ; для учёта явлений дифракции на кромках ИЗС используется показатель дифракции $ПД = 10lg\beta_{дифр}$, определяемый экспериментально; дифракция через боковые рёбра и звукоизоляция ИЗС в расчётах не учитываются, интерференционные явления не рассматриваются.

Акустическая эффективность ИЗС определяется через отношение интенсивностей в расчётной точке (РТ) без ИЗС и с установленным ИЗС.

Формула расчёта акустической эффективности выемки, ΔL_B , дБ(А):

$$\begin{aligned} \Delta L_B = & 10lg \frac{R_2}{\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{рт} - h_{иш})^2}} + 10lg \frac{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}}{\lambda} - 10lg(1 - \alpha_{ск}) - \\ & - 10lg\beta_{дифр1} + 10lg \arctg \frac{l_{иш}}{2\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{рт} - h_{иш})^2}} - 10lg \arctg \frac{l_B}{2R_2} - \\ & - 10lg \arctg \frac{l_B}{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}} - 10lg \arctg \frac{l_B}{2(r_1 + r_2)} + 7. \end{aligned} \quad (1)$$

Формула расчёта акустической эффективности насыпи, ΔL_H , дБ(А):

$$\begin{aligned} \Delta L_H = & 10lg \frac{\sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2}}{\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{рт} - h_{иш})^2}} + 10lg \frac{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}}{\lambda} + 10lg \frac{e_H}{\lambda} - 10lg(1 - \alpha_{ск}) - 10lg(1 - \alpha_H) - \\ & - 10lg\beta_{дифр1} - 10lg\beta_{дифр2} + 10lg \arctg \frac{l_{иш}}{2\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{рт} - h_{иш})^2}} - 10lg \arctg \frac{l_H}{2(r_1 + r_2)} - \\ & - 10lg \arctg \frac{l_H}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}} - 10lg \arctg \frac{l_H}{2e_H} - 10lg \arctg \frac{l_H}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2}} + 12. \end{aligned} \quad (2)$$

где H – высота ИЗС, м; y – уклон ИЗС, м; e_n – ширина верхней площадки насыпи, м; $l_{иш}$, l_n , l_v – длина ИШ, насыпи, выемки, м; $\alpha_{ск}$, α_n – коэффициенты звукопоглощения склона ИЗС и верхней поверхности насыпи; $\beta_{дифр}$ – коэффициент дифракции; $h_{иш}$, $h_{рт}$ – высота ИШ, РТ, м; r_1 – расстояние от центра ИШ до края проезжей части (ПЧ)/пути, определяется категорией дороги, м; r_2 – расстояние от края ПЧ/пути до ШЗК, определяется технологией возведения ШЗК, м; R_3 – расстояние от края ПЧ/пути до защищаемой застройки, м; R_2 – расстояние от ИЗС до РТ, м.

Разработаны методики экспериментального определения акустической эффективности ИЗС. Измерения проводятся в натуральных условиях при прохождении транспортного потока. Схемы расположения точек, в которых находятся измерительные приборы, показаны на рисунках 1 и 2. Для расчёта акустической эффективности ИЗС проводятся синхронные измерения в точках аналогичных 1 и 6 в подобной местности без ИЗС на высоте 1,5 м. Точка 1 располагается на расстоянии 7,5 м от оси ближней полосы или 25 м от оси ближнего пути для авто- и железнодорожного транспорта соответственно. Точки измерения показателя дифракции ИЗС – до и после кромки на высоте 0,1 м от её поверхности. Измеряемые характеристики: эквивалентные уровни звукового давления (УЗД, дБ) и эквивалентные уровни звука (УЗ, дБА). Для каждого объекта проводится не менее трех измерений в каждой точке.

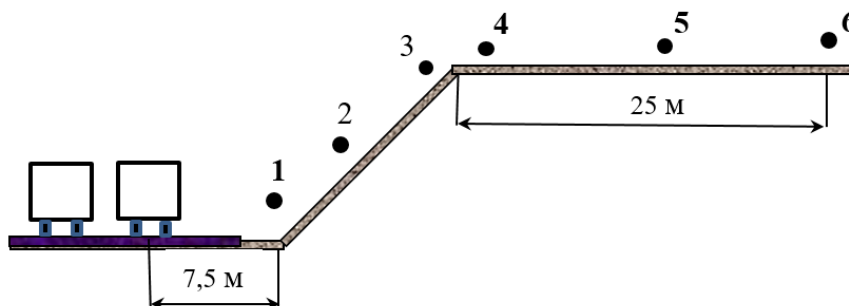


Рисунок 1 – Схема измерений для выемки: 1, 6 – основные точки для определения акустической эффективности; 3, 4 – для измерения показателя дифракции; 2, 5 – контрольные точки.

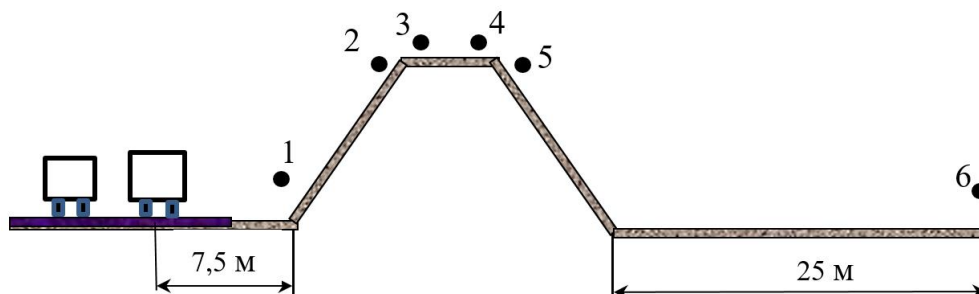


Рисунок 2 – Схема измерений для насыпи: 1, 6 – основные точки определения акустической эффективности; 2-5 – основные точки измерения показателя дифракции.

