

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



На правах рукописи

**БОРЦОВА СВЕТЛАНА СЕРГЕЕВНА**

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

1.3.7 – Акустика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент,  
Буторина Марина Вадимовна

Санкт-Петербург

2024

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1. Актуальность проблемы. Объекты исследования.....	11
1.2. Снижение шума в источнике образования.....	15
1.3. Снижение шума на пути распространения.....	16
1.3.1. Шумозащитные экраны.....	18
1.3.2. Шумозащитная насыпь.....	21
1.3.3. Снижение шума выемками.....	24
1.3.4. Комбинации шумозащитных конструкций.....	27
1.3.5. Зелёные насаждения.....	28
1.3.6. Длина шумозащитных конструкций.....	33
1.4. Снижение шума в защищаемом объекте.....	35
1.5. Экономическая эффективность шумозащитных мероприятий.....	36
1.6. Задача выбора и оптимизации шумозащитного комплекса.....	40
ГЛАВА 2. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШУМОЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. МЕТОД РАСЧЁТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ. ....	45
2.1. Разработка расчетного метода оценки акустической эффективности ИЗС.....	45
2.1.1. Общий подход к расчёту эффективности ИЗС методом преобразования звуковых полей.....	45
2.1.2. Акустическая эффективность выемки методом ПЗП.....	51
2.1.3. Акустическая эффективность насыпи методом ПЗП.....	51
2.2. Методика проведения экспериментальных исследований акустической эффективности ИЗС.....	53
2.2.1. Объекты исследования и схемы измерений.....	54
2.2.2. Методика определения акустической эффективности ИЗС и показателя дифракции по экспериментальным данным.....	57
2.2.3. Условия измерений, измерительная аппаратура, обработка результатов.....	59
2.3. Экспериментальная акустическая эффективность насыпей и выемок.....	61
2.4. Оценка точности метода определения акустической эффективности ИЗС с использованием ПЗП.....	64
2.5. Уточнение методик расчёта акустической эффективности шумозащитных конструкций по оптико-дифракционной теории.....	68
2.5.1. Расчет акустической эффективности экранов.....	69
2.5.2. Расчет акустической эффективности ИЗС.....	71
2.5.3. Преобразованная методика расчета акустической эффективности ИЗС.....	76
Выводы по главе.....	79
ГЛАВА 3. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШУМОЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ. ОПТИМИЗАЦИЯ ШУМОЗАЩИТНОГО КОМПЛЕКСА.....	82

3.1. Разработка методики оценки экономической эффективности шумозащитных мероприятий.....	82
3.1.1. Затраты на проектирование .....	84
3.1.2. Капитальные вложения в строительство. Формирование функции сметной стоимости .....	86
3.1.3. Эксплуатационные расходы .....	94
3.1.4. Расходы на реконструкцию (замену) и ликвидацию .....	97
3.1.5. Модифицированная чистая приведённая стоимость шумозащиты .....	98
3.1.6. Стоимость дополнительных мер защиты от шума.....	101
3.2. Технологические и эксплуатационные требования, определяющие параметры ШЗК.....	106
3.2.1. Требования к высоте ШЗК.....	106
3.2.2. Требования к форме ШЗК .....	107
3.2.3. Требования к материалу ШЗК.....	111
3.2.4. Требования к шумозащитным насаждениям .....	113
3.2.5. Учёт технологических и эксплуатационных показателей при оптимизации шумозащитного комплекса.....	114
3.3. Оптимизация шумозащитного комплекса .....	117
3.3.1. Области принятия решения.....	117
3.3.2. Задача оптимизации шумозащитного комплекса.....	121
Выводы по главе.....	128
<b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА И ОПТИМИЗАЦИИ ШУМОЗАЩИТНОГО КОМПЛЕКСА. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>130</b>
4.1. Методика выбора и оптимизации шумозащитного комплекса.....	130
4.1.1. Пример выбора оптимального варианта шумозащитного комплекса.....	132
4.1.2. Оптимальные варианты защиты от транспортного шума .....	148
4.2. Методика выбора варианта решения проблемы повышенного уровня шума на территории окружающей застройки различных категорий населенных пунктов (сельские, городские), а также в зоне ведения садоводства, прилегающих к объектам транспорта.....	154
4.2.1. Алгоритм выбора различных вариантов шумозащиты.....	157
4.2.2. Критерии выбора различных вариантов шумозащиты .....	159
4.3. Аprobация результатов исследований .....	162
Выводы по главе.....	164
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>166</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....</b>	<b>170</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>171</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Сметы шумозащитных экранов.....</b>	<b>195</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Сметы искусственных земляных сооружений.....</b>	<b>215</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Смета лесопосадки.....</b>	<b>219</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акты внедрения.....</b>	<b>220</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема защиты от шума, появившаяся в прошлом столетии, становится всё более актуальной в 21 веке. Это объясняется как массовостью акустического воздействия, так и чрезвычайно вредными последствиями влияния шума на организм (снижение слуха, инфаркты, нарушение сна, повышение кровяного давления, невроты и др.). По многочисленным литературным источникам не менее двух третей населения городов находится под влиянием вредных шумовых воздействий. В связи с этим большая часть их жителей испытывает дискомфорт, болеет или теряет слух от повышенного акустического загрязнения [1-10].

Основной источник шума в городах – автомобильный и железнодорожный транспорт. По литературным данным в среднем вклад этих источников шума в акустическое загрязнение городов распределяется: на автомобильный транспорт до 70%, железнодорожный до 10% и выше [2, 3, 8-11]. Для снижения вредного шумового воздействия транспорта на население применяется целый комплекс мер и конструкций, реализуемый при проектировании новых и реконструкции существующих автомобильных и железных дорог. К этим мерам относятся: снижение шума в источнике образования (мягкий “малошумный” асфальт, вибродемпфирующие накладки на рельсы, шлифование рельсов), снижение шума на пути распространения (акустические экраны, земляные насыпи или валы, выемки, зеленые насаждения), в самих зданиях (звукоизолирующее остекление, звукопоглощение фасадов зданий), а также организационные меры (вынос жилой застройки за пределы зоны санитарного разрыва, организация движения) [12, 13].

Шумозащитные мероприятия стоят очень дорого [14-17]. По данным Н.Н. Мининой [18] стоимость шумозащиты при проектировании автомобильной дороги в городской черте может достигать 15% от её сметной стоимости. По данным А.Е. Шашурина 1 км акустического экрана обходится не менее, чем 1 млн. евро [19, 20]. Стоимость мероприятий, направленных на снижение шума железной дороги в

черте городской застройки сравнима со стоимостью возведения железнодорожных путей [15, 18].

Как правило, проектировщики используют для снижения шума защищаемых объектов не одну-две конструкции, а целый комплекс. К конструкциям шумозащиты, имеющими как различную стоимость (руб.), так и различную эффективность (дБА) относятся: экранирующие сооружения (экраны, выемки, валы или насыпи). Выбор состава этого комплекса осуществляется интуитивно, что ведет к неоправданно высоким затратам на шумозащиту. Снижение этих затрат лежит на пути оптимизации шумозащитного комплекса по стоимостному критерию. Подобного рода работа была проведена Н.И. Ивановым [12], который предложил алгоритм выбора и оптимизации шумозащиты при проектировании путевых и строительных машин.

Для решения этой задачи необходимо, в первую очередь, установить связь акустической эффективности каждой шумозащитной конструкции от основных конструктивных параметров (высота, материал, форма). Параллельно выявить, как изменения указанных параметров отразятся на стоимости отдельной шумозащитной конструкции или комплекса. А затем подобрать оптимальный вариант, варьируя «стоимостью эффективности в дБА» того или иного средства защиты от транспортного шума [16].

В литературе имеются ответы на отдельные вопросы подобного типа. Например, установлена связь акустической эффективности шумозащитных экранов (ШЭ) с их высотой, материалом, формой [19-23], представляется возможным анализ изменения стоимости ШЭ в зависимости от применяемых материалов панелей по данным их производителей или относительное удорожание стоимости ШЭ изменённой формы. Но в тоже время связь между высотой экрана и его стоимостью не установлена. В литературе и нормативной технической документации встречаются противоречивые данные о зависимости эффективности выемки и насыпи от их высоты и формы, полосы зелёных насаждений от ширины и высоты. Тем более, нет и данных о связи этих параметров со стоимостью.

### **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. Куклин, П.В. Матвеев, Г.Л. Осипов, П.И. Поспелов, Б.Г. Прутков, Н.В. Тюрин, 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 [24-40], которая широко используется 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 городской застройки.

### **Задачи исследования**

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

1. разработать метод расчёта акустической эффективности искусственного земляного сооружения (ИЗС) 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 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;



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

### **Степень достоверности**

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

### **Апробация результатов исследования:**

Основные положения диссертационной работы, а также результаты проведенных научных исследований были обсуждены и представлены на заседаниях кафедр «Экология и БЖД», «Экология и производственная безопасность» БГТУ «ВОЕНМЕХ» в 2006, 2007, 2021, 2022 годах; 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.; 27-м Международном конгрессе по звуку и вибрации, 11-16 июля 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 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.

# ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Актуальность проблемы. Объекты исследования

Проблема защиты от шума – это проблема сохранения здоровья населения. Шум влияет на организм, вызывая специфические (воздействие на органы слуха) и неспецифические (воздействие на весь организм) изменения. Около 15% населения Земли (порядка 1 млрд. человек) имеет серьезное нарушение слуха. Шум влияет на центральную нервную систему и сердечно-сосудистую систему, вызывая повышение кровяного давления, инфаркты, неврозы и прочее [1-12]. Масштабы акустического загрязнения огромны: от 60 до 70% населения городов находится под действием повышенного шума [2, 3, 5, 6, 12]. Отмечается, что для населения, проживающего на шумных улицах, риск заболеваний увеличивается более чем на 20% [1, 5, 10].

Основной источник акустического загрязнения территории – транспорт. При этом доля автомобильного транспорта в городах достигает 70%, а железнодорожного свыше 10% [10-13, 18-22, 41]. Цифры абсолютных значений колеблются в зависимости от времени дня (ночи), интенсивности и скорости движения, но некоторые обобщения можно сделать.

Представление о требованиях отечественных норм шума в сокращенном изложении можно понять из таблицы 1.1. [42, 43]

Таблица 1.1 – Нормируемые уровни звука (УЗ) в помещениях и на территории жилой застройки (сокращенно)

Назначение помещений или территорий	Время суток, ч	Для источников постоянного шума	Для источников непостоянного шума	
		УЗ, дБА	Эквивалентные УЗ, дБА	Максимальные УЗ, дБА
1. Палаты больниц и санаториев	7- 23	35	35	50
	23- 7	25	25	40

Продолжение таблицы 1.1

2. Аудитории образовательных организаций	-	40	40	55
3. Жилые комнаты квартир	7- 23	40	40	55
	23- 7	30	30	45
4. Жилые комнаты общежитий, номера гостиниц	7- 23	45	45	60
	23- 7	35	35	50
5. Залы кафе, ресторанов, столовых	-	55	55	70
6. Торговые залы магазинов	-	60	60	75
7. Территории, прилегающие к зданиям больниц и санаториев	7- 23	45	45	60
	23- 7	35	35	50
8. Территории, прилегающие к зданиям жилых домов, образовательных организаций	7- 23	55	55	70
	23- 7	45	45	60
9. Границы санитарно-защитных зон	7- 23	55	55	70
	23- 7	45	45	60
10. Площадки отдыха территорий жилой застройки	-	45	45	60

Автомобильная дорога (а/д) - объект транспортной инфраструктуры, предназначенный для движения автотранспортных средств, включающий в себя дорожное полотно (конструктивный элемент) и дорожные сооружения (технологическая часть). Процессы шумообразования определяется двумя основными источниками: силовая установка и шины при скоростях свыше 50 км/ч [44-50]. Внешний шум легковых автомобилей составляет 70-75 дБА, а грузовых 75-

80 дБА. Шум автомобильных потоков в дневное время лежит в пределах 60-80 дБА, превышая допустимые уровни на 5-25 дБА [10, 41].

На шум автотранспортного потока основное влияние оказывают [10, 44-48]:

- скорость и интенсивность движения;
- состав потока;
- тип дорожного покрытия.

Средства защиты от шума автотранспорта подразделяются на [18-23, 44-52]:

- снижение шума в источнике (пористый асфальт),
- снижение шума на пути распространения (акустические экраны, земляные валы, насыпи, выемки, зелёные насаждения, туннели),
- снижение шума в объекте защиты (шумозащитное остекление зданий, обработка фасадов зданий звукопоглощающими материалами),
- организационные меры (снижение скорости движения, запрещение движения грузовых автомобилей и др.).

Из перечисленного наибольшее применение находят: пористый асфальт, акустические экраны, выемки, насыпи (земляные валы), зелёные насаждения, шумозащитное остекление. Эффективность этих мер, а также их стоимостные характеристики и будут рассмотрены подробно.

Железные дороги (ж/д) - сооружения, которые являются основным элементом инфраструктуры железнодорожного транспорта. Основным источником шума: взаимодействие колеса с рельсом или, в отдельных случаях, колеса с тормозными колодками [11-13, 53-55]. Шум железнодорожного подвижного состава зависит от [11, 18, 22, 44, 53-55]:

- скорости движения,
- типа подвижного состава,
- расстояния от железной дороги до жилой или другой застройки ( $R_3$ ).

При близком расположении железной дороги к домам эквивалентные уровни звука дневное время составляют 65-85 дБА, то есть превышение от 10 до 30 дБА [41, 55].

Средства снижения шума аналогичны вышеописанным для автомобильной дороги, но с некоторой спецификой.

Во-первых, снижение шума в источнике образования достигается [22, 54-57]:

- шлифовкой поверхности катания рельсов (ШР);
- обработкой поверхности катания колеса;
- установкой вибродемпфирующих накладок на шейку рельса (ВДН);
- применение подбалластных матов (ПМ).

Во-вторых, на железнодорожном транспорте наряду с акустическими экранами обычной высоты применяются так называемые малые экраны (высотой до 1 м), расположенные вблизи головки рельса в пределах габаритов приближения строений [54, 57]. Однако их эффективность невелика (до 5 дБА), а установка препятствует сооружению более эффективных шумозащитных конструкций (валов, экранов).

Наиболее широко проектировщиками используются: накладки на рельс, акустические экраны, выемки, насыпи, шумозащитное остекление домов, туннели.

Для дальнейшего рассмотрения выбран шумозащитный комплекс в составе (рис. 1.1):

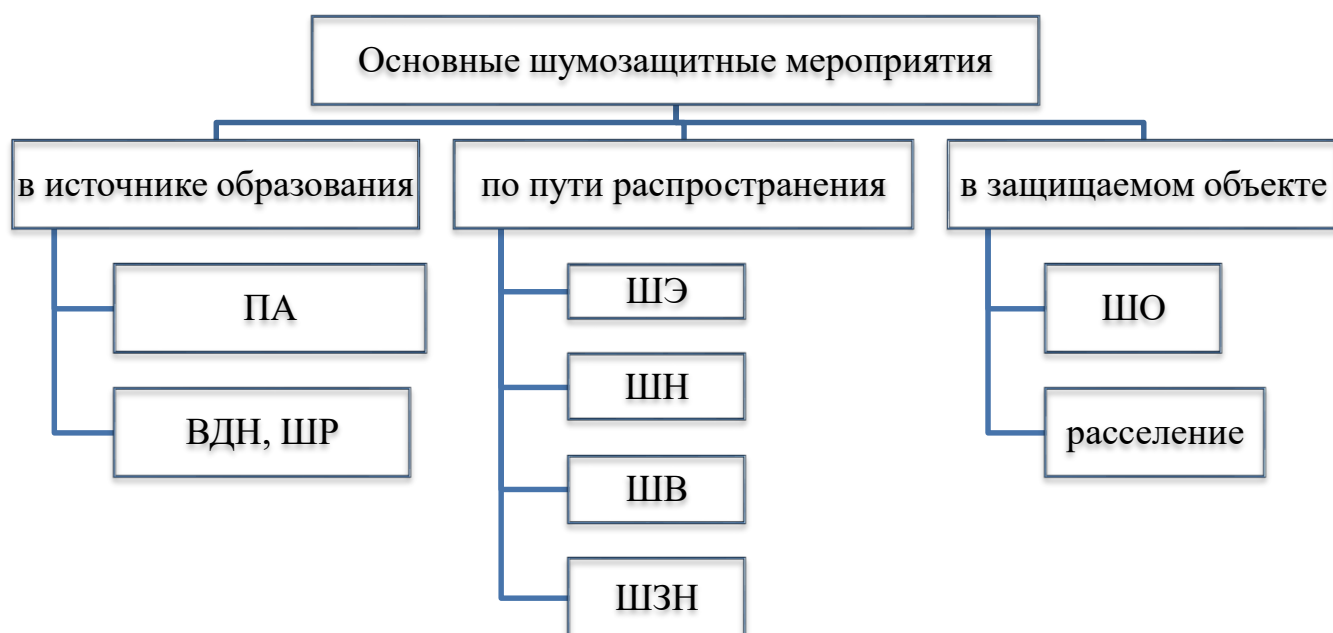


Рисунок 1.1 – Шумозащитный комплекс автомобильных и железных дорог

1. пористый асфальт (ПА) для а/д, шлифование (ШР) или накладки на рельс (ВДН) для ж/д;
2. шумозащитные экраны (ШЭ),
3. шумозащитные насыпи (ШН),
4. шумозащитные выемки (ШВ),
5. шумозащитные зелёные насаждения (ШЗН),
6. шумозащитное остекление домов (ШО) или расселение жителей.

## 1.2. Снижение шума в источнике образования

**Пористый асфальт.** Укладка пористого (или мягкого) асфальта является едва ли не единственной мерой снижения шума автомобилей в источнике образования (конечно, если не читать снижение шума самих автомобилей). Принцип действия этого средства основан на частичном поглощении звука, который образуется от работы двигателя и шин. Это мера достаточно широко практикуется в мире [58-64]. Так в Германии имеется программа оборудования автомобильных дорог мягким асфальтом в течение определенного времени [61, 64]. В литературе имеется противоречивая точка зрения на эффективность таких покрытий. Авторы определяют снижение шума, основываясь на данных измерений в пределах от 2 до 6 дБА. Воспользуемся контрольной цифрой, приведённой в немецкой программе [61], а также поправкой, учитывающей влияние типа дорожного покрытия в СП [33], и в дальнейшем будем руководствоваться значением 3 дБА при расчетах.

**Накладки на рельс.** Общий вид этого устройства показан на рисунке 1.2.

Принцип действия - снижение шума за счет уменьшения площади звукоизлучения, а также снижения звукоизлучения за счёт вибродемпфирования рельса. Эффект такой конструкции составляет по разным экспериментальным данным от 1 до 4 дБА. Примем данные отечественных экспериментов 2дБА [54, 65-69] и будем руководствоваться этой цифрой в дальнейших расчетах.



Рисунок 1.2 – Вибродемпфирующая резиновая накладка на шейку рельса

Помимо вибродемпфирующих накладок на железнодорожных путях используют **шлифование рельсов** и применяют **подбалластные маты** [54, 67, 70-73]. Каждое из этих мероприятий по экспериментальным данным даёт до 2 дБА.

Однако следует упомянуть, что совместно эти средства не применяются и эффективность снижения шума в источнике достигает лишь 2-3 дБА.

### 1.3. Снижение шума на пути распространения

Данное направление основано на экранировании шума шумозащитными конструкциями (ШЗК), такими как: шумозащитные экраны (ШЭ), насыпи (ШН) и выемки (ШВ), а также шумозащитные зелёные насаждения (ШЗН). Верхняя поверхность (кромка или ребро) сооружения находится выше прямой, соединяющей источник шума (ИШ) и защищаемый объект. Через верхнее и два боковых ребра дифрагирует звук. ШЗК создает зону акустической тени, в которой должен находиться защищаемый объект.

Акустическая эффективность шумозащитных конструкций для защиты от шума железнодорожного транспорта определяется по ГОСТ 31295.2-2005 [24] и ГОСТ 33325-2015 [25], от автомобильного шума по СП 276.1325800.2016 [33], ОДМ 218.2.013-2011 [37], отчасти ОДМ 218.8.011-2018 [38].



Ключевым параметром, определяющим эффективность ШЗК, является его высота ( $H$ ), а в случае ШЗН и ширина посадки. Также на снижение шума оказывают влияние:

- шумопоглощающие, шумоотражающие свойства и форма ШЗК (Г, Т У -образная форма верхней граничной поверхности ШЭ; уклон – для ШН и ШВ, ширина верхней площадки – для ШН),
- длина ШЗК.