Акустическая эффективность искусственного земляного экранирующего сооружения ($\Delta L^{изс}$), дБ(А), определяется как:

Продолжение таблицы 1

	$\delta^{H-3} = \sqrt{(r_1 + r_2 + y \cdot H + r_3)^2 + (H^H + H^3 - h_{\text{иш}})^2} + \\ + \sqrt{(R_3 - r_2 - y \cdot H - r_3)^2 + (h_{\text{пт}} - (H^H + H^3))^2} - \\ - \sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{\text{пт}} - h_{\text{иш}})^2}$
	$\delta^B = \sqrt{(r_1 + r_2 + y \cdot H)^2 + (H - h_{\text{иш}})^2} + \\ + \sqrt{(R_3 - r_2 - y \cdot H)^2 + h_{\text{пт}}^2} - \\ - \sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (H + h_{\text{пт}} - h_{\text{иш}})^2}$
	$\delta^{B-3} = \sqrt{(r_1 + r_2 + y \cdot H^B + r_3)^2 + (H^B + H^3 - h_{\text{иш}})^2} + \\ + \sqrt{(R_3 - r_2 - y \cdot H^B - r_3)^2 + (h_{\text{пт}} - H^3)^2} - \\ - \sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{\text{пт}} + H^B - h_{\text{иш}})^2}$

r_3 – расстояние до второй ШЗК в случае комбинации ШЗК, определяется технологией возведения и условиями эксплуатации;

Преобразованные формулы расчёта эффективности искусственных земляных сооружений (насыпи и выемки), $\Delta L^{\text{ИЗС}}$, по методикам оптико-дифракционной теории представлены как:

$$\Delta L^{\text{ИЗС}} = 10 \lg(3 + 20\delta/\lambda) - K_{\text{м}}, \text{ дБ или } \Delta L^{\text{ИЗС}} = 10 \lg(3 + 58,8 \cdot \delta) - K_{\text{м}}, \text{ дБА}, \quad (4)$$

где δ – разность хода звукового луча при наличии экранирующего сооружения, м.

Акустическая эффективность экрана и комбинированных конструкций, ΔL^3 :

$$\Delta L^3 = 10 \cdot \lg(3 + 58,8 \cdot \delta) - K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}, \text{ дБА}, \quad (5)$$

где $K_{\text{м}}$ – поправка на материал, дБА; $K_{\text{ф}}$ – поправка на форму, 1,5-2 дБА.

$$K_{\text{м}}^{\text{ИЗС}} = 3 - 10 \cdot \lg(1 - \alpha_{\text{покр}}), \text{ дБА}, \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{покр}}$ – частотнозависимый коэффициент звукопоглощения покрытий ИЗС.

Результаты расчётов акустической эффективности ИЗС методом преобразования звуковых полей (МПЗП), по модернизированным автором формулам методик оптико-дифракционной теории (ДМ) и экспериментальная эффективность представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

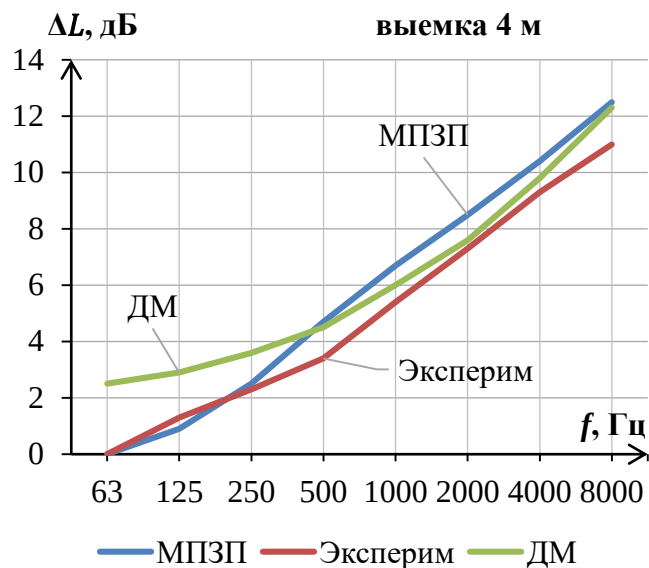
Таблица 2 – Акустическая эффективность ИЗС ($\Delta L_{\text{изс}}$): выемки ($\Delta L_{\text{в}}$) и насыпи ($\Delta L_{\text{н}}$)

Метод расчета	$\Delta L_{\text{изс}}$, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц								$\Delta L_{\text{изс}}$, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
$K_{\text{м}}$	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Выемка 4 м									
$\Delta L_{\text{в}}$ (расчет МПЗП)	0	0,9	2,5	4,7	6,7	8,5	10,4	12,5	7,3
$\Delta L_{\text{в}}$ (эксперимент)	0	1,3	2,3	3,4	5,4	7,3	9,3	11,0	6,2
$\Delta L_{\text{в}}$ (расчет ДМ)	2,5	2,9	3,6	4,5	6,0	7,6	9,8	12,3	6,0
Выемка 6 м									
$\Delta L_{\text{в}}$ (расчет МПЗП)	0,5	2,4	4,6	6,4	8,5	11,0	13,0	16,0	9,0
$\Delta L_{\text{в}}$ (эксперимент)	1,0	3,0	4,0	5,0	8,7	10,0	12,0	15,0	9,0
$\Delta L_{\text{в}}$ (расчет ДМ)	2,9	3,6	4,8	6,3	8,5	10,8	13,4	16,2	8,5
ПД	3	4	5	6,5	7,5	8	9	9	7
Выемка 8 м									
$\Delta L_{\text{в}}$ (расчет МПЗП)	1,5	3,7	6,0	7,8	10,0	12,5	14,7	17,6	11,0
$\Delta L_{\text{в}}$ (эксперимент)	1,4	3,4	4,4	6,4	10,0	11,4	14,0	17,0	11,0
$\Delta L_{\text{в}}$ (расчет ДМ)	3,2	4,2	5,7	7,7	10,2	12,7	15,5	18,3	10,2
Насыпь 3 м									
$\Delta L_{\text{н}}$ (расчет МПЗП)	0	1,8	4,5	7,4	11,4	14,4	18,4	22,4	11,4
$\Delta L_{\text{н}}$ (эксперимент)	1,5	3,0	5,0	7,0	10,5	14,0	17,0	20,0	11,0
$\Delta L_{\text{н}}$ (расчет ДМ)	3,2	4,1	5,6	7,5	10,0	12,5	15,2	18,1	10,0
Насыпь 5,5 м									
$\Delta L_{\text{н}}$ (расчет МПЗП)	0,7	4,6	8,4	12,2	16,2	19,7	23,3	28,3	16,8
$\Delta L_{\text{н}}$ (эксперимент)	3,0	6,0	8,0	12,0	16,0	18,0	22,0	26,5	16,5
$\Delta L_{\text{н}}$ (расчет ДМ)	5,3	7,2	9,7	12,5	15,5	18,4	21,3	24,3	15,5
Насыпь 7 м									
$\Delta L_{\text{н}}$ (расчет МПЗП)	2,6	5,6	10,4	15,2	19,2	23,2	26,2	32,3	19,2
$\Delta L_{\text{н}}$ (эксперимент)	3,5	8,0	11,0	16,0	19,0	21,0	24,0	29,0	19,0
$\Delta L_{\text{н}}$ (расчет ДМ)	6,5	8,8	11,5	14,4	17,6	20,5	23,5	26,5	17,6
2 ПД	5	8	10	12	14	16	19	19	14

Точность предложенных формул (1), (2), (4) составляет ± 3 дБ во всем диапазоне частот ($\pm 1,5$ дБА). При этом метод преобразования звуковых полей более точен (до 2,5 дБ).