Помимо конструктивных параметров ШЗК, на её эффективность влияют [74]:

– частота ( $f$ ) или длина волны ( $\lambda$ ) звука. Для расчёта эффективности ШЗК в дБА в ГОСТах [24, 25] частота принимается равной 1000 Гц, в СП [33] длина волны принимается равной 0,84 м и 0,42 м для авто- и железнодорожного транспорта соответственно. В ОДМ [37] формулы расчёта эффективности приводятся сразу в дБА;

– расположение ШЗК, его верхней дифракционной кромки, относительно источника шума (ИШ) и расчётной точки защищаемого объекта (РТ), параметр  $\delta$ :

$$\delta = a + b - c, \quad (1.1)$$

где  $\delta$  – разность хода звукового луча при наличии экранирующего сооружения (рис. 1.3);

$a$  – расстояние от источника шума до дифракционной кромки (первой в случае дифракции на двух кромках ШН);

$b$  – расстояние от дифракционной кромки (второй дифракционной кромки в случае дифракции на двух кромках ШН) до РТ;

$c$  – расстояние от ИШ до РТ (траектория распространения прямого звука).

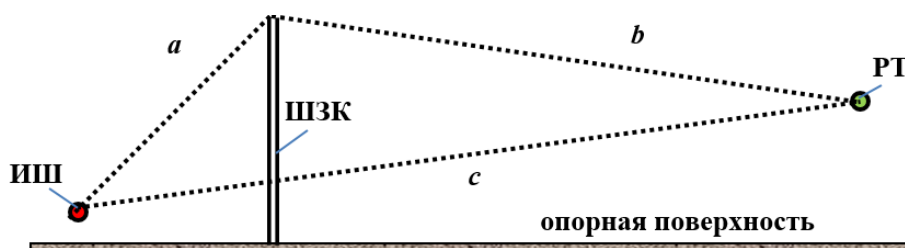


Рисунок 1.3 – Схема шумозащитной конструкции

Расчёт эффективности, например, ШЭ основан на формуле расчёта эффективности, предложенной З. Маекавой [22, 75]:

$$\Delta L^3 = 10 \cdot \lg 20 \cdot (2 \cdot \delta / \lambda), \quad (1.2)$$

где  $\Delta L^3$  – эффективность экрана, дБ(А);

$\lambda$  – длина звуковой волны, м.

Дополнительными параметрами, влияющими на эффективность ШЗК, и отмеченными только для железнодорожного шума в ГОСТе [37] являются количество дифракций и коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий ( $K_{\text{мет}}$ ), рассчитываемый по формуле:

$$K_{\text{мет}} = \exp \left[ -\left(\frac{1}{2000}\right) \cdot \sqrt{a \cdot b \cdot c / (2 \cdot \delta)} \right] \text{ для } \delta > 0 \quad (1.3)$$

$K_{\text{мет}} = 1$  для  $\delta \leq 0$  или  $R_3 < 100$ , что не вносит в расчёт ошибку более 1 дБА, поэтому для упрощения расчётов  $K_{\text{мет}}$  можно пренебречь.

### 1.3.1. Шумозащитные экраны

Литература, посвящённая акустическим экранам, чрезвычайно обширна [19-23, 76-91]. Разработано немало нормативной документации, содержащей требования к данной ШЗК и порядок расчёта эффективности ШЭ [24-29, 31-39].

В частности, согласно ГОСТ [24] эффективность ШЭ можно рассчитать по формуле:

$$\Delta L^3 = 10 \cdot \lg \left( 3 + C_2 / \lambda \cdot C_3 \cdot \delta \cdot K_{\text{мет}} \right), \quad (1.4)$$

где  $C_2$  – константа, учитывающая эффект отражения от земли ( $C_2=20$ );

$C_3$  – константа, учитывающая дифракцию на верхних кромках ШЗК, равна 1 при дифракции на одной кромке (для тонких ШЭ, ШВ).

По ОДМ [37] только в дБА:

$$\Delta L^3 = 18,2 + 7,8 \cdot \lg(\delta + 0,02). \quad (1.5)$$

В СП [33] эффективность ШЭ, защищающих жилую застройку в пределах 200 м, определяется как:

$$\Delta L^3 = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{2\pi|2\delta/\lambda|}}{\text{th}\sqrt{2\pi|2\delta/\lambda|}} + 5. \quad (1.6)$$

Эффективность звукопоглощающего ШЭ больше отражающего ШЭ. В научной литературе можно встретить зависимости эффективности ШЭ от поглощающих и отражающих свойств материала(ов) его конструкции через коэффициент поглощения [19-21, 76-80]. Однако они не нашли отражения в нормативной документации. И в ГОСТе [24], и согласно СП [33] допускается принимать поправочный коэффициент (обозначим его  $K_M$ ) равный 3 дБА.

Изменённая форма верхнего ребра ШЭ путём добавления надстройки (рис. 1.4) позволяет дополнительно снизить шум в пределах 1,5-3 дБА [19-21, 83-88].

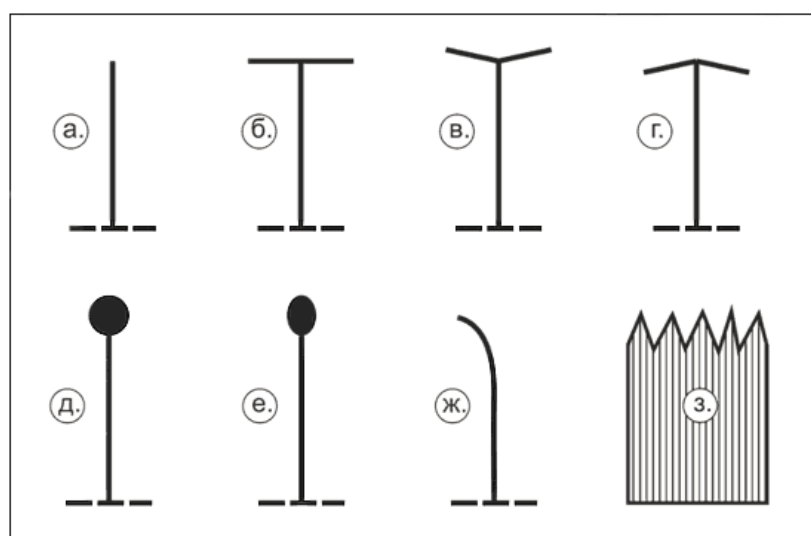


Рисунок 1.4 – Схемы надстроек на верхней части ШЭ

а - прямой ШЭ; б, в, г - "Т"-образный, "У" - образный, стрелообразный ШЭ;  
 д, е –цилиндро-, эллипсообразный ШЭ; ж - наклонный ШЭ;  
 з - пилообразная верхняя часть ШЭ.

Оценка указанных конструктивных решений представлена в таблице 1.2 и используется в нормативной документации [33, 37]. Обозначим такую поправку на форму экрана как  $K_\phi$  и будем ссылаться на данные таблицы 1.2.

Таблица 1.2 – Оценка эффективности ШЭ высотой более 4 м с модифицированной конструкцией верхней части [33]

Влияние на эффективность и стоимость	Форма ШЭ				
	"Г, Г"-образный	"У"-образный	Наклонный	Поглощающие поверхности с одной стороны	Поглощающие поверхности с двух сторон
Поправка на форму экрана, $K_{\phi}$ , дБА	1,5-2,0	1,0-1,5	0,0-0,5	0,0-2,0	2,0-3,0
Относительное удорожание, %	10-15	10-20	10	20	25

Помимо стоимости самой конструкции произойдет и увеличение затрат на её эксплуатацию вследствие усложнения обслуживания и содержания, а дополнительные нагрузки (ветровые, дождевые, снеговые) могут уменьшить долговечность материалов.

Таким образом, из приведенных рассуждений следует, что основным параметром, определяющим эффективность ШЭ при правильно выбранной его длине, является высота экрана, в формулах (1.4)-(1.6) этот параметр «включён» в формулу расчета  $\delta$ , формула (1.1). Наглядная зависимость эффективности ШЭ от высоты ( $H^3$ ) была получена Н.В. Тюриной [21, 78] и А.Е. Шашуриным [19, 20, 83] теоретически и экспериментально:

$$\Delta L^3 = 10 \lg \frac{H^3}{\lambda}, \quad (1.7)$$

где  $H^3$  – высота экрана, м.

Ими же была получена экспериментальная зависимость эффективности ШЭ и от материала, и от высоты (рис.1.5).

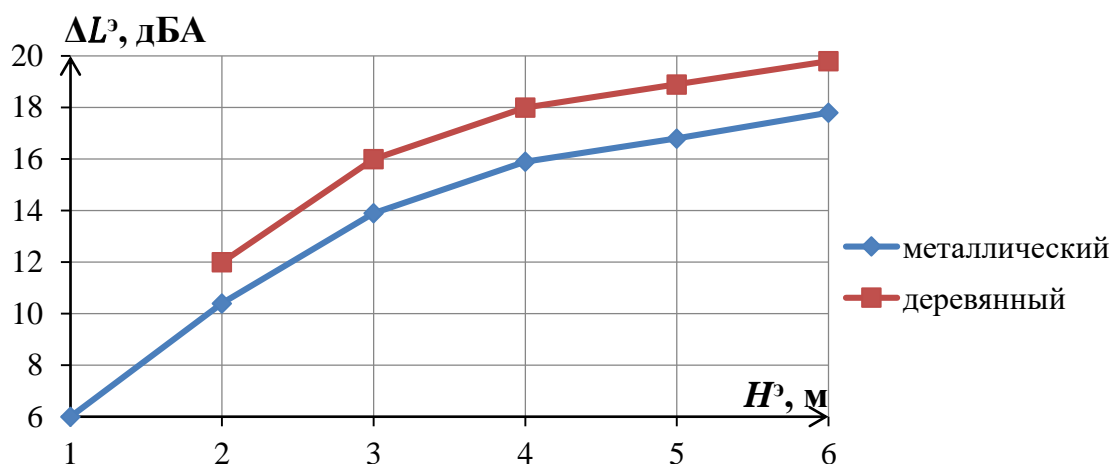


Рисунок 1.5 – Зависимость акустической эффективности отражающе-поглощающих ШЭ от высоты (измерения на расстоянии 25 м)

Несмотря на надёжность приведённых разработок, для дальнейшего практического применения результатов настоящего исследования в формуле расчёта эффективности экрана помимо высоты следует отразить её зависимость и от формы (расположение верхней дифракционной кромки), и от материала экрана.

### 1.3.2. Шумозащитная насыпь

По масштабам применения шумозащитные насыпи (земляные валы) - вторая по распространению конструкция барьерного типа после акустических экранов. Этому вопросу посвящена литература [12, 13, 18, 49-52, 54, 57, 71, 92-102].

Как для всякого экранирующего сооружения ключевым параметром ШН является её высота. Форма насыпи определяется шириной верхней площадки ( $e$ ) и уклоном ( $y$ ) (рис. 1.6). Обозначим ШН ( $y; e$ ) насыпь с уклоном  $y:1$  и шириной верхней площадки  $e$  м. Влияние материала насыпи (его поглощающие свойства) будем учитывать  $K_m$ .

В отличие от тонкого ШЭ без надстройки при огибании звуком верхнего ребра ШН в ряде источников отмечен эффект «двойной дифракции» [22, 23, 97, 98].

Стоит отметить его наличие только для защиты застройки ниже высоты ШН, описываемой в нормативно-технической документации [24, 25, 33, 37].

В основе оценки эффективности ШН – расчёт эффективности мнимого экрана, «вписанного» под одну или обе её вершины. В ОДМ [37] и СП [33] указано, что эффективность ШН ( $\Delta L^H$ ) рассчитывается:

1) как эффективность тонкого ШЭ под вершиной ШН, если насыпь треугольной или трапецидальной формы с шириной верхней части ( $e$ ) до 2 м;

2) как эффективность ШЭ, расположенного под ближней к расчетной точке вершиной насыпи при  $e=2..4$  м, т.е. уменьшается по сравнению с предыдущим вариантом с меньшим значением  $e$ , что нелогично;

3) по аналогии с расчетом эффективности двух тонких шумозащитных экранов, расположенных под вершинами трапецидальной ШН с  $4 < e \leq 10$  м. Предложены 2 варианта расчёта:

3.1) при небольшой разнице отметок верха параллельных экранов (до 1 м), что наиболее подходит для насыпи, снижение шума ШН может быть определено по величине  $\delta'$ , вычисляемой как:

$$\delta' = \delta + e, \quad (1.8)$$

где  $\delta'$  – параметр, учитывающий расположение верхних дифракционных кромок относительно ИШ и РТ (разность хода звукового луча при наличии экранирующего сооружения),

$e$  – ширина верхней площадки насыпи, м.

3.2) энергетически суммируются эффективности каждого из двух ШЭ под гранями ШН по формуле:

$$\Delta L^H = 10 \lg(10^{0,1 \cdot \Delta L^{\text{Э}1}} + 10^{0,1 \cdot \Delta L^{\text{Э}2}}), \quad (1.9)$$

где  $\Delta L^H$  – эффективность ШН, дБ(А),

$\Delta L^{\text{Э}1}$  и  $\Delta L^{\text{Э}2}$  – эффективности экранов под кромками насыпи [74].

В ГОСТе [24] эффективность насыпи допускается рассчитывать как:

$$\Delta L^H = 10 \cdot \lg \left( 3 + C_2 / \lambda \cdot C_3 \cdot (\delta + e) \cdot K_{\text{мет}} \right). \quad (1.10)$$

Здесь  $C_3$  – константа, учитывающая дифракцию на верхних кромках ШЗК, равна:

$$C_3 = \frac{1 + (\sqrt{5}\lambda/e)^2}{1/3 + (\sqrt{5}\lambda/e)^2} \quad (1.11)$$

При ширине верхней части насыпи свыше 10 м в СП и ОДМ [33, 37] применяется расчетная схема, приведенная на рисунке 1.5 а, а эффективность рассчитывается по формуле:

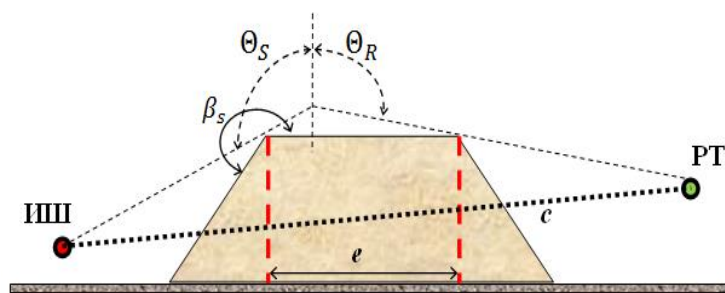
$$\Delta L^H = \Delta L^Э + K(\lg e + 0,7) - K_{\text{скл}}, \quad (1.12)$$

где  $\Delta L^Э$  – снижение шума условным экраном-стенкой,

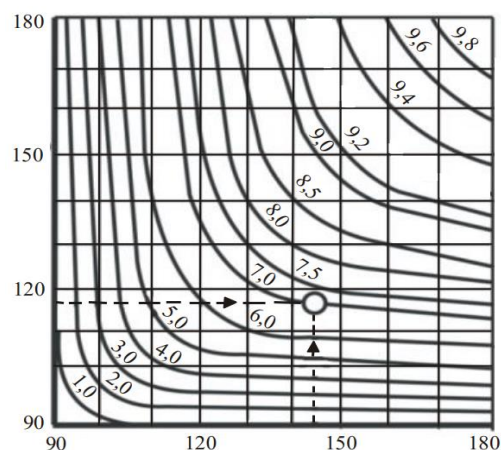
$K$  – величина, определяемая по номограмме в зависимости от величин углов  $\theta_S$  и  $\theta_R$  (рис. 1.6 б);

$K_{\text{скл}}$  – коррекция на склон, равная 1 при внешнем угле  $\beta_S=255$ , 3 при  $\beta_S=240$ , 5 при  $\beta_S=225$ , 6 при  $\beta_S=210$ ; для промежуточных значений  $\beta_S$   $K_{\text{скл}}$  определяется интерполяцией.

Подобная формула есть и в ГОСТе [24], но с принципиальными отличиями. Первое заключается в расположении условного экрана-стенки. В ОДМ и СП – под ближней к РТ вершиной ШН, в ГОСТе – под ближней к ИШ вершиной ШН (что автору представляется более верным). Второе отличие - знак перед поправочным коэффициентом  $K_{\text{скл}}$ . Здесь мнения разработчиков НТД кардинально расходятся. В ГОСТе подчёркивается дополнительное влияние склонов на снижение уровней шума, т.е. однозначно большее снижение шума, нежели снижение экраном и суммирование значения поправки. Третье, явная опечатка в ГОСТе, относительно определения  $K_{\text{скл}}$  по значению «внутреннего» угла. Угол  $\beta_S$  может быть только внешний. Настоящее исследование не коснётся насыпей с шириной верхней площадки ( $e$ ) более 10 м в качестве альтернативы экранам, сооружать такие ШЗК экономически нецелесообразно [74].



а. Схема для определения расчетных параметров



б. номограмма расчёта  $K_{скл}$

Рисунок 1.6 – Схема определения эффективности широкой насыпи

Но актуально, по мнению автора, затронуть защиту среднеэтажной застройки (выше высоты насыпи), не отражённую в НТД. Когда высота РТ ( $h_{рт}$ ) превышает высоту насыпи, снижение шума этой ШЗК становится аналогичным действию тонкого экрана с дифракцией только на ближней к ИШ кромке.

Таким образом, ключевой параметр ШН – высота ( $H^H$ ). Для малоэтажной застройки ( $h_{рт} < H^H$ ) расчёт эффективности этой ШЗК должен учитывать «двойную дифракцию», отражать зависимость от ширины верхней площадки ( $e$ ) и уклона ( $y$ ). Для среднеэтажной застройки – только от  $y$ .

Отсутствие в литературе надежных экспериментальных данных о связи высоты насыпи с ее акустической эффективностью, а также выявленные противоречия и выдвинутые допущения предполагают проведение как соответствующих экспериментальных исследований, так и разработки непротиворечивого метода расчётов.

### 1.3.3. Снижение шума выемками

Нередко для снижения шума автомобильная или железная дорога располагается в выемке (ШВ). Снижению шума выемками посвящена литература [12, 13, 18, 49-52, 54, 57, 71, 92-98, 103, 104].



Согласно теории Маекавы-Френеля [20, 75] эффективность шумозащитной выемки ( $\Delta L^B$ , дБА) может быть описана как:

$$\Delta L^B = 9,4 \cdot \lg(2 + 50 \cdot \delta) \quad (1.13)$$

По НТД выемка имеет эффективность мнимого экрана, условно вписанного под бровку её откоса, той же высоты, дополненную коэффициентом  $K_{\text{скл}}$ .

В ГОСТе [24]:

$$\Delta L^B = 10 \cdot \lg\left(3 + \frac{C_2}{\lambda} \cdot C_3 \cdot \delta \cdot K_{\text{мет}}\right) + K_{\text{скл}}. \quad (1.14)$$

Здесь  $C_2=20$ ,  $C_3=1$ .

В ОДМ и СП [33, 37]:

$$\Delta L^B = 18,2 + 7,8 \cdot \lg(\delta + 0,02) - K_{\text{скл}}, \quad (1.15)$$

$$\Delta L^B = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{2\pi|2\delta/\lambda|}}{\text{th}\sqrt{2\pi|2\delta/\lambda|}} + 5 - K_{\text{скл}}, \quad (1.16)$$

где  $\Delta L^B$  – эффективность ШВ, дБА;

$K_{\text{скл}}$  - коррекция на склон, определяется внешним углом  $\beta_s$ , составляет от 1 до 6 дБА (рис. 1.7).

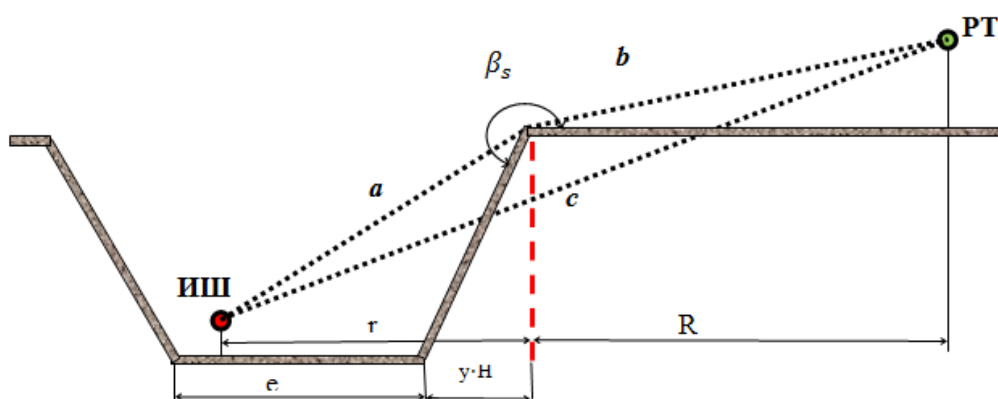


Рисунок 1.7 – Схема для определения эффективности выемки

Ширина нижней площадки выемки определяется категорией дороги, поэтому нет возможности менять её для повышения акустической эффективности. На снижение шума влияет уклон ( $y$ ) ШВ, который вместе с главным параметром –

глубиной ( $H^B$ ) – скрыт в формуле параметра  $\delta$ , формула (1.1). Схема для определения эффективности ШВ представлена на рисунке 1.7.

В исследовании [103] получена зависимость эффективности ШВ от её глубины: при глубине выемки 2 метра снижение УЗ составило 3 дБА; при глубине 3 м - 5 дБА; при глубине 7 м - 10 дБА; при глубине 10 м - 15 дБА (рис. 1.8). Вид зависимости имеет логику, представляется убедительным, однако, построенная только по четырем точкам зависимость требует уточнения.

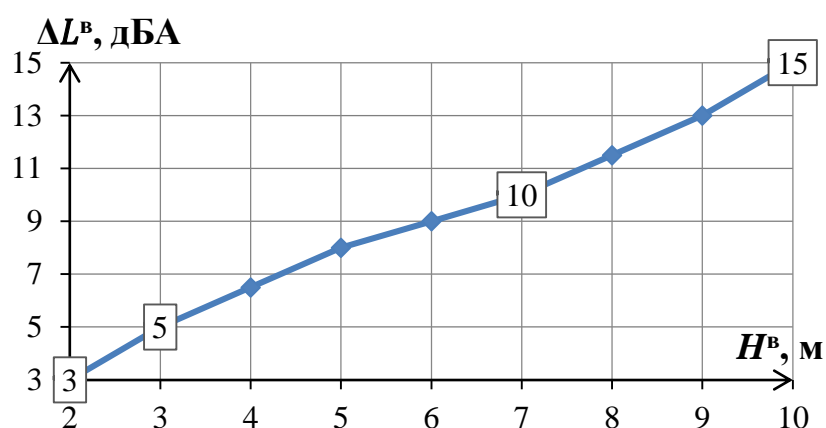


Рисунок 1.8 – Зависимость эффективности выемки, дБА, от высоты, м

Автором [54] изучалось снижение шума выемкой глубиной 6 м при увеличении расстояния от 7,5 до 100 м. Данные исследований в зависимости от типа поездов показаны на рисунке 1.9. На их основании в таблице 1.3 приводится эффективность выемки.

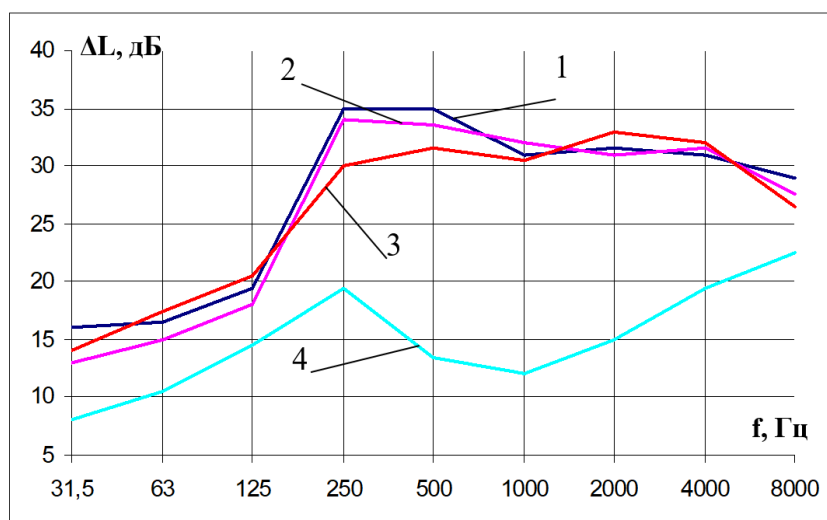


Рисунок 1.9 – Снижение УЗД, дБ, выемкой: 1 – электропоезда; 2 – пассажирские; 3 – скоростные; 4 – снижение УЗД на ровном участке при следовании скоростных

Таблица 1.3 – Снижение железнодорожного шума выемкой

Высота ШВ	Снижение УЗД, дБ, в октавных полосах частот Гц									Снижение УЗ, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
6 м	5	5	5	11	16	18	17	12	7	18

Снижение в низкочастотном диапазоне (31,5-125 Гц) 5-6 дБ, в остальном диапазоне частот снижение УЗД 7-18 дБ. Снижение УЗ приблизительно 18 дБА, что не совпадает с данными на рисунке 1.7 (9 дБА).

В исследовании [18] были произведены попытки экспериментально оценить зависимость эффективности ШВ ( $\Delta L^B$ , дБА) от её глубины ( $H^B$ , м). Полученные данные достаточно противоречивы, так, например, при глубине выемки в 10 м снижение шума за ней составило 15 дБА, а снижение шума выемкой в 9 м, полученное в аналогичных условиях – 20 дБА.

Для получения достоверных данных необходимо выполнить расчёты и эксперименты, устанавливающие связь эффективности выемки с её глубиной. Также актуален вопрос применения  $K_{скл}$  и влияние на эффективность материала поверхности выемки.

#### 1.3.4. Комбинации шумозащитных конструкций

Как отмечалось выше, в нормативных документах не уделяется внимания защите среднеэтажной застройки. Высота ШЗК ограничена рядом факторов, однако применение комбинации ШЗК позволяет решить и эту проблему.

Для защиты высоко расположенной застройки (но находящейся под лучом, соединяющим ИШ и верхнюю дифракционную кромку ШЗК) применимы сооружения в виде комбинаций: насыпей или выемок с экраном. Сооружение типа ШВ-ШН или ШВ-ШН-ШЭ рассматривать нецелесообразно, т.к. зачастую один ШЭ оказывается эффективнее. Исключение составят только выемки и насыпи с малым уклоном.

Эффективность ШЗК (комбинации ШЗК), применяемой для защиты многоэтажной застройки можно рассчитать по формулам (1.4)-(1.6), правильно

вычислив параметр  $\delta$ . Схемы для расчёта эффективности комбинаций ШЗК представлены на рисунке 1.10.

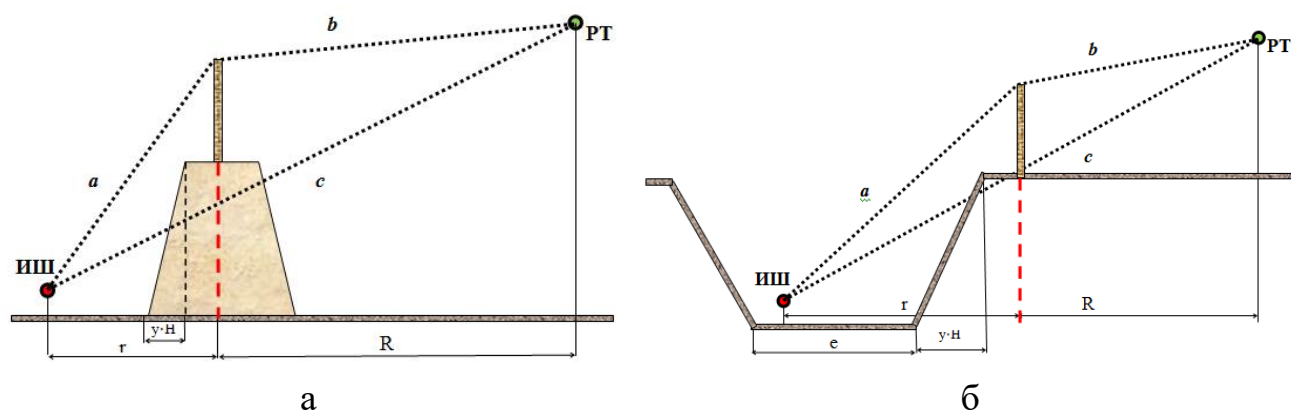


Рисунок 1.10 – Схемы для определения эффективности комбинаций ШЗК:  
а. насыпь с экраном, б. выемка с экраном

В случае комбинации ШН-ШЭ ширина верхней площадки насыпи ( $e$ ) не влияет на эффективность шумозащиты, нужно выбирать её размер минимально необходимый для размещения на насыпи экрана либо с целью уменьшения землеотвода. Уклон ( $y$ ) насыпи и выемки влияет на эффективность комбинированного ШЗК также, как и без установленного на них экрана [74].

В ОДМ и СП [33, 37] предложено эффективность представленных на рисунке 1.10 комбинаций ШЗК рассчитывать энергетическим суммированием:

$$\Delta L^{0+\varepsilon} = 10 \lg(10^{0,1 \cdot \Delta L^0} + 10^{0,1 \cdot \Delta L^\varepsilon}), \quad (1.17)$$

где  $\Delta L^0$  - эффективность основания конструкции (выемки или насыпи), дБА;

$\Delta L^\varepsilon$  - эффективность ШЭ, дБА.

Однако расчёты по этой формуле дают завышенные результаты.

### 1.3.5. Зелёные насаждения

Вопрос снижения шума зелёными насаждениями изучен достаточно тщательно [40, 41, 49-52, 54, 105-114]. Еще в начале семидесятых годов прошлого столетия были получены экспериментальные зависимости снижения шума от частоты звука, вида зеленых насаждений и расстояния (табл. 1.4).

Таблица 1.4 – Экспериментальные зависимости снижения звука в зависимости от частоты, вида зеленых насаждений и расстояния [49]

Вид зелёных насаждений	Октавные полосы частот, Гц					Среднее снижение для всех частот, дБ/м
	200-400	400-800	800-1600	1600-3200	3200-6400	
Кроны сосен	0,08-0,11	0,13-0,15	0,14-0,15	0,16	0,19-0,2	0,15
Сосновый лес	0,1-0,11	0,1	0,1-0,15	0,16	0,14-0,2	0,15
Кроны елей	0,1-0,12	0,14-0,17	0,18	0,14-0,17	0,23-0,3	0,18
Густой лес лиственный	0,05	0,05-0,07	0,08-0,1	0,11-0,15	0,17-0,2	0,12-0,17
Зелёная густая изгородь	0,13-0,15	0,17-0,25	0,18-0,35	0,2-0,4	0,3-0,5	0,25-0,35

Авторы утверждают, что механизм снижения шума комбинированный: звук отражается от стволов деревьев, поглощается их кроной и листьями кустарника. Этот механизм имеет ярко выраженный частотно зависимый характер. Так, для низких частот снижение составляет 0,08-0,15 дБ, для высоких 0,14-0,5 дБ, причём густая посадка очень эффективна в высокочастотном диапазоне. Из таблицы 1.4 ясно, что на характер снижения шума также влияет вид зеленых насаждений. Результаты натуральных исследований приведены на рисунке 1.11.

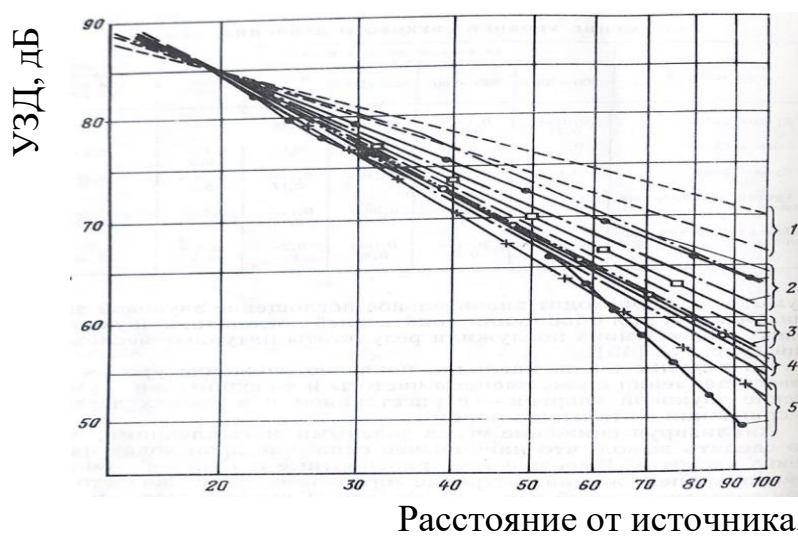


Рисунок 1.11 – Снижение шума зелёными насаждениями [32]:  
 1 – поле, 2 – высокие сосны и пихты (200-400 Гц), 3 – те же (400-1600 Гц), 4 – сосны, молодые насаждения, пихты (1600-3200 Гц), 5 – те же (4000-8000 Гц)

Здесь интересно отметить, что на очень небольших расстояниях (до 20 м) снижение шума слабо зависит от вида насаждений, но с увеличением расстояния эта закономерность проявляется ярко.

В ряде исследований для сложившегося озеленения вокруг дорог была получена незначительная их эффективность для защиты от транспортного шума линейных источников [54, 70, 72, 96]. Так, в [54] изучалась снижение УЗД и УЗ для разных типов поездов. Полученное экспериментом снижение УЗ лесным массивом шириной 100 м составило 4-5 дБА. Их результаты легли в основу НТД (табл. 1.5).

Таблица 1.5 – Эффективность лесопосадки с плотной листвой [47, 60]

Ширина лесопосадки $b_{лп}$ , м	Среднегеометрическая частота октавной полосы $f$ , Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10..20	Эффективность $\Delta L^{лп}$ , дБ							
	0	0	1	1	1	1	2	3
20..200	Эффективность $\Delta L^{лп}$ , дБ/м							
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

Лесопосадка (ЛП) шириной 20 м даст снижение шума в 1 дБА, с увеличением ширины (  $b_{лп}$  ) её эффективность увеличивается на: 0,06 дБА/м для железнодорожного и на 0,05 дБА/м для автотранспорта. В [33] на 0,08 дБА/м. Приняв в учёт данные экспериментов, эффективность ЛП ( $\Delta L^{лп}$ ) в зависимости от её ширины примем как:

$$\Delta L^{лп} = 0,06 \cdot b_{лп}, \quad (1.18)$$

где  $\Delta L^{лп}$  - эффективность лесопосадки, дБА;

$b_{лп}$  - ширина лесопосадки, м.

В тоже время в работе [41] снижение УЗ транспортного шума для полосы шириной 20 м составило 5-7 дБА, для полосы шириной 40 м 8-10 дБА.

Современные исследователи утверждают, что на снижение шума помимо густоты и дендрологического состава посадок существенно влияет и их структура. Е.П. Самойлюк [105] отметил наиболее эффективное использование полос зеленых насаждений шириной 25-30 м, состоящих из обособленных рядов (5-6 рядов) с

хорошим подлеском и кустарником. Каждый ряд такой полосы дает эффект снижения около 1,8 дБА. Желательно в плане такую полосу располагать по зигзагообразной линии, которая увеличит площадь отражения звуковой энергии. На эффективность шахматной посадки указал также Б.Г. Прутков [49, 50]. М.М. Болховитина считает, что зеленые насаждения с шахматной структурой посадки на 3-4 дБ эффективнее снижают уровни шума по сравнению с зелеными насаждениями рядовой конструкции посадки [106]. В предлагаемых насаждениях звуковая энергия снижается за счет прохождения через среды различных плотностей, отражения от зеленых экранов (ряда полос), распространения по зеленым коридорам (подкроновое пространство), а дифракция звуковых лучей уменьшается за счёт количества полос.

Высокие деревья наиболее эффективно ослабляют звуки низких частот, деревья средней величины - звуки средних частот, кустарники - звуки высоких частот. При этом у всех пород с повышением частоты растут звукопоглощающие свойства [13, 107, 108].

Исследования Г.П. Берфиной [108] позволили определить коэффициенты звукопоглощения четырех древесных пород, в частности, для каштана конского и липы мелколистной в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 1000 и 2000 Гц они составили 0,70-0,92 и 0,31-0,45. По данным этих исследований достаточно эффективным звукопоглощением обладают и хвойные породы.

Автором [110] практически реализована макетная методика определения звукоизолирующих и звукопоглощающих свойств рядового шумозащитного озеленения, имеющего продольный межкроновый разрыв, в зависимости от ширины и количества разрывов, дендрологического состава посадки. Подтверждена высокая их эффективность для защиты от транспортного шума и возможность проектировать подкроновые ярусы полос зеленых насаждений требуемой акустической эффективности.

Эффективность шумозащитного озеленения по ОДМ 218.011-98 [40] и исследованиям [108-112] приводится в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Эффективность шумозащитного озеленения

Ширина шумозащитного озеленения	Эффективность, дБА по [40]	Эффективность, дБА по [108-112]
Трехрядная полоса лиственных деревьев в рядовой конструкции с кустарником шириной 10 м	7-8	7-9
Четырехрядная посадка лиственных деревьев в рядовой конструкции с кустарником шириной 15 м	8-9	10-12
Четырехрядная посадка хвойных деревьев в шахматной конструкции с кустарником шириной 20 м	15-18	
Пятирядная посадка лиственных деревьев в шахматной конструкции с кустарником шириной 20 м	16-19	-

Таким образом, с целью шумозащиты предложены к рассмотрению два варианта насаждений: шумозащитная лесопосадка (ЛП), состоящая из невысоких деревьев и кустарника случайного состава, и шумозащитное озеленение (ШЗ), разработанное на основе исследований последних десятилетий [108-112]. Основное требование к ШЗ – это плотность их лиственного или хвойного покрова, рядовая посадка 3-5 полос, высота деревьев порядка 7 м (возраст 15-20 лет). Для специальных шумозащитных полос следует подбирать 1-2 породы деревьев: быстрорастущих, дымогазоустойчивых, с массивной кроной, с большим удельным весом "зеленой массы". При проектировании шумозащитного озеленения следует стремиться получить в сечении общего контура форму треугольника с более полой стороной к источнику шума (рис. 1.12).

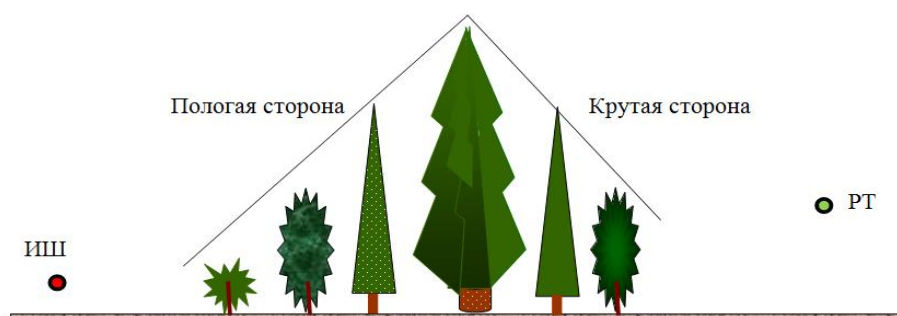


Рисунок 1.12 – Схема шумозащитного озеленения:

1 ряд – низкий кустарник; 2, 6 ряды – высокий кустарник; 3, 5 ряды – сопутствующая древесная порода (СДП); 4 ряд – главная древесная порода (ГДП)



Посадка осуществляется в шахматном порядке.

По составу ШЗ отличается от лесопосадки наличием главной древесной породы – деревьев пятой группы высотой 5-8 м, поэтому для дальнейшего исследования эффективность шумозащитных насаждений будем рассчитывать как:

$$\Delta L^{\text{ШЗН}} = \Delta L^{\text{ЛП}} + K_{\text{М}} \quad (1.19)$$

где  $\Delta L^{\text{ЛП}}$  – эффективность лесопосадки, дБА (определяется по формуле (1.18) и табл. 1.5);

$K_{\text{М}}$  - коэффициент, учитывающий посадку (для ЛП – 0 дБА, для ШЗ примем среднее значение 5 дБА).

Минимальную ширину шумозащитных насаждений примем за 20 м, ширину ШЗ условно примем 25 м (что соответствует эффективности 6,5 дБА).

### 1.3.6. Длина шумозащитных конструкций

Длина ШЗК подбирается в зависимости от расстояния до защищаемого объекта ( $D$ ), как показано на рисунке 1.13.

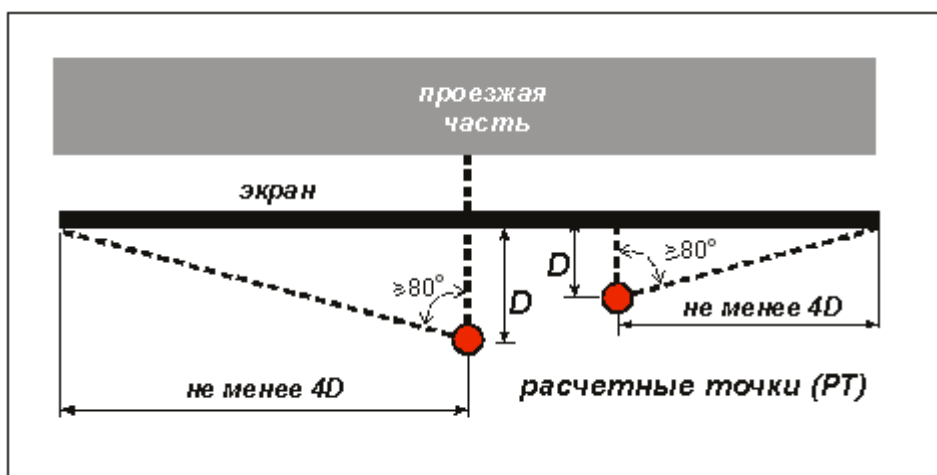


Рисунок 1.13 – Схема для определения длины ШЗК [37]

Для предотвращения проникания транспортного шума она должна быть больше длины защищаемой застройки на расстояние, в 4-4,5 раза превышающее расстояние от сооружения до крайних точек объекта защиты [24, 33] или на величину катетов под углом  $80^{\circ}$  (как показано на рисунке 1.14). Отгон длины ШЗК

( $l_{отг}$ ), т.е. её увеличение за счет дополнительных участков аналогичной конструкции, превышающих пределы защищаемой жилой застройки, определяют по номограмме (рис. 1.14 в), в зависимости от расстояния  $R_3$  [37].