Показатель дифракции возрастает с частотой, его интегральное значение 7 дБА.

Акустическая эффективность выемки



Акустическая эффективность насыпи

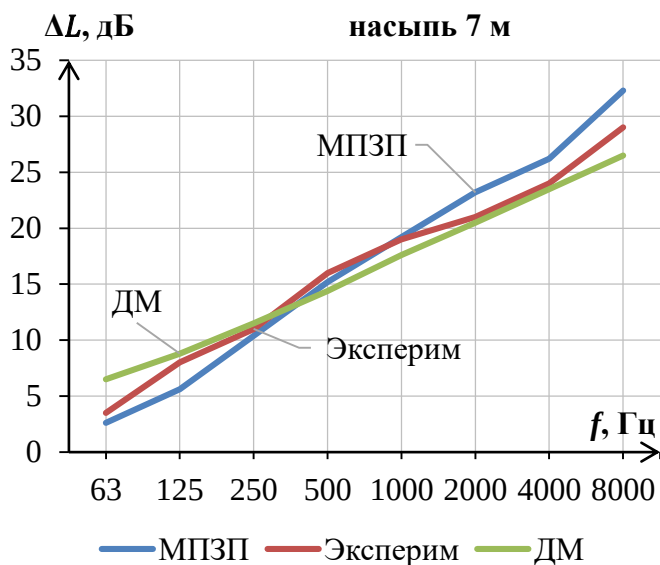
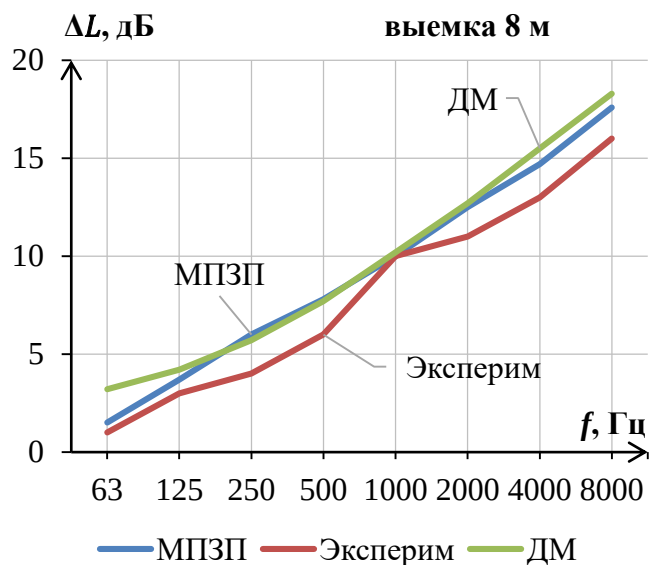
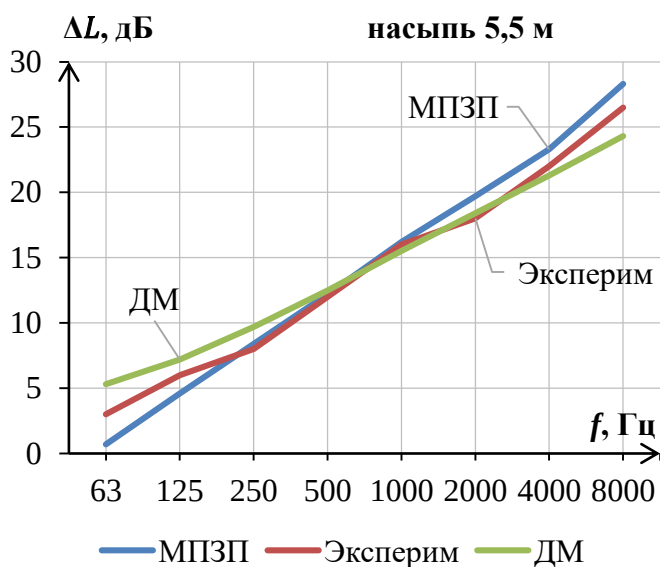
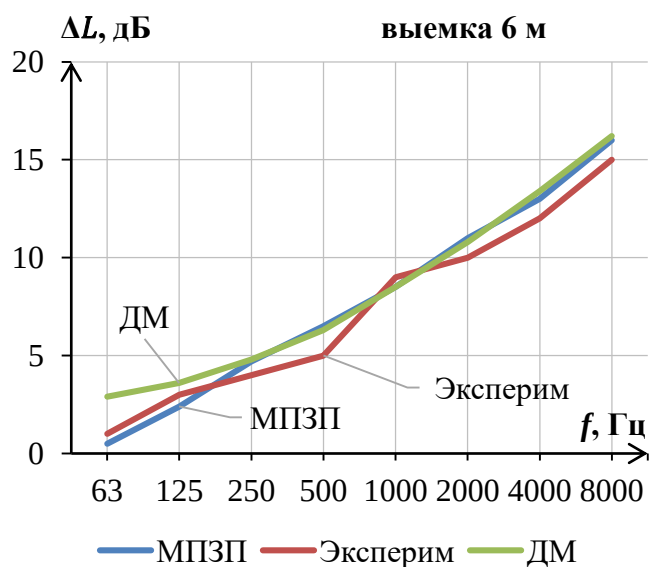
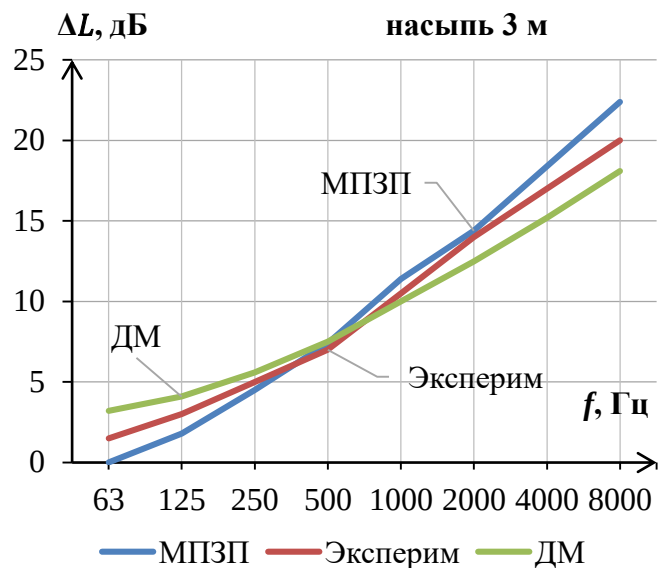


Рисунок 3 – Сравнение расчётных и экспериментальной акустической эффективности ИЗС, дБ

Зависимость акустической эффективности ИЗС от высоты представлена на рисунке 4.