При невозможности обеспечения требуемой длины проектируют дополнительные боковые отгоны ШЗК (рис. 1.14 б) так, чтобы выполнялось условие - боковые кромки экрана видны из расчетной точки под углом не менее  $160^\circ$ .

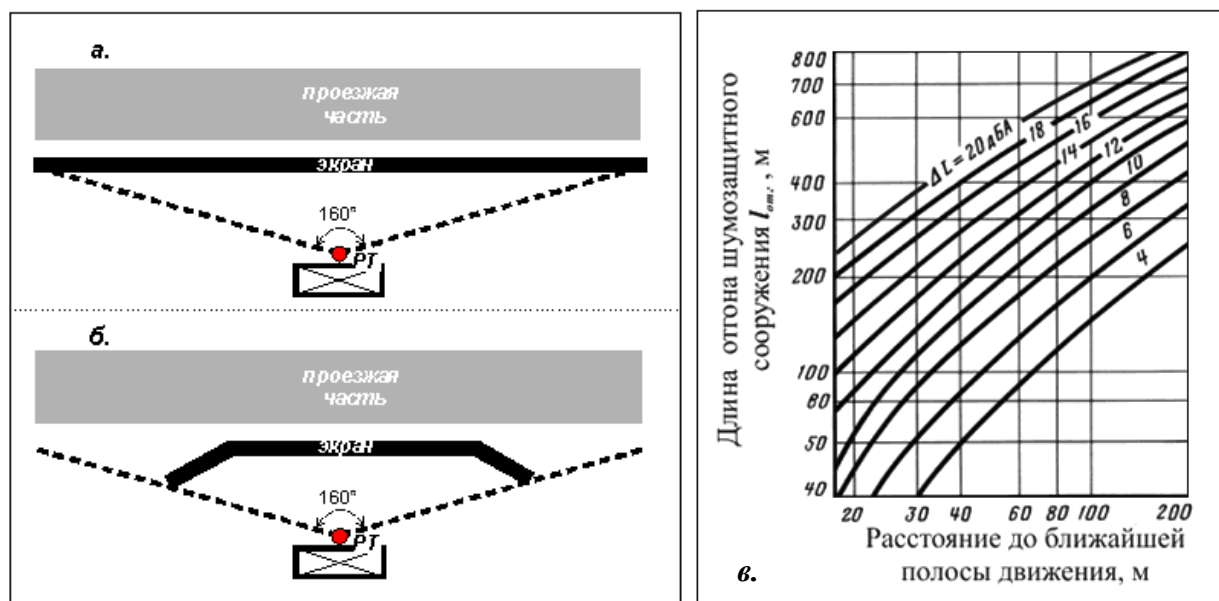


Рисунок 1.14 – Обеспечение необходимой длины ШЗК

а. – прямая ШЗК; б. – искривлённая в сторону защищаемого участка ШЗК;  
 в – номограмма определения длины отгона ШЗК

Если и это условие невыполнимо, применяется поправка  $K_{дл}$  по таблицам СП [33]. Она рассчитывается по эффективностям отгонов с каждой из сторон ШЭ в зависимости от противоположных им углов и разности таких эффективностей.  $K_{дл}$  определяется для каждого конкретного случая проектировщиком, актуальна для расчёта эффективности отгонов или непротяжённых ШЗК.

В качестве ШЗК используют протяженные здания и сооружения, входящие, например, в инфраструктуру железной дороги, а также расположенные на пути распространения шума к жилой застройке. Оценка снижения уровней шума зданиями различной формы описана в [115] и не будет рассматриваться в настоящем исследовании.

#### 1.4. Снижение шума в защищаемом объекте

**Шумозащитное остекление.** Этому вопросу посвящена литература [8, 12, 13, 18, 22, 49-52, 93, 116-118]. Окна могут иметь самые различные значения звукоизоляции (ЗИ<sub>А</sub>): от 20 до 48 дБА (табл.1.7).

Таблица 1.7 – Снижение УЗ оконными проемами

Конструкция окна		ЗИ <sub>А</sub> , дБА	
Толщина стекла, мм	Воздушный промежуток, мм	Без прокладок	Глухое остекление
Одинарный переплет			
2,0	—	20	22
8,8	—	24	29
Двойной переплет			
2,0	25	34	41
8,0	25	40	48
Оконный проем			
Открытое окно		5	—
Открытая форточка		10	—

На эффективность оконных блоков влияет как количество стекол в оконном блоке, так и толщина стекол и размер камер. Дополнительно к остеклению применимы тканевые оконные шторы (звукоизолирующие полотна), которые согласно исследованию [118] позволяют повысить звукоизоляцию жилых помещений на 3-5 дБ.

Для выполнения расчетов удобно пользоваться принятой в отечественных нормативных документах [24, 33, 37, 42] поправкой. Для шумозащитных домов, где выполнено шумозащитное остекление фасадов, допускается увеличивать нормативный параметр для шума на территории жилой застройки на 10 дБА.

**Расселение** также рассматривается в качестве защиты от транспортного шума, однако, этот механизм специфичен, зависит от множества факторов и картографических, и экономических. В ряде источников классифицируется как вариант шумозащиты – защита расстоянием. На стадии проектирования автомобильной или железной дороги в качестве защиты расстоянием также рассматривают проектирование дороги в обход защищаемой территории. Эти меры

целесообразны, когда возведение шумозащитных сооружений экономически менее эффективно.

### **1.5. Экономическая эффективность шумозащитных мероприятий**

Борьба с шумом обходится обществу в пределах от 0,2 до 2% внутреннего валового продукта страны, шумозащита применяется в разных отраслях народного хозяйства [14-17, 119]. Стоимость защиты от транспортного шума может достигать 15% всех затрат на реализацию инфраструктуры дорог [18, 19]. Поэтому выбор шумозащитного комплекса и элементов, входящих в его состав, должен вестись с учётом показателей стоимости и экономической эффективности.

Зарубежная литература, посвященная экономике шумозащиты, основана на сопоставлении затрат на её реализацию с получаемыми выгодами или эффектами [64, 120-125]. Среди затрат выделяют капитальные вложения и эксплуатационные расходы. К числу выгод относят, главным образом, предотвращаемый ущерб здоровью и окружающей среде, качество жизни, стоимость земли и недвижимости и др.

Выделяют две группы показателей экономической эффективности проекта, в т.ч. экологической и социальной направленности, сопоставляющие выгоды-затраты [63, 126-141]:

1) рассчитываемые без учета фактора времени (статические критерии). Критерием выбора предпочтительного варианта являются: максимальный годовой экономический эффект, минимальный (меньше нормативного) срок окупаемости капитальных вложений, минимум приведенных среднегодовых затрат на осуществление проекта.

2) учитывающие фактор времени (динамические критерии):

- максимальная (положительная) величина чистого дисконтированного дохода (ЧДД) или чистой приведенной стоимости (NPV);

- максимальный индекс доходности (ИД) или индекс рентабельности (PI) проекта;

- максимальная внутренняя норма доходности (ВНД, IRR), или модифицированная внутренняя норма доходности (МВНД, MIRR) при нетрадиционных потоках платежей (не встречающихся при реализации шумозащитных мероприятий);

- минимальный дисконтированный срок окупаемости (ДСО, PP) и др.

Международные финансовые стандарты используют дисконтируемые показатели, причём окончательный выбор мероприятия возможен после совместного анализа ЧДД, ИД и ДСО.

Основным показателем при выборе ШЗК в ОДМ [37] является индекс доходности (ИД), рассчитываемый как:

$$\text{ИД} = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{(\Delta Y_t - C_t^{\text{ШЗК}})}{(1+E)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{K_t^{\text{ШЗК}}}{(1+E)^t}}, \quad (1.20)$$

где  $\Delta Y_t$  – предотвращаемый ущерб от транспортного шума в год;

$K_t^{\text{ШЗК}}$  – капитальные вложения в строительство ШЗК;

$C_t^{\text{ШЗК}}$  – эксплуатационные затраты по содержанию ШЗК;

$E$  – норма дисконта;

$T$  – период эксплуатации (25-30 лет).

Второй показатель – срок окупаемости инвестиций.

Чем более полно будут описаны составляющие оцениваемых показателей, тем достовернее результат будет получен [127].

Определение ущерба здоровью и жизнедеятельности населения, а также вреда окружающей среде от акустического воздействия дороги затрагивается в отечественных и зарубежных источниках [1, 17, 142-154].

При этом оценить вред от шума как фактора негативного воздействия на окружающую среду (ОС) на сегодняшний момент не представляется возможным. Минприроды, определяющее таксы и методики размера такого вреда, не реализовало свои полномочия в этой области. Ростехнадзор во времена своего нормативно-правового регулирования в сфере охраны ОС предпринял лишь попытки взимать плату за негативное воздействие на ОС от шума, однако и они

остались в виде проектов. Физические воздействия на здоровье человека контролируют санитарно-гигиенические органы. Результаты их деятельности отражены в отраслевых нормативно-правовых актах.

В частности, в ОДМ [37] оценивается социальный ущерб населению в связи с ухудшением здоровья людей и снижением показателей их работоспособности под воздействием шума. Во внимание принимаются максимальные за день и ночь уровни звука (УЗ), количество подвергаемых этому воздействию человек и условная оценка стоимости указанных негативных эффектов.

Однако, в т.ч. проводимые исследования [3, 142, 143] доказывают, что максимальные показатели УЗ, имея кратковременный характер, преувеличивают получаемый ущерб. А время воздействия шума, т.е. использование эквивалентных УЗ, вообще не берётся во внимание при расчётах по ОДМ [37].

Также вызывает сомнение достоверность полученных значений экономической оценки шумового воздействия, ведь первоисточником этих данных является «Руководство» [136], где четко указано на необходимость их дальнейшей корректировки и уточнения «из-за отсутствия необходимого объема научных данных» на период разработки «Руководства» (1981 г.). В ОДМ [37] они лишь проиндексированы в цены 2010 года (что добавляет погрешности при современных расчётах).

Поэтому должен быть предложен обновленный подход к экономической оценке ущерба, вызванного пребыванием человека в помещениях с повышенными уровнями шума, лишенный указанных недостатков, актуализированный с учётом последних рекомендаций Роспотребнадзора, Минздравсоцразвития и Минфина России, а также экономических исследований [145].

Капитальные вложения в строительство ШЗК (К) – самая значительная статья затрат – включают [37]:

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_n, \quad (1.21)$$

где  $K_1$  – сметная стоимость строительства ШЗК;

$K_2$  – стоимость освоения (или инженерного оборудования) новых земель взамен изымаемых для строительства ШЗК;

$K_3$  – затраты на приобретение машин и механизмов для содержания ШЗК;

$K_n$  – прочие капитальные затраты, необходимые для проведения шумозащитных мероприятий.

Сметная стоимость шумозащитных сооружений, как и стоимость любых строительных работ, включает сметные прямые затраты, накладные расходы и сметную прибыль, а также отдельные виды затрат, относимые на стоимость строительно-монтажных работ [153-163].

Сметные прямые затраты учитывают сметную стоимость материалов, изделий, конструкций, средства на оплату труда рабочих, стоимость эксплуатации машин и механизмов, включая оплату труда рабочих, управляющих машинами (машинистов) по каждому виду работ и затрат [159].

Накладные расходы и сметная прибыль определяются в соответствии со сметными нормативами, сведения о которых включены в федеральный реестр сметных нормативов (ФРСН), формируемый в установленном порядке. Они начисляются в процентах от фонда оплаты труда (ФОТ) в зависимости от вида работ [159-161].

Смета на строительство разрабатывается с использованием сметных нормативов, а также единичных расценок и составляющих единичных расценок к сметным нормам, сведения о которых включены в ФРСН [16, 157, 158, 162].

Анализ смет на ШЗК позволит выявить зависимость расходов от основных конструктивных параметров и тем самым избежать многократной разработки смет аналогичной ШЗК с отличными конструктивными параметрами (высота, уклон, размер верхней площадки, ширина посадки, материал).

Помимо единовременных капитальных вложений в строительство шумозащитных сооружений выделяют текущие затраты по их содержанию и эксплуатации. Эксплуатационные затраты включают расходы на поддержание эффективности ШЗК (очистка, ремонт, укрепление, уход за деревьями и кустарником и др.). При их оценке важен учёт временной составляющей

(дисконтирования), а также срока службы ШЗК [127]. Земляные валы и выемка долговечны, ряд же экранов этого лишены. Как показывает опыт эксплуатации ШЭ, для сохранения их акустических свойств уже через 10-15 лет требуется частичная или полная замена шумозащитного полотна, поэтому актуальна оценка долговечности экранов и затрат на их реконструкцию (или замену) [164, 165].

Также следует учитывать расходы на проектирование и ликвидацию.

Полный жизненный цикл (ЖЦ) шумозащитного комплекса целесообразно рассматривать неразрывно с циклом функционирования дороги, т.е. порядка 25-30 лет. Существуют методики оценки стоимости жизненного цикла, в их числе: Full Cost Accounting (FCA), Cost Environmental Accounting (CEA), Total Cost Assessment (TCA), Life-Cycle Accounting (LCA), Life-Cycle Cost Assessment (LCCA), Life Cycle Costing (LCC), Full Cost Pricing (FCP), Wall Life Costing (WLC) [127-130, 166, 167], их положения реализованы отечественных ГОСТах, не касающихся шумозащиты.

Таким образом, для анализа затрат на шумозащитные мероприятия следует вести исследование по двум направлениям:

1. оценить расходы на шумозащиту через конструктивные параметры сооружений, влияющие на акустическую эффективность;
2. максимально полно охватить затраты на протяжении всего жизненного цикла шумозащиты с учётом дисконтирования.

### **1.6. Задача выбора и оптимизации шумозащитного комплекса**

Зачастую для нормализации вредного влияния транспорта проектируется целый комплекс шумозащитных конструкций, дополнительно используют шумозащитное остекление защищаемых зданий и снижение шума источника (пористый асфальт, вибродемпфирующие накладки, шлифование рельс и др.). При проектировании дорог в первую очередь снижается шум в источнике, далее – на пути распространения, и только при не достижении требуемого снижения – в защищаемом объекте.



Шумозащитные насаждения могут являться как необходимым требованием (например, посадки на ширину до 50 % санитарно-защитной зоны от железной дороги), так и декоративным украшением насыпей и экранов. ШЗН вследствие их малой эффективности отнесём к дополнительным средствам. Условно будем полагать применение ШЗК основными мероприятиями, остальные перечисленные выше – дополнительными.

Допустим, что совместное применение мероприятий разных направлений в комплексе суммирует эффект шумозащиты аддитивно. Возможно подобрать некое множество решений задачи обеспечения требуемого уровня акустической безопасности (вариантов шумозащитных комплексов). Задача оптимизации состоит в выборе среди множества возможных решений (вариантов) лучшего (оптимального) с точки зрения лица, принимающего решение (ЛПР) [168-175], при этом оптимальность возможна с позиций: акустической и экономической эффективности, технологических и эксплуатационных критериев, показателей долговечности, эстетики и др.

Поэтому принимаем, что требование акустической безопасности должно быть неоспоримо выполнено: оптимальный вариант должен обеспечить требуемое снижение шума.

Следующая приоритетная задача – экономическая, формулируется она как минимизация целевой функции стоимости  $C = C(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Искомыми переменными (проектными параметрами), которые определяют решаемую задачу проектирования и вычисляются в процессе оптимизации  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  будут ключевые параметры ШЗК – высота применяемых сооружений. Остальные параметры (форма, материал) определяют многообразие конструкций, виды и типы которых можно представить, как показано в таблице 1.8. В качестве целевой функции, которая позволит количественно сравнить альтернативные решения, примем полную стоимость шумозащитных мер (в течение жизненного цикла дороги) с учётом их срока службы и временной стоимости денег.

Таблица 1.8 –Классификация основных ШЗК по конструктивным параметрам

Параметр, определяющий тип ШЗК	Вид ШЗК		
	Экран (ШЭ)	Насыпь (ШН)	Выемка (ШВ)
Материал, $K_M$ ( $m$ – количество материалов)	поглощающий, отражающий, поглощающе-отражающий		
	ШЭ поглощающий (материал 1)	ШН поглощающая (материал 1)	ШВ поглощающая (материал 1)
	.....	....	....
	ШЭ поглощающий (материал $m_n^Э$ )	ШН поглощающая (материал $m_n^Н$ )	ШВ поглощающая (материал $m_n^В$ )
	ШЭ отражающий (материал 1)	ШН отражающая (материал 1)	ШВ отражающая (материал 1)
.....	...	...	
ШЭ отражающий (материал $m_0^Э$ )	ШН отражающая (материал $m_0^Н$ )	ШН отражающая (материал $m_0^В$ )	
Форма ( $f$ – количество форм)	Г-образный, Т-образный, наклонный и др.	Уклон 1:0,5; 1:1; 1:1,5; 1:2 Площадка 1, 2, 3, ..м	Уклон 1:1; 1:1,5; 1:2; 1:2,5...
	ШЭ форма 1	ШН форма 1	ШВ форма 1
	.....	.....	.....
	ШЭ форма $f^Э$	ШН форма $f^Н$	ШВ форма $f^В$

С целью сужения пространства решений (множества допустимых решений) целесообразно выделить «области оптимального решения» и «наложить ограничения» по технологиям возведения, условиям эксплуатации и др. факторам. Необходимо разработать алгоритм, по которому ЛПР (проектировщик) выберет оптимальный вариант шумозащиты.

Так, выбор варианта ШЗК будет зависеть от высотности защищаемой застройки, его реализация определяться удалённостью зданий от дороги, шириной полосы отвода, выбор материала будет диктоваться погодными условиями, температурным режимом, видом почв и др.

Математическую модель оптимизации будут определять её элементы [168]: 1) исходные данные, 2) искомые переменные, 3) зависимости. Исходными данными для математической модели являются: целевая функция  $C(\vec{x})$ , левые части ограничений  $g_i(\vec{x})$  и их правые части  $b_i$ . Исходные данные могут быть детерминированными и случайными. Искомые переменные могут быть

непрерывными и дискретными (в т.ч. целочисленными). Зависимости между переменными (как целевые функции, так и ограничения) могут быть линейными и нелинейными.

Сочетание различных элементов модели образует различные классы задач оптимизации, которые требуют разных методов решения. Основные классы задач оптимизации приведены на таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Основные классы задач оптимизации

Классы задач	Исходные данные	Искомые переменные	Зависимости
Линейного программирования	Детерминированные	Непрерывные	Линейные
Дискретного программирования	Детерминированные	Дискретные	Линейные
Нелинейного программирования	Детерминированные	Непрерывные, дискретные	Нелинейные
Стохастического программирования	Случайные	Непрерывные	Линейные
Многокритериального программирования	Детерминированные	Непрерывные, дискретные	Линейные, нелинейные

Таким образом, снижение затрат на шумозащиту авто и железных дорог возможно оптимизацией шумозащитного комплекса. Анализ литературы показал, что в нормативной документации отсутствует методика её проведения, а также методики полной оценки экономической эффективности шумозащитных конструкция и однозначной оценки, в т.ч. экспериментальной, акустической эффективности искусственных земляных сооружений (ИЗС): насыпи и выемки. Выбор оптимального по экономическому и акустическому критериям шумозащитного комплекса является актуальной задачей, для решения которой необходимо:

1. Разработать метод расчёта акустической эффективности ИЗС в зависимости от его высоты и других конструктивных параметров (уклон, материал).
2. Разработать методику и выполнить экспериментальные исследования акустической эффективности ИЗС.

3. Получить экспериментальные зависимости акустической эффективности 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.

## **ГЛАВА 2. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШУМОЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. МЕТОД РАСЧЁТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ.**

Имеющиеся в литературе данные о методиках расчёта акустической эффективности таких экранирующих искусственных земляных сооружений (ИЗС), как выемки и насыпи носят противоречивый характер и требуют уточнения. Для получения математические зависимости акустической эффективности ИЗС от его высоты были поставлены задачи:

- разработать метод расчёта акустической эффективности ИЗС;
- установить экспериментальные зависимости акустической эффективности выемок от глубины, насыпей от высоты;
- выполнить сравнение расчётов акустической эффективности ИЗС разработанным методом с данными экспериментов.

### **2.1. Разработка расчетного метода оценки акустической эффективности ИЗС**

#### **2.1.1. Общий подход к расчёту эффективности ИЗС методом преобразования звуковых полей**

Разработанная для задач оптики и для точечного источника, теория дифракции не совсем достоверно отражает картину образования звуковых полей, в т.ч. не отражает реальное соотношение длин волн и размеров препятствий, расстояний между источником шума и расчётной точкой. Это приводит к завышенным значениям эффективности шумозащитных конструкций.

Необходимо вывести новые формулы, чтобы оценить акустическую эффективность ИЗС. Используем метод последовательного преобразования звуковых полей (МПЗП) и теорию дифракции звука.

Звуковое поле в расчётной точке (РТ) формируется вторичными излучателями шума (основанием ИЗС со стороны источника шума (ИШ) и его кромками), преобразующими звуковое поле источника. В ходе преобразования

учитываются геометрические размеры ИЗС и звукопоглощающие свойства их элементов, расположение сооружений в пространстве по отношению к ИШ и защищаемому объекту.

Основные положения разработанного метода:

1. В основе метода положения статистической (звуковое поле), геометрической (звуковой луч) и волновой (длина звуковой волны) теорий акустики. При распространении звука учитываются явления отражения, поглощения, дифракции и геометрической дивергенции звука.

2. Введено понятие «двойная дифракция насыпи» – явление дифрагирования звука через две верхние кромки насыпи трапециевидной формы при расположении защищаемого объекта (РТ) ниже высоты насыпи. При расположении РТ выше высоты насыпи шумозащита указанной ИЗС аналогична действию выемки.

3. Достигнув основания ИЗС, верхней кромки ИЗС, второй кромки насыпи (п. 2) звук распределяется по основанию или свободному ребру ИЗС, которые согласно принципу Гюйгенса становятся вторичным излучателем звука. При распространении звука в присутствии выемки и насыпи с дифракцией на одной кромке звуковое поле ИШ преобразуется дважды, насыпи с «двойной дифракцией» – трижды.

4. Подход учитывает явление дифрагирования звука через свободное ребро (кромки) ИЗС с использованием коэффициента дифракции:  $\beta_{\text{дифр}} = I_{\text{дифр}}/I_{\text{пад}}$ , где  $I_{\text{дифр}}$  и  $I_{\text{пад}}$  – интенсивность дифрагирующего и падающего звука, Вт/м<sup>2</sup>.

5. При распространении звука над опорной поверхностью (до ИЗС), по склону ИЗС (ближнему к ИШ для насыпи), верхней площадкой насыпи (п.2) и от кромки ИЗС (второй для насыпи п.2) происходит снижения его интенсивности за счёт дивергенции в зависимости от характера звуковой волны. Для транспортного потока, принимаемого линейным источником, излучающим цилиндрическую звуковую волну, интенсивность звука в расчётной точке ( $I_{\text{РТ}}$ ) оценивается как:

$$I_{\text{РТ}} = \frac{W_{\text{ист}}}{2\pi l R} \operatorname{arctg} \frac{l}{2R},$$

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

$l$  – длина излучателя, м;

$R$  – расстояние от источника шума до расчетной точки или вторичного излучателя,  $R \leq \frac{l}{\pi}$ , м

Характер звукового поля диффузный (или квазидиффузный).

6. Явления взаимодействия звука с опорной поверхностью до ИЗС (вследствие низкого расположения источника шума), склоном ИЗС (ближнему к ИШ для насыпи), верхней площадкой насыпи (п.2) – отражение или частичное поглощение – учитывается методом мнимых источников с использованием коэффициента звукопоглощения поверхности  $\alpha = I_{\text{погл}}/I_{\text{пад}}$ , где  $I_{\text{погл}}$  – интенсивность поглощённого звука, Вт/м<sup>2</sup>

Принятые допущения:

- источник шума линейный (фронт звуковой волны цилиндрический);
- длина ИЗС условно принимается равной длине источника шума;
- для учёта явлений дифракции на краях ИЗС используется показатель дифракции  $ПД = 10lg\beta_{\text{дифр}}$ , определяемый экспериментально, дифракция через боковые рёбра не учитывается;
- звукоизоляция ИЗС существенно выше её эффективности и в расчётах не учитывается, интерференционные явления, возникающие при распространении звука, не рассматриваются.

Для создания модели шумозащиты с использованием разработанного подхода разработана расчётная схема распространения звука при наличии ИЗС (рис. 2.1)

В основе модели шумозащиты – последовательный переход от акустической мощности к интенсивности звука при каждом изменении характера звукового поля или импеданса препятствия. Исходной величиной в расчетах является акустическая мощность источника ( $W_{\text{иш}}$ ), конечная величина – интенсивность звука в расчетной точке ( $I_{\text{рТ}}$ ). Расчеты выполняются в соответствии с правилом, согласно которому (рис. 2.1):

$$W_{\text{иш}} \rightarrow I_1 \rightarrow W_1 \rightarrow I_2 \rightarrow W_2 \rightarrow (I_3^{\text{H}} \rightarrow W_3^{\text{H}}) \rightarrow I_{\text{РТ}}$$

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

$I_1$  – интенсивность звука на первой поверхности (нижней поверхности ИЗС), Вт/м<sup>2</sup>;

$W_1$  – акустическая мощность звука, излучаемого этой поверхностью, Вт;

$I_2$  и  $W_2$  – то же для второй поверхности (верхняя кромка ИЗС, обращенная к ИШ);

$I_3^{\text{H}}$  и  $W_3^{\text{H}}$  – то же для третьей поверхности (кромки насыпи со стороны РТ для насыпи с двойной дифракцией);

$I_{\text{РТ}}$  – интенсивность звука в расчетной точке (РТ), Вт/м<sup>2</sup> [20, 41].

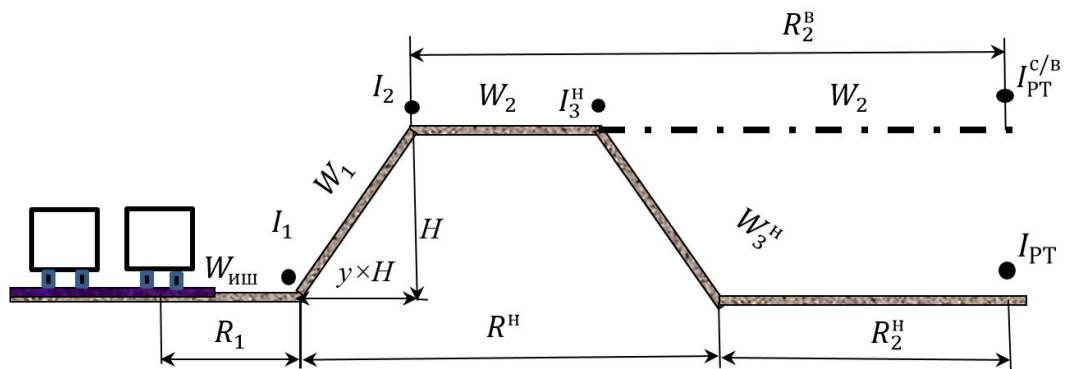


Рисунок 2.1 – Схема для определения эффективности ИЗС (метод преобразования звуковых полей)

Акустическая эффективность ИЗС определяется как:

$$\Delta L_{\text{изс}} = 10 \lg \frac{I_{\text{РТ}}^{\text{б/изс}}}{I_{\text{РТ}}^{\text{с/изс}}} \quad (2.1)$$

где  $I_{\text{РТ}}^{\text{б/изс}}$  – интенсивность звука без ИЗС в расчетной точке (РТ), Вт/м<sup>2</sup>;

$I_{\text{РТ}}^{\text{с/изс}}$  – то же с установленным ИЗС в РТ, Вт/м<sup>2</sup>.

Интенсивность звука в РТ без ИЗС ( $I_{\text{РТ}}^{\text{б/изс}}$ , Вт/м<sup>2</sup>) определяется:

$$I_{\text{РТ}}^{\text{б/изс}} = \frac{W_{\text{иш}}(1-\alpha_{\text{пов}})}{2\pi l_{\text{ист}} \sqrt{(R_1+R_{\text{изс}}+R_2)^2+(h_{\text{РТ}}-h_{\text{иш}})^2}} \arctg \frac{l_{\text{иш}}}{2 \sqrt{(R_1+R_{\text{изс}}+R_2)^2+(h_{\text{РТ}}-h_{\text{иш}})^2}}, \quad (2.2)$$

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

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



$l_{\text{иш}}$  – длина источника шума (участка транспортного потока), условно принимаемая равной длине ШЗК;

$h_{\text{рт}}$  и  $h_{\text{иш}}$  – высота РТ и ИШ, м;

$R_{\text{изс}}$  – ширина ИЗС, м: выемки  $R_{\text{в}} = y \cdot H_{\text{в}}$  и насыпи  $R_{\text{н}} = 2 \cdot y \cdot H_{\text{в}} + e$ ;

$y$  – уклон ИЗС,  $e$  – ширина верхней площадки насыпи, м;

$R_1$  – расстояние от ИШ до основания ИЗС, м;

$R_2$  – расстояние от ИЗС до РТ, м.

Стоит отметить отличия в расположении источника шума (транспортного потока) для оценки его шумовой характеристики и для оценки акустической эффективности шумозащитной конструкции. Также в зависимости от технологии возведения предусматривается определённое расстояние от дороги до ИЗС. Для целей дальнейшего исследования (оптимизации шумозащитного комплекса) уточним ряд расстояний:

$$R_1 = r_1 + r_2,$$

$r_1$  – расстояние от центра ИШ до края ПЧ (пути), определяется в зависимости от категории дороги, м;

$r_2$  – расстояние от края ПЧ (пути) до (первой в случае комбинации) ШЗК, определяется технологией возведения ШЗК, м;

$R_3$  – расстояние от края ПЧ (путей) до защищаемой застройки, м;

$$R_1 + R_{\text{изс}} + R_2 = r_1 + R_3.$$

Определим  $I_{\text{рт}}^{c/\text{изс}}$  методом преобразования звуковых полей [12].

Интенсивность звука, падающего на нижнюю часть ИЗС, определится как:

$$I_1 = \frac{W_{\text{иш}}}{\pi l_{\text{изс}} R_1} \arctg \frac{l_{\text{изс}}}{2R_1}, \quad (2.3)$$

где  $l_{\text{изс}}$  – длина ИЗС, м.

Мощность звукового поля в нижней части ИЗС (условного вторичного ИШ):

$$W_1 = I_1 \cdot l_{\text{изс}} \cdot R_1 \quad (2.4)$$

Интенсивность звука на кромке ИЗС (первой для насыпи):

$$I_2 = \frac{W_1(1-\alpha_{ск})}{\pi l_{изс} \sqrt{H^2+(y \cdot H)^2}} \arctg \frac{l_{изс}}{2\sqrt{H^2+(y \cdot H)^2}}, \quad (2.5)$$

где  $H$  – высота ИЗС, м;

$y$  – уклон ИЗС, обращённый к ИШ;

$\alpha_{ск}$  – коэффициент звукопоглощения склона ИЗС.

Мощность, излучаемая кромкой ИЗС (очередным вторичным источником):

$$W_2 = I_2 \cdot l_{изс} \cdot \lambda \cdot \beta_{дифр1}, \quad (2.6)$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;

$\beta_{дифр1}$  – коэффициент дифракции звука, огибающего край ИЗС со стороны ИШ.

В научной литературе и нормативной документации отсутствуют значения коэффициента дифракции насыпи и выемки. Для экранов теоретически значения  $\beta_{дифр}$  лежат в пределах  $1/\pi \dots 1/2\pi$ . Экспериментально полученный показатель дифракции ШЭ приводится в работах Н.В. Тюриной и А.Е. Шашурина [20, 21] (табл. 2.1). Он выражается как:

$$ПД = 10lg\beta_{дифр}, \quad (2.7)$$

где ПД – показатель дифракции, дБ.

Таблица 2.1 – Значения экспериментально полученных ПД

Среднегеометрические частоты, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Показатель дифракции, дБ	4	6	7	9	11	13	14	19

Ими же получена формула акустической эффективности экрана методом преобразования звуковых полей, подтверждённая экспериментами. С учётом принятых расстояний пути звукового луча:

$$\Delta L_э = 10lg \frac{(r_1+r_2)(R_3-r_2)}{(r_1+R_3)} + 10lg \frac{H^3}{\lambda} - 10lg(1-\alpha_э) - 10lg\beta_{дифр} + 6, \quad (2.8)$$

где  $\alpha_э$  – коэффициент звукопоглощения ШЭ.

### 2.1.2. Акустическая эффективность выемки методом ПЗП

Интенсивность звука в РТ с учётом звукопоглощающих свойств поверхности между краем выемки и РТ:

$$I_{РТ}^{c/в} = \frac{W_2(1-\alpha_{пов})}{\pi l_B R_2} \arctg \frac{l_B}{2R_2}, \quad (2.9)$$

или, выразив через (2.3)-(2.6):

$$I_{РТ}^{c/в} = \frac{W_{иш} \cdot \lambda \cdot \beta_{дифр} \cdot (1-\alpha_{ск}) \cdot (1-\alpha_{пов})}{\pi^3 l_B R_2 \sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}} \times \arctg \frac{l_B}{2R_2} \arctg \frac{l_B}{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}} \arctg \frac{l_B}{2R_1}.$$

Тогда акустическая эффективность выемки с учётом формул (2.1) и (2.2), дБ(А):

$$\Delta L_B = 10 \lg \frac{\pi^2 R_2 \sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2} \arctg \frac{l_{иш}}{2 \sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{рт} - h_{иш})^2}}}{2 \cdot \lambda \cdot \beta_{дифр1} \cdot (1-\alpha_{ск}) \cdot \sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{рт} - h_{иш})^2} \arctg \frac{l_B}{2R_2} \arctg \frac{l_B}{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}} \arctg \frac{l_B}{2(r_1 + r_2)}} \quad (2.10)$$

После логарифмирования (2.8) и учтя  $10 \lg 0,5\pi^2 = 7$  дБ получим:

$$\begin{aligned} \Delta L_B = & 10 \lg \frac{R_2}{\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{рт} - h_{иш})^2}} + 10 \lg \frac{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}}{\lambda} - 10 \lg(1 - \alpha_{ск}) - \\ & - 10 \lg \beta_{дифр1} + 10 \lg \arctg \frac{l_{иш}}{2 \sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{рт} - h_{иш})^2}} - 10 \lg \arctg \frac{l_B}{2R_2} - \\ & - 10 \lg \arctg \frac{l_B}{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}} - 10 \lg \arctg \frac{l_B}{2(r_1 + r_2)} + 7 \end{aligned} \quad (2.11)$$

### 2.1.3. Акустическая эффективность насыпи методом ПЗП

В случае распространения звука при наличии насыпи имеет место большее количество вторичных источников. Звук мощностью  $W_2$  (формула 2.6), излучаемый на первой кромке проходит над верхней площадкой ШН.

Интенсивность звука в дальней от ИШ кромке насыпи:

$$I_3 = \frac{W_2(1-\alpha_H)}{\pi l_H e_H} \operatorname{arctg} \frac{l_H}{2e_H} \quad (2.12)$$

где  $\alpha_H$  – коэффициент звукопоглощения поверхности верхней части насыпи;

$e_H$  – ширина верхней поверхности насыпи, м.

Третьим вторичным источником шума становится дальняя кромка ШН.

Мощность звука вторичного источника, излучающего звук в расчетную точку:

$$W_3 = I_3 l_H \lambda \beta_{\text{дифр}2}, \quad (2.13)$$

где  $\beta_{\text{дифр}2}$  – коэффициент дифракции звука, огибающего край ИЗС со стороны РТ.

Интенсивность звука в расчетной точке (РТ):

$$I_{\text{РТ}}^{c/H} = \frac{W_3(1-\alpha_{\text{пов}})}{\pi l_H \sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2}} \operatorname{arctg} \frac{l_H}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2}} \quad (2.14)$$

где  $R_2$  – расстояние от насыпи до РТ, м.

Подставим (2.3)-(2.6), (2.12) и (2.13) в (2.14) и, выполнив сокращения, получим:

$$I_{\text{РТ}}^{c/H} = \frac{W_{\text{иш}} \cdot \lambda^2 \cdot \beta_{\text{дифр}1} \cdot \beta_{\text{дифр}2} \cdot (1 - \alpha_{\text{пов}}) \cdot (1 - \alpha_H) \cdot (1 - \alpha_{\text{ск}})}{\pi^4 e_H \sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2} \sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2} l_{\text{изс}}} \times \\ \times \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{изс}}}{2R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{изс}}}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}} \operatorname{arctg} \frac{l_H}{2e_H} \operatorname{arctg} \frac{l_H}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2}}$$

Акустическая эффективность насыпи с учётом формул (2.1) и (2.2), дБ(А):

$$\Delta L_H = 10 \lg \frac{\pi^3 \cdot e_H \cdot \sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2} \cdot \sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}}{2 \cdot \sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{\text{РТ}} - h_{\text{иш}})^2} \cdot \lambda^2 \cdot \beta_{\text{дифр}1} \cdot \beta_{\text{дифр}2} \cdot (1 - \alpha_H) \cdot (1 - \alpha_{\text{ск}})} \times \\ \times \frac{\operatorname{arctg} \frac{l_{\text{иш}}}{2\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{\text{РТ}} - h_{\text{иш}})^2}}}{\operatorname{arctg} \frac{l_H}{2R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_H}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}} \operatorname{arctg} \frac{l_H}{2e_H} \operatorname{arctg} \frac{l_H}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2}}} \quad (2.15)$$

После логарифмирования (2.28) и учётом  $10\lg 0,5\pi^3 = 12$  дБ получим:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{н}} = & 10\lg \frac{\sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2}}{\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{\text{пр}} - h_{\text{иш}})^2}} + 10\lg \frac{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}}{\lambda} + 10\lg \frac{e_{\text{н}}}{\lambda} - 10\lg(1 - \alpha_{\text{ск}}) - \\ & - 10\lg(1 - \alpha_{\text{н}}) - 10\lg\beta_{\text{дифр1}} - 10\lg\beta_{\text{дифр2}} + 10\lg \arctg \frac{l_{\text{иш}}}{2\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{\text{пр}} - h_{\text{иш}})^2}} - \\ & - 10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2(r_1 + r_2)} - 10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}} - 10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2e_{\text{н}}} - \\ & - 10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2}} + 12 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Разработанные формулы отражают зависимость акустической эффективности не только от высоты, но и других конструктивных параметров шумозащитной конструкции (материал элементов ИЗС, уклон ИЗС, верхняя площадка насыпи), определяющих её тип, позволяют учесть геометрические характеристики источника шума и защищаемого объекта, расположение ИЗС.

## **2.2. Методика проведения экспериментальных исследований акустической эффективности ИЗС**

Для установления экспериментальных зависимостей акустической эффективности ИЗС от высоты и проверки полученных формул разработана методика экспериментальной оценки акустической эффективности и проведены многократные измерения.

Методика исследований была составлена на основании и(или) с учетом нормативных документов: ГОСТ 33328-2015 [26], ГОСТ 51943-2002 [31], СП 51.13330.2011 [32], ГОСТ 23337-2014 [176] и ГОСТ 20444-2014 [177].

Измерения проводились в натуральных условиях при прохождении автотранспортного потока с установившейся скоростью. Измеряемые характеристики: эквивалентные уровни звукового давления (УЗД, дБ) эквивалентные уровни звука (УЗ, дБА). Измерения выполнялись в выбранных точках одновременно с тем, чтобы разница полученных УЗД и УЗ оставалась постоянной, при различных акустических характеристиках источника шума.

Измерения осуществлялись как на местности с ИЗС, так и на подобной местности при их отсутствии (ровный участок) в идентичных условиях.

Измерения показателя дифракции проводилось для ИЗС в выбранных точках синхронно.

### 2.2.1. Объекты исследования и схемы измерений

Точки измерений выбирались с тем, чтобы получить акустические характеристики источники шума и характеристики шума за экранирующим сооружением. При этом было принято решение выделить основные точки измерений и контрольные точки. Последние использовались для контроля и возможной корректировки результатов в основных измерительных точках. Для каждого объекта проводилось не менее трех измерений в каждой точке, а измерения были повторены не менее трех раз. Усреднение основного результата среднеарифметическое, т.к. разница полученных УЗ(Д) не превышала 5 дБ(А).

Измеряемые характеристики: эквивалентные уровни звукового давления (УЗД, дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 63 до 8000 Гц (данные, полученные на среднегеометрической частоте 31,5 Гц не были учтены из-за их противоречивости), а также эквивалентные уровни звука (УЗ, дБА).

Схемы расположения точек измерений для автотранспортного потока, в которых находятся измерительные приборы, показаны на рисунках 2.2 и 2.3 (выемка и насыпь соответственно).