Акустическая эффективность выемки, дБА

Акустическая эффективность насыпи, дБА

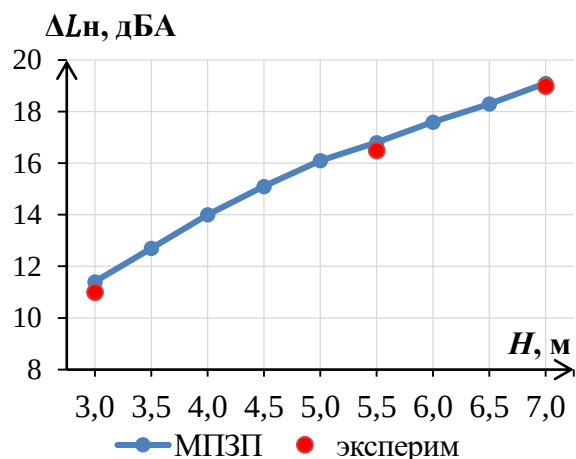
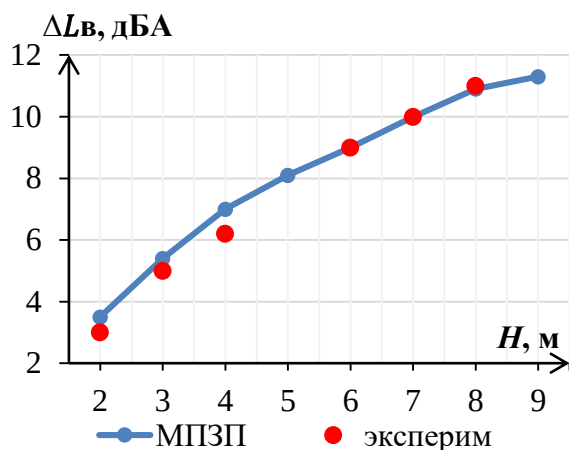


Рисунок 4 – Акустическая эффективность ИЗС в зависимости от высоты, дБА

Для оптимизации шумозащитного комплекса была оценена акустическая эффективность шумозащитных насаждений двух вариантов:

- простой лесопосадки (ЛП), $\Delta L^{\text{ЛП}}$:

$$\Delta L^{\text{ЛП}} = 0,06 \cdot b_{\text{ЛП}}, \text{ дБА}, \quad (10)$$

- шумозащитного озеленения (ШЗ), густой 4-5 рядной посадки в шахматном порядке пологой к ИШ, включающей деревья пятой группы, $\Delta L^{\text{ШЗ}}$:

$$\Delta L^{\text{ШЗ}} = 0,06 \cdot b_{\text{ЛП}} + 5, \text{ дБА}, \quad (11)$$

где $b_{\text{ЛП}}$ – ширина лесопосадки (ЛП), м.

В **третьей главе** разработана методика оценки экономической эффективности шумозащитных мероприятий, сформулирована задача оптимизации шумозащитного комплекса.

В качестве экономического критерия оптимизации принята чистая приведённая стоимость (ЧПС) – показатель экономической эффективности шумозащиты. С учётом особенностей строительства и эксплуатации шумозащитных сооружений приведена методика оценки данного показателя. Она учитывает все виды затрат и их распределение во времени.

$$\text{ЧПС} = C_{\text{пр}} + K + \sum_{t=1}^T \frac{C_t - \mathcal{E}}{(1+E)^t} + \sum \frac{C_p}{(1+E)^{t_d}} + \frac{C_{\text{л}}}{(1+E)^T}, \text{ руб.}, \quad (12)$$

где K – капитальные вложения в строительство ШЗК, руб.; C_t – эксплуатационные затраты, руб.; $C_{\text{пр}}$, C_p и $C_{\text{л}}$ – затраты на проектирование, реконструкцию и ликвидацию, руб.; $\mathcal{E}$ – эффект от внедрения шумозащиты, руб.; T – рассматриваемый период эксплуатации (25-30 лет); t_d – долговечность (срок службы) ШЗК, лет; E – норма дисконта, доля единицы в год.

Каждый элемент затрат формируется на основе смет через конструктивные параметры ШЗК. В частности, функции сметной стоимости строительства насыпи ($K^{\text{н}}$) и выемки ($K^{\text{в}}$),

сформированные на основе реальных смет (в уровне цен 01.01.2000 г.), имеют вид:

$$K^H = 85,5 \cdot (y \cdot H^2 + e \cdot H) + 31,1 \cdot (2 \cdot \sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2} + e), \text{ руб.} \quad (13)$$

$$K^B = 8,3 \cdot (y \cdot H^2 + e \cdot H) + 31,9 \cdot (2 \cdot \sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2} + e), \text{ руб.} \quad (14)$$

Сметная стоимость строительства экрана из оцинкованной стали составит:

$$K_{\text{оц}} = \begin{cases} 1490,39 + 1549,23 \cdot H & \text{для } H = 3..5 \text{ м} \\ 1251,41 + 1746,57 \cdot H & \text{для } H = 5,5..7 \text{ м} \\ 4244,69 + 1773,27 \cdot H & \text{для } H = 7,5..9 \text{ м} \\ 4151,19 + 1549,23 \cdot H & \text{для } H = 3..5 \text{ м на ИЗС} \\ 4151,19 + 1746,57 \cdot H & \text{для } H = 5,5..7 \text{ м на ИЗС} \end{cases}, \text{ руб.} \quad (15)$$

Стоимость экранов различных материалов формируется по сметам или по относительной стоимости панелей. Стоимость лесопосадки ($K^{\text{лп}}$) и озеленения ($K^{\text{шз}}$), полученная из смет:

$$K^{\text{лп}} = 75,8 \cdot b_{\text{лп}}, \text{ руб.} \quad (16)$$

$$K^{\text{шз}} = 75,8 \cdot b_{\text{лп}} + 3617,2, \text{ руб.} \quad (17)$$

Стоимость шумозащитного остекления ($K^{\text{шо}}$) зависит от этажности защищаемого здания:

$$K^{\text{шо}} = 533,33 \cdot h_{\text{эт}}, \text{ руб.} \quad (18)$$

С учётом того, что при проектировании рассматриваются все варианты шумозащиты, эффект от её внедрения предполагается одинаковым, а оценка затрат на ликвидацию требует дополнительных исследований: $C_{\text{пр}}$, Δ и $C_{\text{л}}$ не учитывались. $C_{\text{т}}$ и $C_{\text{р}}$ могут быть выражены через K . Поэтому функция ЧПС, формула (12), была модифицирована:

$$\text{ЧПС} = K + \sum_{t=1}^T \frac{k_3 \cdot K}{(1+E)^t} + \sum \frac{k_3 \cdot K}{(1+E)^{t_d}}, \text{ руб.}, \quad (19)$$

где k_3 и k_3 – коэффициенты эксплуатации и замены, доля единицы.

Поскольку высота шумозащитных конструкций (обозначим: 1 – экран, 2 – насыпь, 3 – выемка) принимает дискретные значения с некоторым шагом, а функции акустической эффективности и чистой приведённой стоимости дополнительных мер (4 – насаждения, 5 – средства снижения шума в источнике, 6 – остекление) аддитивны, для оптимизации шумозащитного комплекса сформулирована задача целочисленного программирования:

$$\left[\sum_{k=1}^6 [\text{ЧПС}_k(x_k)] \rightarrow \right] \min$$

$$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3) + \Delta L_4(x_4) + \Delta L_5(x_5) + \Delta L_6(x_6) \geq \Delta L_{\text{тр}},$$

где ΔL – снижение шума (акустическая эффективность), дБА.

$0 \leq x_k \leq b_k$, k – число шумозащитных мероприятий, целое и меняется от 1 до 6,

$b_{1-3} = \frac{H_k^{\text{max}} - H_k^{\text{min}}}{t_k} + 1$, где t_k – шаг изменения высоты соответствующей ШЗК,

$b_4 = 2, b_5 = 2, b_6 = 1$, b – число вариантов (равно 0, если вариант не применяется).

Каждому натуральному значению первых 3-х переменных соответствует своя высота ШЗК.

Задача является NP-трудной, решается полным перебором вариантов, начиная с варианта с максимально возможным расчётным значением акустической эффективности дополнительных мер, и сводится к отысканию набора переменных (высоты ШЗК или их комбинаций в сочетании с вариантами дополнительных мер), при котором выполняются условия задачи.

В **четвёртой главе** разработана методика выбора шумозащитного комплекса и оптимизация его по экономическому критерию. Приведены примеры выполнения расчетов по оптимизации. Алгоритм, позволяющий проектировщику выбрать оптимальный вариант шумозащиты, приведён на рисунке 5.

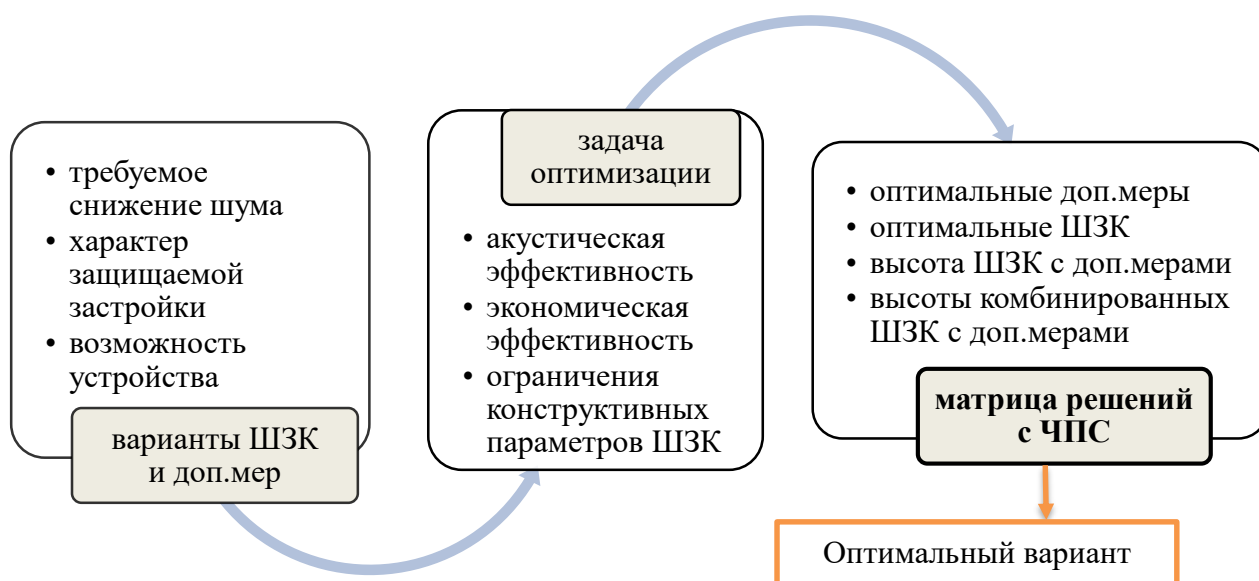


Рисунок 5 – Основные этапы выбора шумозащитного комплекса, оптимального по экономическому критерию

На первом этапе определяются возможные варианты шумозащиты. Выбор ШЗК определяют удалённость и высота защищаемой застройки, требуемое снижение шума, возможность устройства в имеющихся условиях (в т.ч. наличие полосы землеотвода достаточной ширины).

На втором формируются функции акустической (ΔL) и экономической (ЧПС) эффективности вариантов шумозащиты, а также ограничения конструктивных параметров ШЗК (материал, диапазоны и шаг высот), определяемые технологией возведения и условиями эксплуатации. Записывается задача оптимизации.

Третий этап – непосредственно оптимизация шумозащитного комплекса:

- решение методом динамического программирования серии задач на определение оптимальных по ЧПС дополнительных мер защиты (накладки на рельс или пористый асфальт, остекление, насаждения) или их сочетания;
- определение оптимальных по ЧПС конструкций одного вида (экранов, ИЗС);

- к каждому эффективному сочетанию дополнительных мер подбирается необходимая минимально возможная высота ШЗК, обеспечивающая требуемое снижение шума (рисунок 6). Для поиска оптимального сочетания дополнительных мер с комбинацией ШЗК решается серия задач: перебирая возможные значения высоты экрана определённого типа, подбирается высота ИЗС определённого типа, которые вместе с рассматриваемым сочетанием дополнительных мер обеспечивают заданную акустическую эффективность.

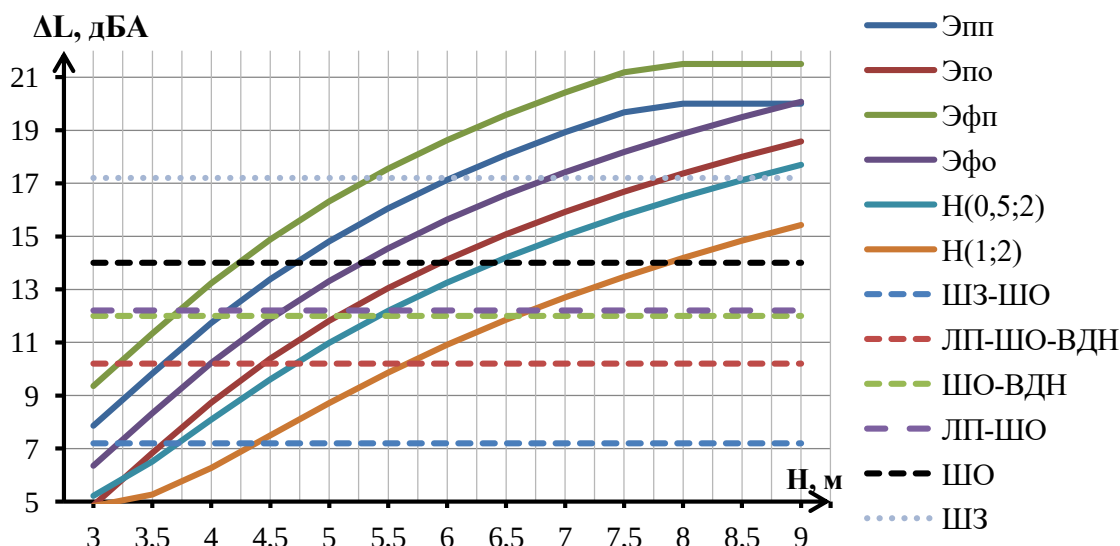


Рисунок 6 – Определение высоты ШЗК:

ШЗ – шумозащитное озеленение, ШО – шумозащитное остекление, ЛП – лесопосадка, ВДН – вибродемпфирующие накладки на рельс, Эпп и Эпо, Эфп и Эфо – экраны прямой поглощающий и отражающий, Г-образный поглощающий и отражающий; Н(0,5;2) и Н(1;2) – насыпь уклоном 1:0,5 и 1:1 с верхней площадкой 2 м.

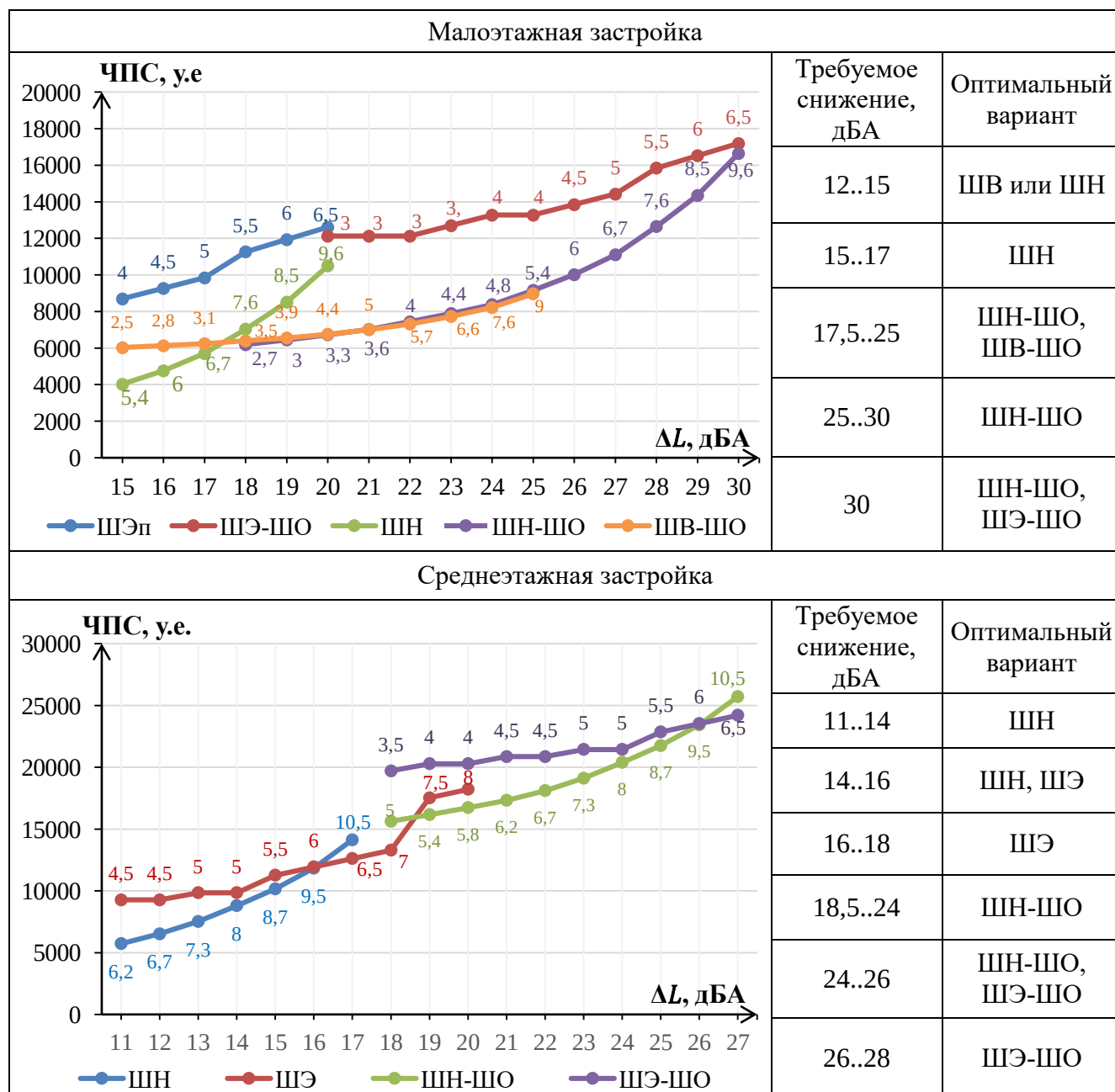
- формирование таблицы результатов (матрицы решений), таблица 3.

Таблица 3 – Пример матрицы вариантов

Дополнительные мероприятия	Тип и высота ШЗК (H, м) и стоимость всего комплекса (ЧПС, у.е.)					
	Эпп	Эпо	Эфп	Эфо	Н(0,5;2)	Н(1;2)
ШЗ-ШО	3	4	-	3,5	3,8	4,4
	38614,9	35461,7	-	47560,7	31551,6	31542,7
ЛП-ШО-ВДН	4	4,5	3,5	4	4,8	5,7
	38049,7	33262,3	37962,6	47002,4	30061,6	30120,1
ШО-ВДН	4,5	5,5	4	5	5,5	6,6
	-	-	-	-	25996,0	26223,9
ЛП-ШО	4,5	5,5	4	5	5,6	6,7
	29680,3	26352,7	29733,3	42039,0	21649,6	21859,9
ШО	5	6	4,5	5,5	6,4	7,9
	25820,6	22111,0	26013,7	41097,2	18242,6	18602,5

На основе разработанной методики реализован выбор шумозащитного комплекса. В таблице 4 приведены оптимальные по чистой приведённой стоимости (ЧПС) варианты шумозащитных мер в зависимости от требуемого снижения шума (акустической эффективности мер) и высоты защищаемой застройки. На кривых ЧПС указаны высоты ШЗК. Графики отражают связь между акустической и экономической эффективностями шумозащитных мероприятий.