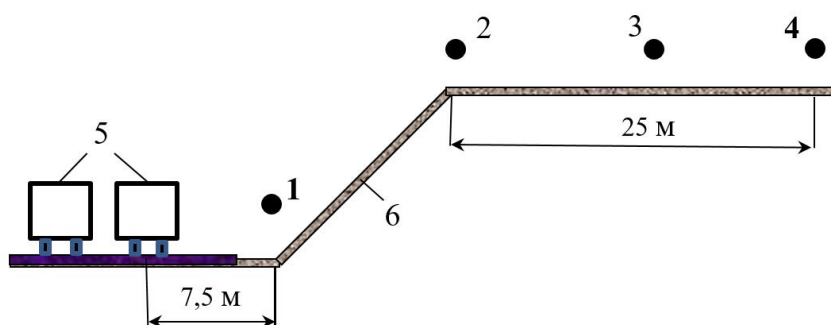


Рисунок 2.2 – Схема измерений выемки: 1, 4 – основные измерительные точки; 2, 3 – контрольные точки; 5 – автотранспортный поток; 6 – склон выемки

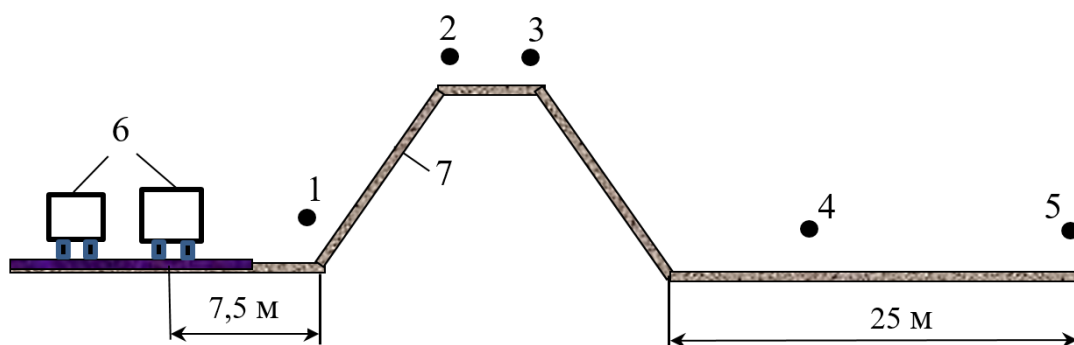


Рисунок 2.3 – Схема измерений насыпи: 1, 5 – основные точки измерений; 2, 3, 4 – контрольные точки; 6 – автотранспортный поток, 7 – склон насыпи

Во всех основных точках измерений фиксировался фоновый шум (во время остановки движения транспортного потока). Так как для всех точек измерений полученные значения фонового шума не менее, чем на 10 дБ (дБА) были ниже шума «полезного» сигнала, влияние фонового шума в результатах не учитывалось, а результаты его измерений не приводятся.

Для всех случаев основная измерительная точка 1 находилась на расстоянии 7,5 от оси ближнего движения, а обе измерительные точки: 4 (для выемки) и 5 (для насыпи) располагались на расстоянии 25 м от каждого из экранирующих сооружений. Высоты точек измерений – 1,5 м.

В случае измерений акустических характеристик железнодорожного транспорта точку 1 следует размещать на расстоянии 25 м от оси ближнего пути.

Схемы измерений без экранирующих сооружений показаны на рисунках 2.4 и 2.5 (для ровных поверхностей без выемки и насыпи соответственно).

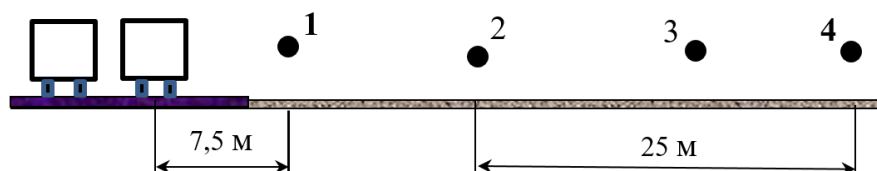


Рисунок 2.4 – Схема расположения основных измерительных точек (1, 4) и контрольных точек (2, 3) без выемки

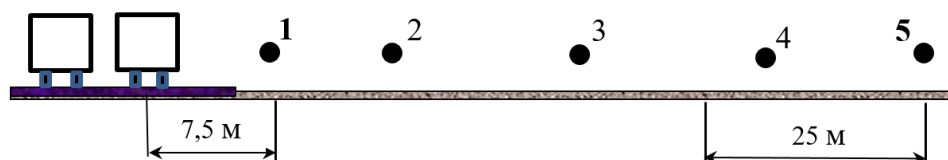


Рисунок 2.5 – Схема расположения основных измерительных точек (1, 5) и контрольных точек (2, 3, 4) без насыпи

Все измерительные приборы соединены в систему и управляются с общего пульта с тем, чтобы фиксация УЗД и УЗ проводилась одновременно.

### Измерения показателя дифракции (ПД).

В связи с отсутствием достоверных данных по коэффициенту (показателю) дифракции, а также соотношению  $\beta_{\text{дифр1}}$  и  $\beta_{\text{дифр2}}$  при двойной дифракции, создаваемой насыпью, была проведена серия дополнительных экспериментов по определению ПД. Методика исследований основывалась на [178].

Эксперимент проводился аналогично методике, описанной в разделе 2.2.1 в отношении насыпи высотой 7 м и выемки глубиной 6 м при прохождении автотранспортного потока (поэтому расстояние до точки 1 составляло 7,5 м от оси ближней полосы движения, для железной дороги берётся расстояние 25 м). Точки измерений выбирались с тем, чтобы выявить как ведёт себя звуковая волна, дифрагируя через каждую кромку ИЗС. Поэтому располагались они до и после кромки на высоте 0,1 м от её поверхности, как показано на рисунках 2.6 и 2.7.

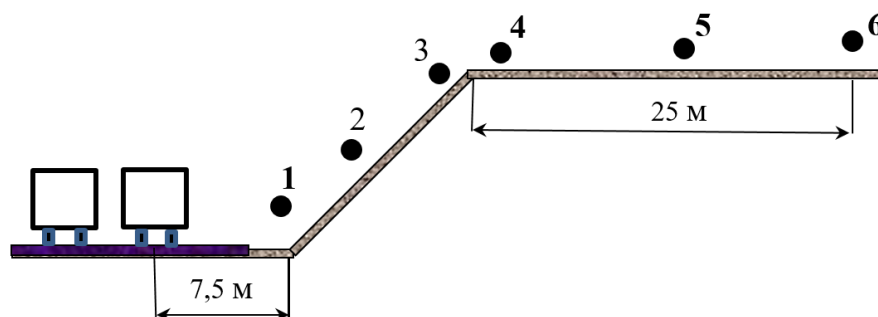


Рисунок 2.6 – Схема измерений выемки: 1, 6 – основные измерительные точки для определения эффективности ШВ; 3, 4 – основные измерительные точки для определения показателя дифракции; 2, 5 – контрольные точки



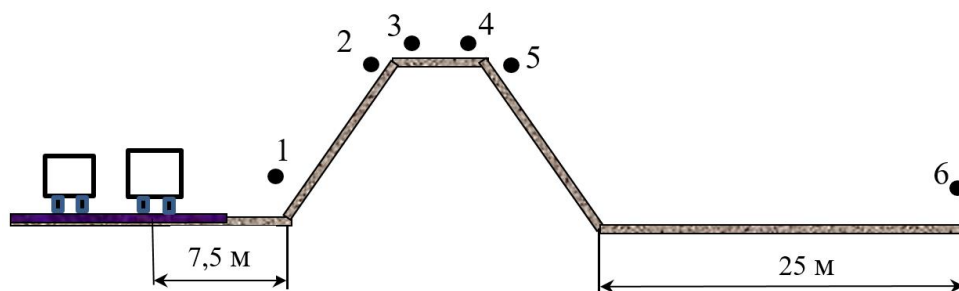


Рисунок 2.7 – Схема измерений насыпи: 1, 6 – основные точки измерения эффективности; 2-5 – основные точки измерения показателя дифракции

Измеряемые характеристики: эквивалентные уровни звукового давления (УЗД, дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 63 до 8000 Гц, а также эквивалентные уровни звука (УЗ, дБА).

Для расчёта акустической эффективности выемки и насыпи были проведены измерения в точках аналогичных 1 и 6 без ИЗС, как описано в разделе 2.2.1.

Для каждого объекта проводилось не менее трех измерений в каждой точке, а измерения были повторены не менее трех раз. Усреднение основного результата среднеарифметическое. Все измерительные приборы соединены в систему и управляются с общего пульта с тем, чтобы фиксация УЗД и УЗ проводилась одновременно. Влияние фонового шума в результатах не учитывалось.

### **2.2.2. Методика определения акустической эффективности ИЗС и показателя дифракции по экспериментальным данным**

Для определения акустической эффективности экранирующих сооружений был выбран непрямой метод измерений с использованием реального источника шума. При этом методе проводятся измерения эквивалентных УЗД и УЗ при установленном экранирующем сооружении, а также в тех же точках, но в другом подобном месте, где экранирующее сооружение отсутствует. Местность, выбираемая при отсутствии экранирующего сооружения, считается подобной, если она располагается сразу за (или до) исследуемого экранирующего сооружения, условия отражения (или поглощения) звука (бетон, асфальт, песок, растительность и пр.) должны быть подобными для испытываемого экранирующего сооружения,

выбираемая местность должна иметь также подобные исследуемой характеристики рельефа на расстоянии 30 м вокруг точек измерений. При испытаниях также соблюдаются требования по обеспечению идентичности метеорологических условий.

Акустическая эффективность искусственного земляного экранирующего сооружения определяется как:

Эффективность насыпи  $\Delta L^H$ , дБ(А):

$$\Delta L^H = \Delta \bar{L}_{\delta/H} - \Delta \bar{L}_{c/H}, \quad (2.17)$$

где  $\Delta \bar{L}_{\delta/H}$  – усредненная разность УЗД и УЗ между усредненными значениями в основных измерительных точках на ровном участке, объясняемая дивергенцией звука, дБ(А),

$$\Delta \bar{L}_{\delta/H} = \bar{L}_{\delta/H}^1 - \bar{L}_{\delta/H}^5, \quad (2.18)$$

$\bar{L}_{\delta/H}^1, \bar{L}_{\delta/H}^5$  – усредненные значения УЗД и УЗ в точках 1 и 5 на ровном участке соответственно;

$\Delta \bar{L}_{c/H}$  – усредненная разность УЗД и УЗ между усредненными значениями в основных измерительных точках при установленной насыпи, объясняемая эффектами дивергенции и экранирования, дБ(А):

$$\Delta \bar{L}_{c/H} = \bar{L}_{c/H}^1 - \bar{L}_{c/H}^5, \quad (2.19)$$

$\bar{L}_{c/H}^1, \bar{L}_{c/H}^5$  – усредненные значения УЗД и УЗ в точках 1 и 5 с установленной насыпью соответственно.

Эффективность выемки  $\Delta L^B$ , дБ(А):

$$\Delta L^B = \Delta \bar{L}_{\delta/B} - \Delta \bar{L}_{c/B}, \quad (2.20)$$

где  $\Delta \bar{L}_{\delta/B}$  – усредненная разность УЗД и УЗ между усредненными значениями в основных измерительных точках на ровном участке, объясняемая дивергенцией звука, дБ(А):

$$\Delta \bar{L}_{\text{б/в}} = \bar{L}_{\text{б/в}}^1 - \bar{L}_{\text{б/в}}^4, \quad (2.21)$$

$\bar{L}_{\text{б/в}}^1, \bar{L}_{\text{б/в}}^4$  – усредненные значения УЗД и УЗ в точках 1 и 4 на ровном участке соответственно;

$\Delta \bar{L}_{\text{с/в}}$  – усредненная разность УЗД и УЗ между усредненными значениями в основных измерительных точках с выемкой, объясняемая эффектами дивергенции и экранирования, дБ (дБА):

$$\Delta \bar{L}_{\text{с/в}} = \bar{L}_{\text{с/в}}^1 - \bar{L}_{\text{с/в}}^4, \quad (2.22)$$

$\bar{L}_{\text{с/в}}^1, \bar{L}_{\text{с/в}}^4$  – усредненные значения УЗД и УЗ в точках 1 и 4 с установленной выемкой соответственно.

$$\Delta \bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n}, \quad (2.23)$$

где  $L_i$  –  $i$ -е значение полученное измерениями, дБ(А),  
 $n$  – число измерений.

Показатель дифракции определялся как разница значений УЗ(Д) в точках до и после дифракционной кромки:

$$\text{ПД} = \Delta \bar{L}_{\text{до/к}} - \Delta \bar{L}_{\text{после/к}}, \quad (2.24)$$

где  $\Delta \bar{L}_{\text{до/к}}$  – усредненные значения УЗД и УЗ в измерительных точках, расположенных до кромки ИЗС (в точках 3 для выемки, точках 2 и 4 для насыпи согласно рис. 2.6 и 2.7), дБ(А),

$\Delta \bar{L}_{\text{после/к}}$  – то же после кромки (в точке 4 для выемки, 3 и 5 для насыпи), дБ(А).

### 2.2.3. Условия измерений, измерительная аппаратура, обработка результатов

В связи с тем, что измерения (испытания) проводятся на открытом воздухе, особые требования предъявляются к метеоусловиям. Не допускаются измерения при атмосферных осадках, скорости ветра свыше 5 м/с (при меньших значениях

используются звукопроницаемый ветрозащитный колпак, который устанавливается на микрофон), температуре воздуха ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ .

При проведении испытаний средства измерений не должны подвергаться воздействию вибраций и электромагнитных полей, превышающих пределы, установленные техническими документами.

Число измерений в каждой измерительной точке принималось не менее трех при каждой высоте ИЗС. Число испытательных циклов для каждого измеряемого объекта (выемка, насыпь, ровный участок) принималось не менее трех.

При обработке результатов измерений принималось следующее правило. При разбросе УЗД в каждой октавной полосе свыше 5 дБ, а уровнем звука свыше 3 дБА такие данные (но не свыше 1-2) не учитывались. Таким образом, был обеспечен интервал  $\pm 2,5$  дБ и  $\pm 1,5$  дБА с доверительной вероятностью 0,95 согласно ГОСТ 51943 [31].

Для измерений были использованы следующие шумомеры, соответствующие классу точности по ГОСТ 17187 [179], снабженные октавными полосовыми фильтрами, соответствующими ГОСТ 17168 [180]:

– шумомер–виброметр, анализатор спектра ОКТАВА–110А–ЭКО, заводской номер АУ110096, предусилитель Р200 №060018, микрофон ВМК-205 №4600;

– шумомер–виброметр, анализатор спектра ОКТАВА–110А–ЭКО, заводской номер АУ120118, предусилитель Р200 №112671, микрофон ВМК-205 №5633;

– шумомер–виброметр, анализатор спектра ОКТАВА–110А–ЭКО, заводской номер АУ120124, предусилитель Р200 №060016, микрофон ВМК-205 №448;

– шумомер–виброметр, анализатор спектра ОКТАВА–110А (Белая), заводской номер БФ160273, предусилитель Р200 №154661, микрофон МК-233 №2565;

— шумомер-виброметр, анализатор спектра ЭКОФИЗИКА-110А, заводской номер БФ150131 в комплекте с предусилителем Р200 № 112672 и микрофонным капсулем МК-265 № 3720;

— шумомер-вибромметр, анализатор спектра ЭКОФИЗИКА-110А, заводской номер ЭФ151066 в комплекте с предусилителем Р200 № 133570 и микрофонным капсулем ВМК-205 № 4136;

– 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.

### **2.3. Экспериментальная акустическая эффективность насыпей и выемок**

Были измерены УЗД и УЗ в выбранных точках для выемки глубиной 4, 6 и 8 м и насыпи высотой 3, 5,5 и 7 м, а также получены данные об УЗД и УЗ в аналогичных точках на подобных ровных участках без ИЗС при идентичных метеорологических условиях. Акустическая эффективность экранирующих сооружений определена описанным в разделе 2.2.2 непрямым методом.

Результаты усреднения измеренных характеристик шума для оценки эффективности четырёх- и восьмиметровых выемок согласно приведённым на рис. 2.2 и 2.4 схемам представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Усредненные УЗ(Д) в основных измерительных точках для выемки

Место измерений	Точка измерения	Усредненные УЗД, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Усредненные УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Выемка, 8 м	1	82	80	76	79	82	78	69	59	85
	4	75	68	61	60	60	54	43	32	65
Ровный участок	1	83	80	78	79	81	76	68	58	84
	4	77	71	67	66	69	63	55	47	74
Выемка, 4 м	1	80	77	73	76	80	75	65	58	82
	4	73	69	62	62	64	57	45	36	66
Ровный участок	1	82	79	78	79	81	76	66	60	84
	4	75	72	69	68	70	65	54	48	74

Усреднённые измерения УЗ(Д) в основных измерительных точках, представленных на рис. 2.3 и 2.5, для насыпей высотой 3 и 5,5 м – в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Усредненные УЗ(Д) в основных измерительных точках для насыпи

Место измерений	Точка измерения	Усредненные УЗД, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Усредненные УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Насыпь 5,5 м	1	80	78	75	77	83	78	67	60	85
	5	69	63	55	53	55	49	36	26	56
Ровный участок	1	79	78	77	76	84	78	68	59	86
	5	71	68	64	63	70	65	56	49	71
Насыпь 3 м	1	79	78	76	79	83	79	68	59	86
	5	71	64	57	58	59	53	41	30	50
Ровный участок	1	80	79	77	78	80	76	67	58	84
	5	74	68	63	63	66	63	55	46	67

Вычисленные значения разности УЗД и УЗ экранирующих сооружений и ровных участков, а также вычисленные значения акустической эффективности в дБ и дБА для выемки глубиной 8 и 4 м и насыпи высотой 3 и 5,5 м – в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Разность УЗ(Д) экранирующих сооружений и ровных участков, акустическая эффективность ИЗС, дБ и дБА

ИЗС	Показатель	Высота, м	Разность УЗД, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Разность УЗ, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Выемка	$\Delta L_{б/в}$	8	6	9	11	13	12	13	13	11	10
	$\Delta L_{с/в}$		7	12	15	19	22	24	27	28	21
	$\Delta L_{в}$		1	3	4	6	10	11	14	17	11
	$\Delta L_{б/в}$	4	7	7	9	11	11	11	11	11	10
	$\Delta L_{с/в}$		7	8	11	14	16	18	20	22	16
	$\Delta L_{в}$		0	1	2	3	5	7	9	11	6
Насыпь	$\Delta L_{б/н}$	5,5	8	10	13	13	14	13	12	13	15
	$\Delta L_{с/н}$		11	16	21	25	30	31	34	39	31
	$\Delta L_{н}$		3	6	8	12	16	18	22	26	16
	$\Delta L_{б/н}$	3	6	11	14	15	14	13	12	12	16
	$\Delta L_{с/н}$		8	14	19	21	24	27	29	32	27
	$\Delta L_{н}$		2	3	5	6	10	14	17	20	11

Результаты измерений УЗ(Д), определения эффективности шестиметровой выемки и показателя дифракции согласно схеме рис. 2.6 приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Усредненные результаты измерений для выемки глубиной 6 м

Точка измерения, показатель	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	78	75	74	76	81	77	67	57	81
1 (без выемки)	79	75	73	77	81	77	67	56	82
3	76,5	74	70	70	75	71	62	54	78
4	73,5	70	65	63,5	67,5	63	53	45	71
6	69	64	59	58	60	57	44	30	63
6 (без выемки)	71	67	62	64	69	67	56	44	73
$\Delta L_v$ (эксперим)	1	3	4	5	9	10	12	15	9
ПД ( $\Delta L_{3-4}$ )	3	4	5	6,5	7,5	8	9	9	7

Экспериментально полученные характеристики шума, акустическая эффективность и ПД (схема рис. 2.7) для насыпи высотой 7 м – в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Усредненные результаты измерений для насыпи высотой 7 м

Точка измерения, показатель	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	80	77	74	74	79	74	64	59	81
2	79	74	71	70	73	69	57	51	75
3	76	70	66	64	66	61	47	41	67
4	75	68	64	61	63	59	45	38	66
5	73	64	59	55	56	51	36	29	60
6	69	61	54	52	52	45	30	23	53
6 (без насыпи)	73	68	64	67	70	65	53	50	71
$\Delta L_n$ (эксперим)	4	7	10	15	18	20	23	27	18
ПД ( $\Delta L_{2-3}$ )	3	4	5	6	7	8	10	10	8
ПД ( $\Delta L_{4-5}$ )	2	4	5	6	7	8	9	9	6
$\Delta L_{2-3} + \Delta L_{4-5}$	5	8	10	12	14	16	19	19	14

Измерения показателя дифракции (ПД) показали его увеличение с увеличением частоты порядка 1,5 дБ на октаву от 3 дБ (63 Гц) до 10 дБ (8000 Гц). Интегральное значение ПД составило 7-8 дБА.

На рис. 2.8 приведена экспериментально полученная эффективность ИЗС.

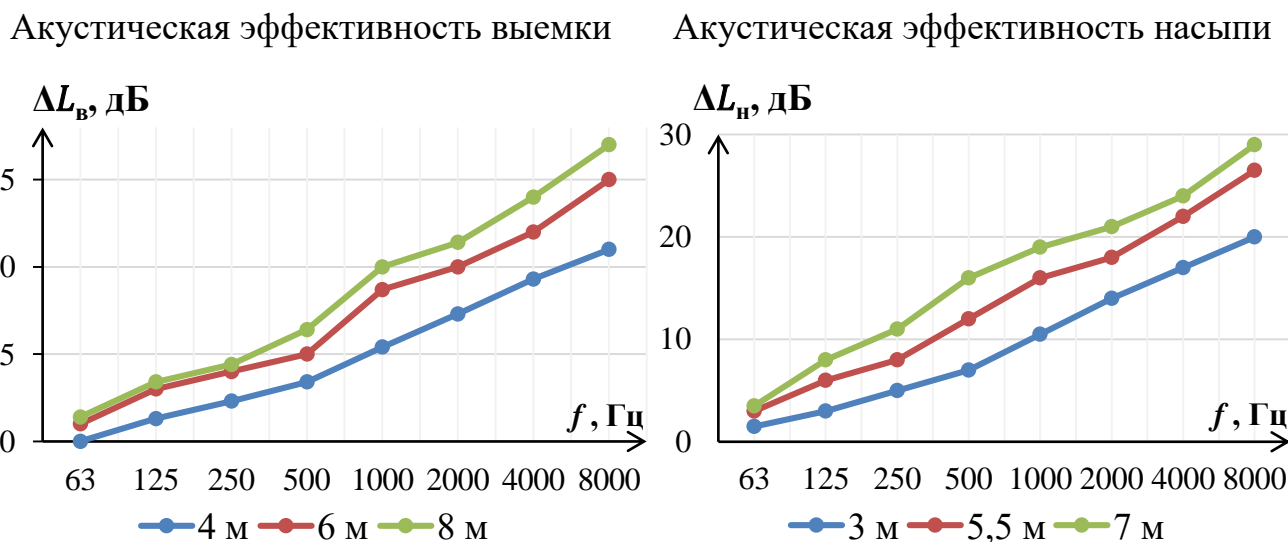


Рисунок 2.8 – Экспериментальная акустическая эффективность ИЗС

Коротко остановимся на анализе характера полученных зависимостей. Отметим постоянное увеличение акустической эффективности выемки и насыпи с ростом частоты в пределах 1-3 дБ на октаву для выемки, на 2-5 дБ для насыпи. Эффективность насыпи заметно выше выемки при приблизительно одинаковых значениях высоты и глубины: на 2-3 дБ в низкочастотном диапазоне, 5-7 дБ в среднечастотном диапазоне, до 9-12 в высокочастотном диапазоне. Установлено, что с увеличением высоты ИЗС её эффективность увеличивается меньше, в частности, увеличение высоты выемки на 2 метра с 4 до 6 м – 3 дБА, с 6 до 8 м – 2 дБА.

#### 2.4. Оценка точности метода определения акустической эффективности ИЗС с использованием ПЗП

В таблице 2.7 приводятся расчёты эффективности выемки, формула (2.11), в том числе промежуточные для выемки глубиной 6 м, и эффективности, полученные



экспериментально.

Таблица 2.7 – Расчет акустической эффективности выемки и сравнение с данными эксперимента

Исходные данные для расчета	Эффективность								
	дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц								дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Выемка 4 м									
$\Delta L_B$ (расчет)	0	0,9	2,5	4,7	6,7	8,5	10,4	12,5	7,3
$\Delta L_B$ (эксперимент)	0	1,3	2,3	3,4	5,4	7,3	9,3	11,0	6,2
Выемка 6 м (промежуточные расчёты)									
$10lg \frac{R_2}{\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{prt} - h_{иш})^2}}$	-3,4	-3,4	-3,4	-3,4	-3,4	-3,4	-3,4	-3,4	-3,4
$10lg \frac{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}}{\lambda}$	4,0	6,9	9,9	13,0	16,0	19,0	22,0	25,0	16,0
$\alpha_{СК}$	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$-10lg(1 - \alpha_{СК})$	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$-10lg\beta_{дифр}$	-3	-4	-5	-6,5	-7,5	-8	-9	-9	-7
$10lg \arctg \frac{l_{иш}}{2\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{prt} - h_{иш})^2}}$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$-10lg \arctg \frac{l_B}{2R_2}$	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0
$-10lg \arctg \frac{l_B}{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}}$	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0
$-10lg \arctg \frac{l_B}{2(r_1 + r_2)}$	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0
$\Delta L_B$ (расчет)	0,5	2,4	4,6	6,4	8,5	11,0	13,0	16,0	9,0
$\Delta L_B$ (эксперимент)	1,0	3,0	4,0	5,0	8,7	10,0	12,0	15,0	9,0
Выемка 8 м									
$\Delta L_B$ (расчет)	1,5	3,7	6,0	7,8	10,0	12,5	14,7	17,6	11,0
$\Delta L_B$ (эксперимент)	1,4	3,4	4,4	6,4	10,0	11,4	14,0	17,0	11,0

Оценка точности результатов расчёта эффективности насыпи, полученных с использованием предлагаемого метода, формула (2.16), с данными, полученными в ходе эксперимента, представлена в таблице 2.8 ( $\alpha_{СК} = \alpha_H$ ).

Таблица 2.8 – Расчет акустической эффективности насыпи и сравнение с данными эксперимента

Исходные данные для расчета	Эффективность								
	дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц								дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Насыпь 3 м									
$\Delta L_H$ (расчет)	0	1,8	4,5	7,4	11,4	14,4	18,4	22,4	11,4
$\Delta L_H$ (эксперимент)	1,5	3,0	5,0	7,0	10,5	14,0	17,0	20,0	11,0
Насыпь 5,5 м									
$\Delta L_H$ (расчет)	0,7	4,6	8,4	12,2	16,2	19,7	23,3	28,3	16,8
$\Delta L_H$ (эксперимент)	3,0	6,0	8,0	12,0	16,0	18,0	22,0	26,5	16,5
Насыпь 7 м (промежуточные расчёты)									
$10lg \frac{\sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2}}{\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{prt} - h_{иш})^2}}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$10lg \frac{\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}}{\lambda}$	5	8	11	14	17	20	23	26	17
$10lg \frac{e_H}{\lambda}$	-3	0	3	6	9	12	15	18	9
$-10lg(1 - \alpha_{ск}) - 10lg(1 - \alpha_H)$	1	1	2	3	3	3	3	3	3
$-10lg\beta_{дифр1} - 10lg\beta_{дифр2}$	-5	-8	-10	-12	-14	-16	-19	-19	-14
$10lg \arctg \frac{l_{иш}}{2\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{prt} - h_{иш})^2}}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$-10lg \arctg \frac{l_H}{2(r_1 + r_2)}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$-10lg \arctg \frac{l_H}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2}}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$-10lg \arctg \frac{l_H}{2e_H}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$-10lg \arctg \frac{l_H}{2\sqrt{H^2 + (y \cdot H + R_2)^2}}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$\Delta L_H$ (расчет)	2,6	5,6	10,4	15,2	19,2	23,2	26,2	32,3	19,2
$\Delta L_H$ (эксперимент)	3,5	8,0	11,0	16,0	19,0	21,0	24,0	29,0	19,0

На рисунке 2.9 приведено сравнение расчетной величины эффективности ИЗС, полученное при помощи предлагаемого метода, с результатами измерений.

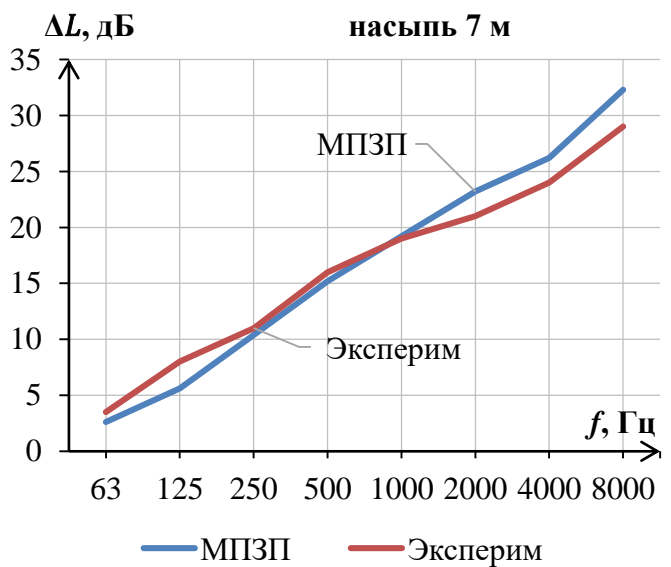
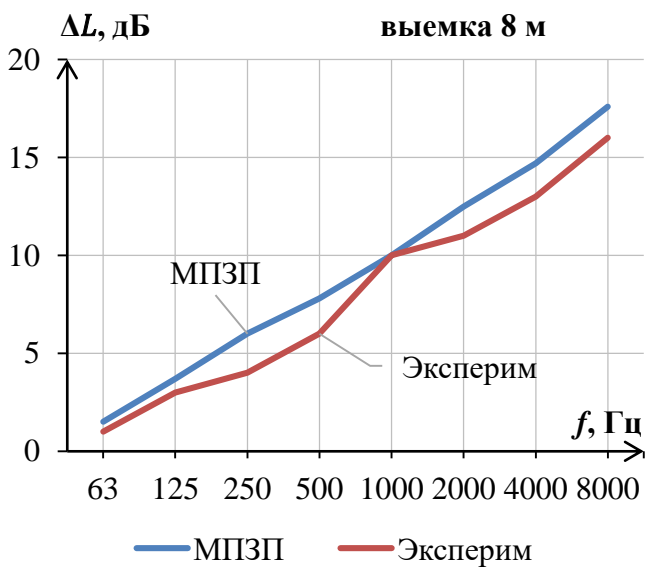
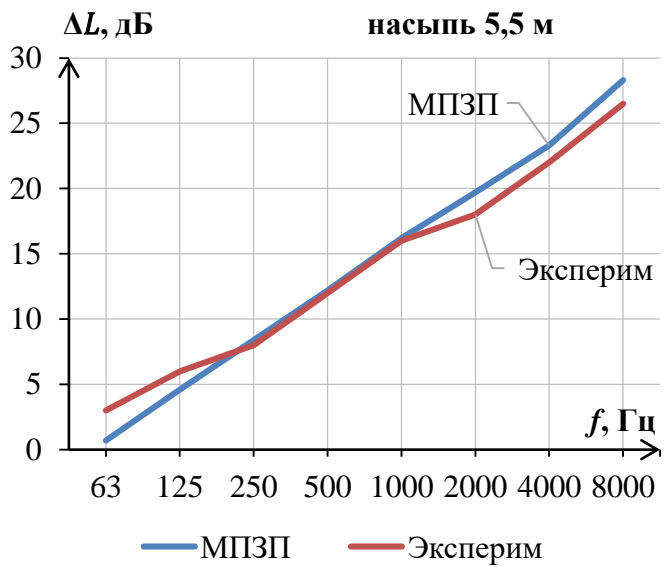
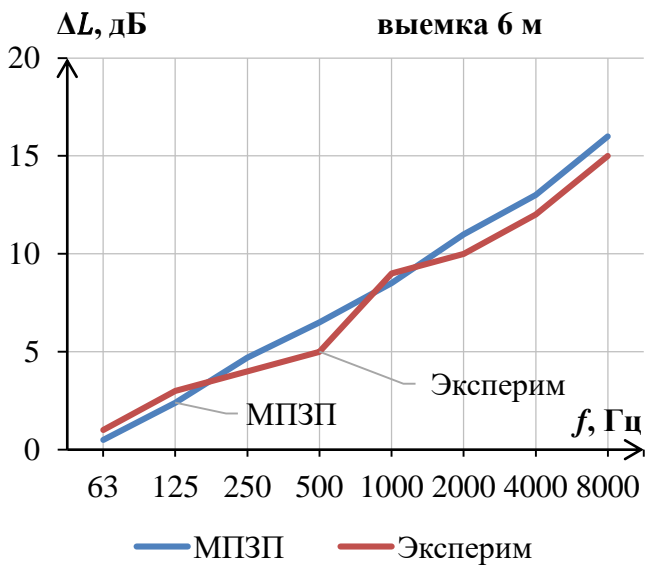
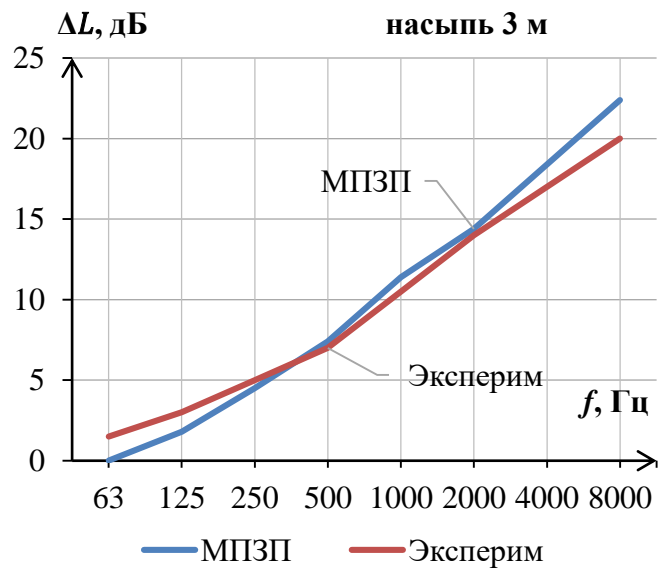
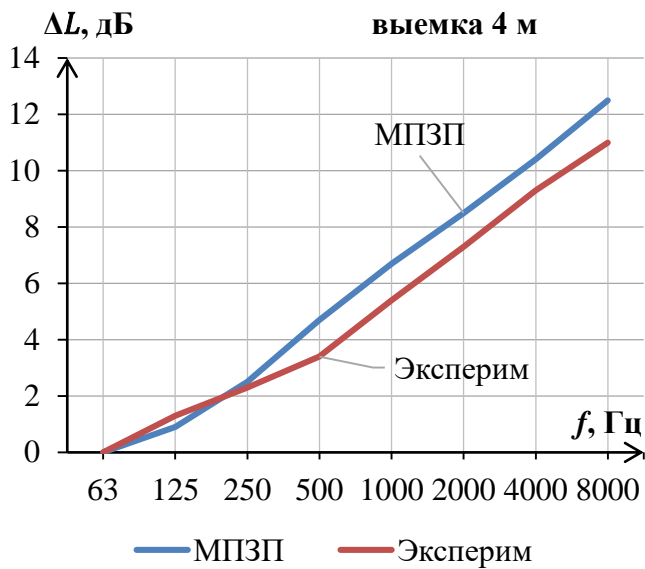


Рисунок 2.9 – Сравнение данных расчета и исследований эффективности ИЗС

Эффективность ИЗС, полученная при помощи предлагаемого расчетного метода, показывают хорошую 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 дБА.

Зависимость эффективности ИЗС (в отношении которых проводились измерения и приведённых на рис. 1.8 для выемки) от высоты представлена на рисунке 2.10.

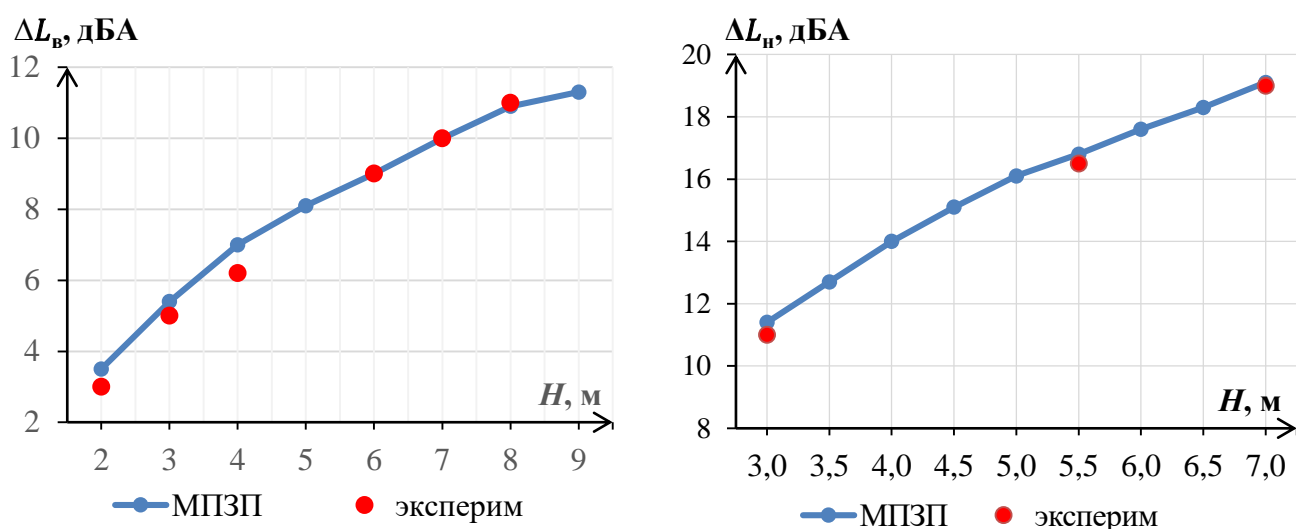


Рисунок 2.10 – Эффективность ИЗС в зависимости от высоты, дБА

Для широкого применения предлагаемого метода необходимы дополнительные эксперименты (с разработкой нормативной методики) для получения аналитической зависимости коэффициента или показателя дифракции от конструктивных параметров ИЗС.

## 2.5. Уточнение методик расчёта акустической эффективности шумозащитных конструкций по оптико-дифракционной теории

Расчёты акустической эффективности ИЗС по методикам оптико-дифракционной (геометрической) теории основаны на представлении о разнице

хода звукового луча при наличии экранирующего сооружения, модель шумозащиты ИЗС построена по подобию распространения звука в присутствии экрана, размещаемого под кромки сооружения.

### 2.5.1. Расчет акустической эффективности экранов

Акустическая эффективность акустических экранов изучена исчерпывающе. Н.В. Тюрина, А.Е. Шашурин, Н.Г. Семенов и др. получили многократно проверенные зависимости акустической эффективности ШЭ от высоты и их звукопоглощающих свойств, в НТД есть отражение этих результатов.

Влияние высоты ШЭ на его эффективность представлено на рис. 2.11. Если сравнить эффективности ШЭ, рассчитанные по формулам действующих НТД, формулы (1.4) – (1.6), то более близкую по значениям зависимость эффективности ШЭ от его высоты дают ОДМ [37] и ГОСТ [24], а более пропорциональную ГОСТ [24] и СП [33].

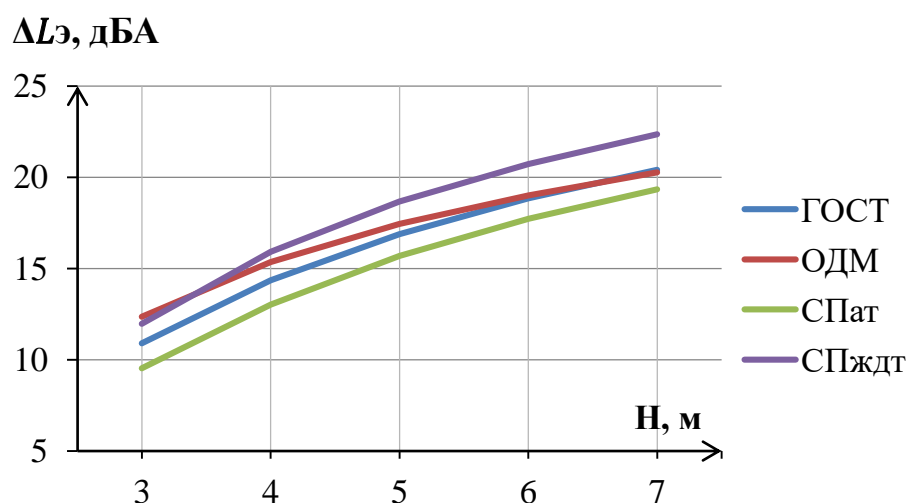


Рисунок 2.11 – Сравнение эффективностей ШЭ, рассчитанных по разным методикам, от высоты

Таким образом, каждая методика может быть использована. Эффективность экрана с учётом конструктивных параметров, в дБА, может быть представлена как [24]:

$$\Delta L^э = 10 \cdot \lg(3 + 58,8 \cdot \delta \cdot K_{мет}) - K_M + K_\phi - K_{дл} \quad (2.25)$$

где  $\Delta L^э$  – эффективность ШЭ, дБА;

$\delta$  – параметр, учитывающий расположение дифракционной кромки ШЭ для определения разности хода звукового луча в его присутствии;

$K_{мет}$  – коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий;

$K_M, K_\phi, K_{дл}$  – коэффициенты-поправки на материал, форму и длину.

Для данной работы  $K_{мет}=1, K_{дл}=0$  дБА.  $K_M=0$  дБА для шумопоглощающих экранов,  $K_M=3$  дБА для экранов из отражающих материалов. Влияние материала на эффективность ШЭ целесообразнее учитывать через коэффициент звукопоглощения  $\alpha_z$ . По данным табл. 1.2  $K_\phi$  лежит в пределах 1,5-2 дБА. Его значение несколько меняется в зависимости от высоты ШЭ и удаления от ИШ. Поэтому влияние надстройки экрана на его эффективность точнее учитывать через расположение дифракционной кромки (параметр  $\delta$ ).

Минимальное значение эффективности – 4,8 дБА, максимальное (по НТД)  $\Delta L_{max}^z = 20 + K_\phi$  дБА. Высоты ШЭ, эффективность которых выходит за рамки указанного диапазона, должны исключаться из рассмотрения.