Таблица 4 – Оптимальные варианты защиты от транспортного шума



За малоэтажную принята застройка в 2-3 этажа. Оптимальными вариантами её защиты являются ИЗС (с шумозащитным остеклением (ШО) домов при требуемом снижении свыше 17 дБА). Выемка при совместном применении с остеклением (снижающие до 25 дБА) – самый эффективный способ защиты малоэтажной застройки, находящейся с двух сторон от дороги. Для

снижения более 25 дБА оптимальны насыпи с ШО. Для защиты среднеэтажной застройки применение выемки неэффективно, оптимальны насыпи и экраны (в т.ч. с ШО). При этом комплексы шумозащиты равной акустической эффективности будут включать экраны меньшей, чем насыпи высоты.

Основные выводы и результаты

При проектировании и реконструкции автомобильных и железных дорог необходимо соблюсти нормативные уровни шума в близрасположенной жилой застройке. Это требование обеспечивается внушительным комплексом шумозащиты, стоимость которого может быть снижена при помощи оптимизации. В результате проведенного исследования решена задача акустики, в частности, оценка акустической эффективности искусственных земляных сооружений (ИЗС): выемок, насыпей и др. Это позволило достичь цели исследования и разработать отсутствующую в современных нормативно-технических документах методику оптимизации шумозащитного комплекса.

1. При помощи метода последовательного преобразования звуковых полей получены формулы расчёта акустической эффективности основных типов ИЗС – выемки и насыпи, в которых учтены: высота (основной параметр, по которому проводится оптимизация), расположение ИЗС в пространстве, звукопоглощающие/отражающие свойства элементов сооружений, дифракция на кромках и пр. В основе метода – представление о звуковых полях, создаваемых вторичными источниками (элементами ИЗС) и преобразуемых при прохождении звука в присутствии опорной поверхности, поверхностей элементов ИЗС, дифрагировании звука через кромки ИЗС, геометрической дивергенции. В основе модели шумозащиты последовательный переход от акустической мощности к интенсивности звука при каждом изменении характера звукового поля или импеданса препятствия.

Уточнены расчётные схемы распространения звука при наличии ИЗС, влияние крутизны склонов и звукопоглощающих свойств ИЗС на его акустическую эффективность, на основании чего преобразованы формулы методик НТД, основанные на оптико-дифракционной теории. Рассмотрены 5 схем расчёта разности хода звукового луча в присутствии экранирующего сооружения (с учётом высоты и формы всех рассмотренных конструкций и расположения ИШ); введён коэффициент, учитывающий материал сооружения; исключена поправка на склон.

2. Для проверки полученных формул были выполнены обширные экспериментальные исследования. Разработана методика экспериментальной оценки акустической эффективности ИЗС, отсутствующая в нормативных документах. Измерения проводятся в натурных условиях при прохождении транспортного потока в нескольких точках одновременно в одинаковых условиях на подобных местностях с ИЗС и без. Основные точки расположены на расстоянии 7,5 м от оси ближней полосы автодороги (25 м от оси ближнего пути железной дороги) и 25 м от

сооружения (или в аналогичной точке на местности без ИЗС). Акустическая эффективность оценивается непрямым методом как разность усредненных разностей УЗ(Д) между усредненными значениями в основных измерительных точках на ровном участке и с установленными ИЗС. Выполнены измерения показателя дифракции (ПД) насыпи и выемки в натуральных условиях. Выявлено увеличение ПД с увеличением частоты порядка 1,5 дБ на октаву от 3 дБ (63 Гц) до 10 дБ (8000 Гц), интегральное значение 7-8 дБА.

3. Установленные экспериментальные зависимости акустической эффективности ИЗС от высоты показали важную практическую значимость. Характер полученных нелинейных зависимостей – постоянное увеличение эффективности с ростом частоты: в пределах от 1 до 3 дБ на октаву для выемки, от 2 до 5 дБ для насыпи. Выявлено, что с увеличением высоты ИЗС её эффективность увеличивается меньше, в частности, увеличение высоты выемки на 2 метра с 4 до 6 м – 3 дБА (от 6 до 9 дБА), с 6 до 8 м – 2 дБА (от 9 до 11 дБА). Акустическая эффективность насыпи заметно выше, чем выемки (при приблизительно одинаковых значениях высоты и глубины, за счет двойной дифракции и большего угла дифракции).

4. Выполнены сравнительные расчёты акустической эффективности ИЗС по формулам, полученным автором с использованием метода последовательного преобразование звуковых полей (МПЗП) и модернизированных автором формул методик, основанных на оптико-дифракционной теории. Их точность по сравнению с экспериментом составляет ± 3 дБ по всему диапазону частот. Эффективность ИЗС, полученная МПЗП, показала чуть большую сходимость с результатами измерений. Для выемок расхождение по спектру составило до 1,5 дБ, при этом интегральные значения эффективности 6-ти и 8-ми метровых выемок (9 и 11 дБА) совпали, 4-х метровой выемки на 1 дБА превысила экспериментальную. Для насыпей расхождения на низких и высоких частотах достигли 2,5 дБ, в диапазоне 250-2000 Гц – в среднем не выше 1,5 дБ, точность расчётов в дБА – в пределах 1,5 дБА. Акустическая эффективность выемки, рассчитанная по преобразованным формулам НТД, основанных на оптико-дифракционной теории, превышает экспериментальную на 2-2,5 дБ на низких частотах и практически совпадает с ней и рассчитанной по МПЗП в средне- и высокочастотном диапазоне. Для насыпей расхождение в низкочастотном диапазоне достигает 3 дБ, в высокочастотном – 2,5 дБ, на 250-4000 Гц – 1,5 дБ.

5. Разработана методика оценки экономической эффективности шумозащитного комплекса автомобильных и железных дорог. В качестве экономического критерия принята чистая приведённая стоимость (ЧПС), позволяющая оценить полные затраты на шумозащиту в течение жизненного цикла транспортного объекта. На основе реальных смет показано формирование ЧПС для ИЗС, экранов и шумозащитных насаждений. Зависимость стоимости ШЗК от их акустической эффективности носит нелинейный характер. Уменьшение ЧПС

возможно за счёт увеличения срока службы конструкции (актуально для экранов) или получения дополнительного эффекта от использования.

6. Разработана методика выбора шумозащитного комплекса, оптимального по экономическому критерию (ЧПС). На первом этапе определяются возможные варианты шумозащиты. На втором записывается задача оптимизации. На третьем: сначала определяются оптимальные дополнительные меры защиты или их сочетания и оптимальные типы ШЗК. Далее к каждому эффективному сочетанию дополнительных мер подбирается необходимая минимально возможная высота ШЗК, обеспечивающая требуемое снижение шума. Для поиска оптимального сочетания мер с применением комбинаций ШЗК (насыпь-экран, выемка-экран) решается серия задач: перебирая возможные значения высоты экрана определённого типа, подбирается высота ИЗС определённого типа, которые вместе с рассматриваемым сочетанием дополнительных мер обеспечивают заданную акустическую эффективность. Рассчитывается ЧПС и формируются таблицы результатов (матрица решений). Выбирается оптимальный по стоимости вариант. Используются методы динамического программирования и целочисленного программирования.

Реализован выбор и оптимизация шумозащитного комплекса, рекомендованы оптимальные средства защиты в зависимости от высоты застройки и требуемого снижения шума. Для малоэтажных зданий это, главным образом, ИЗС, в т.ч. с шумозащитным остеклением (ШО). Выемка при совместном применении с ШО (снижающие до 25 дБА) – самый эффективный способ защиты малоэтажной застройки, находящейся с двух сторон от дороги. Для снижения шума на 25-30 дБА оптимально сочетание насыпь-остекление. Для среднеэтажной застройки насыпь эффективнее в диапазоне снижения шума на 11-14 дБА, насыпь или экран – на 14-16 дБА, экран – на 16-18 дБА, насыпь с ШО – на 18,5-23,5 дБА, насыпь или экран с ШО – на 24-26 дБА, экран с ШО – на 26-28 дБА. Установлено, что комплексы шумозащиты равной акустической и экономической эффективности, будут включать экраны меньшей высоты, чем насыпи.

7. По результатам выполненных исследований разработаны «Методические указания по выбору шумозащитных мероприятий при выявлении сверхнормативного акустического воздействия от объектов железнодорожного транспорта» (утв. Распоряжением ОАО "РЖД" от 12.10.2022 № 2638/р), а также выполнены акустические расчёты при проектировании объектов транспортной инфраструктуры ООО «ТранспроектИнжиниринг». Результаты работы использованы в материалах ряда дисциплин по направлениям обучения 20.03.01 и 20.04.01 «Техносферная безопасность».

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования:

Расширить область внедрения результатов диссертационного исследования на шумозащиту объектов промышленности, авиатранспорта и т.д. Разработать методические

указания по выбору шумозащитных мероприятий для объектов автомобильного транспорта.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Борцова, С. С. Анализ оптимального решения по выбору шумозащитных экранов / С. С. Борцова // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 2(24). – С. 158-164.
2. Борцова, С. С. К оценке ущерба от транспортного шума / С. С. Борцова // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 3(25). – С. 42-49.
3. Борцова, С. С. Комплексное решение проблемы снижения шума железнодорожного транспорта / С. С. Борцова // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 5(27). – С. 33-47.
4. Борцова, С. С. Выбор оптимальной шумозащитной конструкции по параметрам, влияющим на акустическую эффективность / С. С. Борцова // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 5(27). – С. 48-65.
5. Борцова, С. С. Стоимостная оценка шумозащитной конструкции / С. С. Борцова // Noise Theory and Practice. – 2022. – Т. 8, № 1(28). – С. 61-71.
6. Борцова, С. С. Экономическая эффективность шумозащитных конструкций / С. С. Борцова // Noise Theory and Practice. – 2022. – Т. 8, № 2(29). – С. 45-55.
7. Борцова, С. С. Оптимизация комплекса мероприятий для защиты от железнодорожного шума / С. С. Борцова, Л. Э. Забалканская // Noise Theory and Practice. – 2023. – Т. 9, № 3(34). – С. 18-32.
8. Рекомендации по выбору шумозащитных мероприятий для защиты от шума железной дороги / А. В. Шабарова, С. С. Борцова, М. В. Буторина, С. А. Кондратьев // Noise Theory and Practice. – 2023. – Т. 9, № 4(35). – С. 39-50.
9. Борцова, С. С. Расчет акустической эффективности насыпи / С. С. Борцова, М. В. Буторина, Н. И. Иванов // Noise Theory and Practice. – 2023. – Т. 9, № 4(35). – С. 51-58.
10. Борцова, С. С. Расчет акустической эффективности выемки / С. С. Борцова, М. В. Буторина, Н. И. Иванов // Noise Theory and Practice. – 2023. – Т. 9, № 4(35). – С. 59-66.

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

11. Investigation of parameters influencing noise barrier efficiency / N. Tyurina, N. Ivanov, A. Shashurin, S. Bortsova // "Advances in Acoustics, Noise and Vibration - 2021" Proceedings of the 27th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2021 : 27, Virtual, Online, 11–16 июля 2021 года. – Virtual, Online, 2021.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

12. Шашурин, А. Е. Экономическая целесообразность выбора шумозащитных конструкций / А. Е. Шашурин, С. С. Борцова // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. – 2020. – № 3. – С. 66-71. – DOI 10.26163/RAEN.2020.91.82.009.
13. Шашурин, А. Е. Проблемы современной инженерной акустики / А. Е. Шашурин, С. С. Борцова, В. К. Васильева // Защита от повышенного шума и вибрации : Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 23–25 марта 2021 года / Под редакцией Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: Институт акустических конструкций, 2021. – С. 11-15.
14. Петрова, С. С. Выбор акустического сооружения для защиты от транспортного шума / С. С. Петрова // Защита населения от повышенного шумового воздействия : Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–22 марта 2006 года / Под редакцией Н.И. Иванова, К.Б. Фридмана. – Санкт-Петербург: ИННОВА, 2015. – С. 345-352.
15. Петрова, С. С. Оценка ущерба от загрязнения атмосферы автотранспортом / С. С. Петрова // Защита населения от повышенного шумового воздействия : Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–22 марта 2006 года / Под редакцией Н.И. Иванова, К.Б. Фридмана. – Санкт-Петербург: ИННОВА, 2015. – С. 353-359.
16. Петрова, С. С. Многокритериальная оптимизация шумозащитного комплекса (ШЗК) / С. С. Петрова // Защита населения от повышенного шумового воздействия : Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–22 марта 2006 года / Под редакцией Н.И. Иванова, К.Б. Фридмана. – Санкт-Петербург: ИННОВА, 2015. – С. 360-366.
17. Петрова, С. С. Методика оценки конкурентоспособности акустических конструкций / С. С. Петрова // Новое в теоретической и прикладной акустике : Труды 4-й Всероссийской школы-семинара с международным участием, Санкт-Петербург, 21 ноября 2007 года. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2007. – С. 163-166.
18. Петрова, С. С. Оптимизация комплекса шумозащиты для снижения акустического загрязнения в жилой застройке / С. С. Петрова // Новое в теоретической и прикладной акустике : Труды 3-й Всероссийской школы-семинара с международным участием, Санкт-Петербург, 23–24 октября 2003 года. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2003. – С. 159-164.

Издательство Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ»

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

Подписано в печать 15.10.2024. Формат 60х90/16. Бумага документная.

Печать цифровая. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии БГТУ.

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