Функции акустической эффективности экранов различных по материалу и форме представлена на рисунке 2.12: ШЭпп (прямой поглощающий), ШЭпо (прямой отражающий), ШЭфп (г-образный поглощающий), ШЭфо (г-образный отражающий)

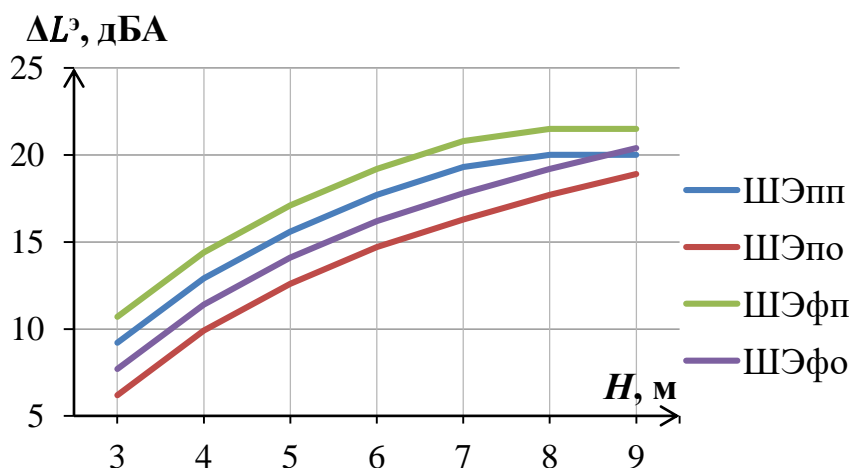


Рисунок 2.12 – Зависимость эффективности ШЭ от высоты для разных по материалу и форме типов экранов [24]

Применяемые коэффициенты-поправки приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Поправки при расчёте эффективности разных видов ШЭ

Тип ШЭ	ШЭпп	ШЭпо	ШЭфп	ШЭфо
$K_M$ , дБА	0	-3	0	-3
$K_\phi$ , дБА	0	0	1,5	1,5
$\Delta L_{max}^3$ , дБА	20	20	21,5	21,5

### 2.5.2. Расчет акустической эффективности ИЗС

Выбор формулы расчёта эффективности насыпи ( $\Delta L^H$ ) по ГОСТу [24] обоснован в главе 1.  $K_{скл}$  не применим. Для расчёта в дБ:

$$\Delta L^H = 10 \cdot \lg\left(3 + 20/\lambda \cdot K_{диф} \cdot (\delta + e) \cdot K_{мет}\right) - K_M - K_{дл}, \quad (2.26)$$

где  $K_{диф}$  – константа, учитывающая дифракцию на верхних кромках ШЗК, при «двойной дифракции»:

$$K_{диф} = \frac{1 + (5\lambda/e)^2}{1/3 + (5\lambda/e)^2}, \quad (2.27)$$

$e$  – ширина верхней площадки ШН, м ( $e < 10$  м);

$\delta$  – параметр, учитывающий расположение дифракционной кромки ШЗК;

$K_{мет}$ ,  $K_M$ ,  $K_{дл}$  – поправки на метеоусловия, материал и длину ШЗК.

Эффективность выемки ( $\Delta L^B$ ) по ГОСТу [24], дБ:

$$\Delta L^B = 10 \cdot \lg\left(3 + 20/\lambda \cdot \delta \cdot K_{мет}\right) + K_{скл} - K_M - K_{дл}. \quad (2.28)$$

Для расчёта эффективности в дБА в формулах (2.26) и (2.28) длина волны  $\lambda$  принимается 0,34 м.

Формула Курце для эффективности ИЗС ( $\Delta L^{изс}$ ) в дБ:

$$\Delta L^{изс} = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{2N\pi}}{\text{th}\sqrt{2N\pi}} + 5, \quad (2.29)$$

где  $N$  – число Френеля,  $N = 2\delta/\lambda$ .

Формула СП [33] для расчёта эффективности ИЗС в дБ:

$$\Delta L^{\text{изс}} = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{2\pi|2\delta/\lambda|}}{\text{th}\sqrt{2\pi|2\delta/\lambda|}} + 5 + K_M - K_{\text{скл}} - K_{\text{дл}}, \quad (2.30)$$

для расчёта эффективности в дБА для автотранспортного шума принимается  $\lambda = 0,84$  м, железнодорожного –  $\lambda=0,42$  м.

По ОДМ [37] эффективность ИЗС только в дБА:

$$\Delta L^{\text{изс}} = 18,2 + 7,8 \cdot \lg(\delta + 0,02) + K_M - K_{\text{скл}} - K_{\text{дл}}. \quad (2.31)$$

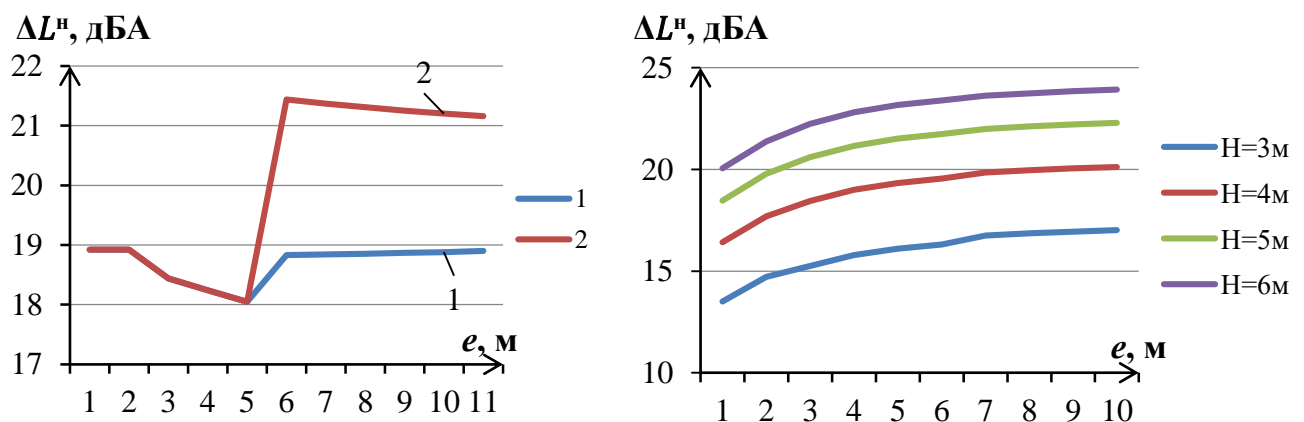
Формула Маекавы для расчёта эффективности выемки в дБА:

$$\Delta L^B = 9,4 \cdot \lg(2 + 50 \cdot \delta). \quad (2.32)$$

$K_{\text{скл}}$  – коррекция на склон, в зависимости от уклона выемки равна 3 при  $y=0,5$ ; 5 при  $y=1$ ; 5,8 при  $y=1,5$ ; 6 при  $y=2$ .

Разница в подходах, представленных в НТД, заключается в применении поправок на материал и склон. Формулы Курце и Маекавы избегают этих положений. Также отмечено различное расположение мнимого экрана в расчётной схеме насыпи, что определяет распространение звукового луча при наличии ИЗС.

Введём ряд уточнений в части траектории распространения звука в присутствии насыпи. С увеличением уклона эффективность ИЗС снижается. С увеличением ширины верхней площадки эффективность насыпи должна увеличиваться. Чтобы указанные зависимости были верны, располагать мнимый экран-стенку следует под ближнюю к ИШ вершину насыпи. Наглядно это доказывает представление результатов расчёта по действующим НТД (рис. 2.13).



а. варианты расчёта по [33,37], H=6 м

б. расчёт по ГОСТ [24]

Рисунок 2.13 – Зависимость эффективности насыпи от ширины верхней площадки при рекомендуемом в НТД расположении мнимого экрана



При расположении РТ ниже высоты насыпи следует учитывать проход звукового луча по верхней площадке ИЗС и двойную дифракцию. Эти положения отражены в верхних строках таблицы 2.10, где приводятся схемы и формулы расчёта параметра  $\delta$  для конструкций, входящих в состав шумозащитных комплексов (оптимизируемых в последующих главах).

Таблица 2.10 – Схемы и формулы расчёта параметра  $\delta$

Схема расчёта	Формула расчёта
	$\delta^H = \sqrt{(r_1 + r_2 + y \cdot H)^2 + (H - h_{\text{иш}})^2} +$ $+ \sqrt{(R_3 - r_2 - y \cdot H - e)^2 + (H - h_{\text{рт}})^2} -$ $- \sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{\text{рт}} - h_{\text{иш}})^2} + e$
	$\delta^H = \sqrt{(r_1 + r_2 + y \cdot H)^2 + (H - h_{\text{иш}})^2} +$ $+ \sqrt{(R_3 - r_2 - y \cdot H)^2 + (h_{\text{рт}} - H)^2} -$ $- \sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{\text{рт}} - h_{\text{иш}})^2}$
	$\delta^{H^н} =$ $\sqrt{(r_1 + r_2 + y \cdot H^н + r_3)^2 + (H^н + H^э - h_{\text{иш}})^2} +$ $\sqrt{(R_3 - r_2 - y \cdot H^н - r_3)^2 + (h_{\text{рт}} - (H^н + H^э))^2} -$ $\sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (h_{\text{рт}} - h_{\text{иш}})^2}$ <p><math>r_3</math> – расстояние до второй ШЗК, определяется технологией возведения и условиями эксплуатации;</p>
	$\delta^B = \sqrt{(r_1 + r_2 + y \cdot H)^2 + (H - h_{\text{иш}})^2} +$ $+ \sqrt{(R_3 - r_2 - y \cdot H)^2 + h_{\text{рт}}^2} -$ $- \sqrt{(r_1 + R_3)^2 + (H + h_{\text{рт}} - h_{\text{иш}})^2}$

Продолжение таблицы 2.10

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

Сравним расчёты и данные измерения эффективности ИЗС.

В таблице 2.11 приведены расчеты акустической эффективности выемки методами оптико-дифракционной теории и сравнение их с экспериментальной эффективностью.

Таблица 2.11 – Данные расчетов эффективности выемки (ШВ), дБ(А)

Высота ШВ, м	Метод расчета	Эффективность, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Эффективность, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
4	ГОСТ	11,0	11,2	11,6	12,3	13,5	15,1	17,3	19,8	13,5
	ф. Курце	5,3	5,6	6,1	7,0	8,5	10,6	13,3	16,2	-
	СП	2,3	2,6	3,1	4,0	5,5	7,6	10,3	13,2	3,7
	ОДМ									5,9
	ф.Маекавы									5,9
	Эксперим	0	1,3	2,3	3,4	5,4	7,3	9,3	11,0	6,2
8	ГОСТ	11,7	12,5	13,7	15,5	17,7	20,2	23,0	25,8	17,7
	ф. Курце	6,2	7,2	8,8	11,0	13,7	16,7	19,7	22,7	-
	СП	3,2	4,2	5,8	8,0	10,7	13,7	16,7	19,7	7,3
	ОДМ									10,0
	ф.Маекавы									10,1
	Эксперим	3,2	4,2	5,7	7,7	10,2	12,7	15,5	18,3	10,2

Экспериментальная эффективность выемки ниже рассчитанной по ГОСТ 31295.2 на 8-10 дБ, по формуле Курце в среднем на 5 дБ по всему спектру. Данный факт свидетельствует о том, что применение коэффициента  $K_{\text{скл}}$  со знаком «+» даёт существенно завышенный результат.

Близость результатов измерений и расчётов по СП (в пределах 2,5 дБ) и ОДМ объясняется использованием  $K_{\text{скл}}$  со знаком «-», однако, по логике метода: эффективность экрана с аналогичным расположением кромки будет выше на 6 дБ, что вызывает сомнения. Помимо этого, для расчёта эффективности в дБА более приемлема частота 1000 Гц.

По мнению автора, в формулах (2.28), (2.30), (2.31) следует пренебречь  $K_{\text{скл}}$ . Это подтверждается и неспособностью достигнуть выемкой снижения шума порядка 30 дБА, рассчитывая её эффективность как для экрана с дополнительной поправкой на крутизну склона до 6 дБА, выявленной исследованиями [39, 40].

В таблице 2.12 приведены данные расчетов акустической эффективности насыпи оптико-дифракционным методом и сравнение их с экспериментом.

Таблица 2.12 – Данные расчетов эффективности насыпи (ШН), дБ(А)

Высота ШН, м	Метод расчета	Эффективность, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Эффективность, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
3	ГОСТ	5,5	6,2	7,4	9,6	13,2	16,9	20,2	23,3	13,2
	СП/ф. Курце	8,9	9,7	11,1	13,0	15,6	18,5	21,4	24,5	12,4
	ОДМ									15,2
	Эксперимент	3,2	4,1	5,6	7,5	10,0	12,5	15,2	18,1	10,0
5,5	ГОСТ	7,9	9,7	12,3	15,8	20,1	24,2	27,6	30,7	20,1
	СП/ф. Курце	12,0	14,2	17,0	19,9	22,9	25,9	29,0	32,0	19,0
	ОДМ									20,7
	Эксперимент	6,5	8,8	11,5	14,4	17,6	20,5	23,5	26,5	17,6

При расчёте эффективности насыпи также получено превышение экспериментальных данных: от 2 дБ на низких частотах до 5 дБ на высоких, около 3 дБА по сравнению с ГОСТ; порядка 6 дБ и 2,5 дБА по сравнению с СП. Оно менее значительное, т.к. не используется  $K_{\text{скл}}$ .

### 2.5.3. Преобразованная методика расчета акустической эффективности ИЗС

Проанализировав полученные выше результаты, для расчёта акустической эффективности искусственных земляных сооружений (насыпи и выемки) по методике оптико-дифракционной теории предлагается:

- разницу пути звукового луча в присутствии ИЗС учитывать через параметр  $\delta$ , формулы и схемы расчёта которого представлены в табл. 2.10;
- исключить из расчёта поправку на склон  $K_{\text{скл}}$ ;
- звукопоглощающие свойства покрытий ИЗС учитывать (полагая, что формулы расчёта эффективности применимы в отношении поглощающей ШЗК) как:

$$K_M = 3 - 10 \cdot \lg(1 - \alpha_{\text{покр}}), \quad (2.33)$$

где  $K_M$  – коэффициент- поправка на материал, дБА,

$\alpha_{\text{покр}}$  – частотнозависимый коэффициент звукопоглощения покрытий экранирующего сооружения.

- для расчётов в дБА принять эффективность ШЗК на частоте 1000 Гц (что подтверждено экспериментально).

Таким образом, преобразованная формула эффективности искусственных земляных сооружений по методике оптико-дифракционной теории примет вид:

$$\Delta L^{\text{изс}} = 10 \lg(3 + 20\delta/\lambda) - K_M, \text{ дБ}$$

$$\text{или } \Delta L^{\text{изс}} = 10 \lg(3 + 58,8 \cdot \delta) - K_M, \text{ дБА.} \quad (2.34)$$

Эффективность экрана и комбинированных конструкций:

$$\Delta L^{\text{э}} = 10 \cdot \lg(3 + 58,8 \cdot \delta) - K_M + K_{\text{ф}}, \text{ дБА.} \quad (2.35)$$

Для грунтовых ИЗС, покрытых травой,  $K_M^{\text{изс}}=1,5$  дБА ( $\alpha_{\text{покр}} = 0,1 - 0,3$ ), для поглощающих экранов  $K_M^{\text{э}}= 0$  дБА, отражающих  $K_M^{\text{э}}= 3$  дБА.

Сравнение расчётов эффективности искусственных земляных сооружений по модернизированной автором формуле (2.34) с экспериментальной эффективностью приведены в таблице 2.13 и на рисунке 2.14.

Таблица 2.13 – Расчет эффективности ИЗС: выемки ( $\Delta L_B$ ) и насыпи ( $L_H$ )

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

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 низко- и высокочастотном диапазоне до 2,5 дБ, в среднечастотном диапазоне (250-2000 Гц) до 1,5 дБ. Сравнение интегральных значений эффективностей показывает приемлемую сходимость в пределах 1,5 дБА.

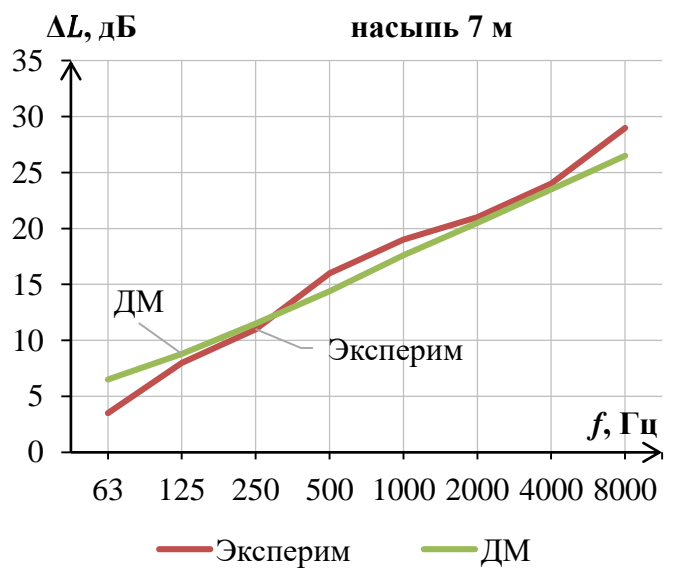
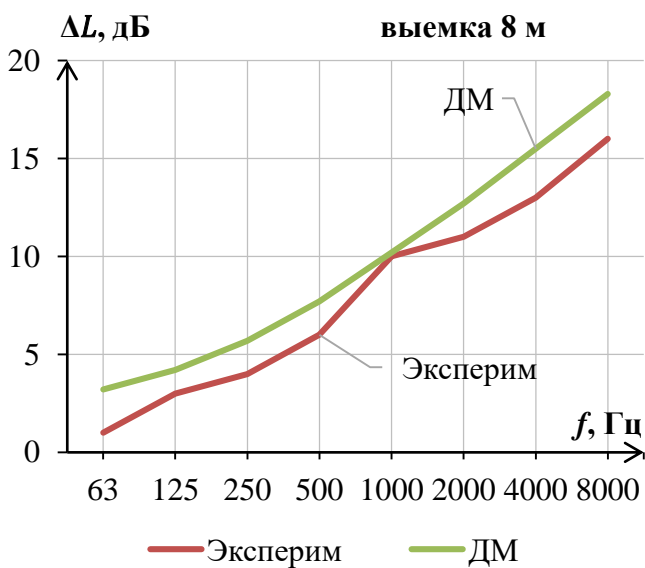
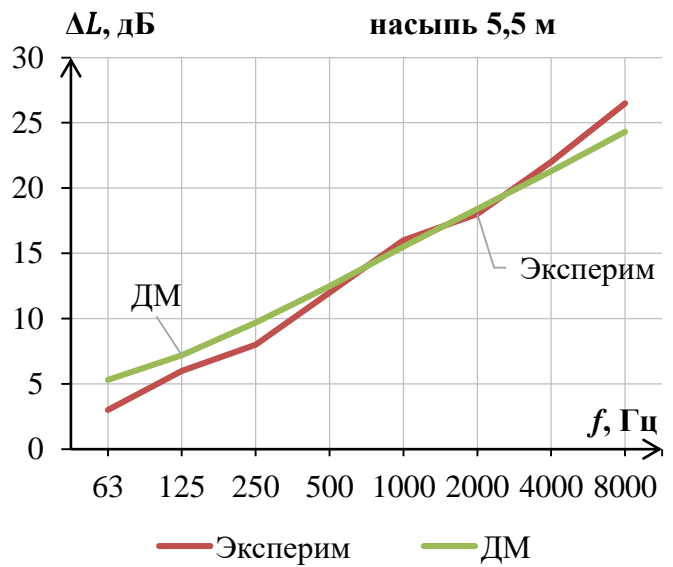
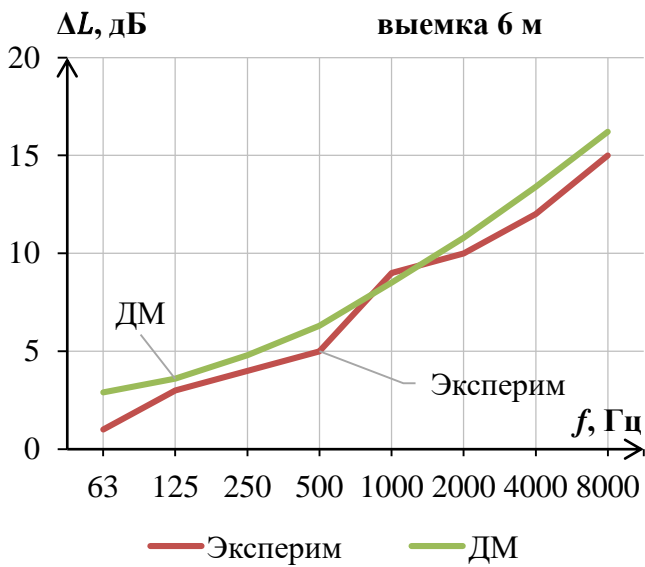
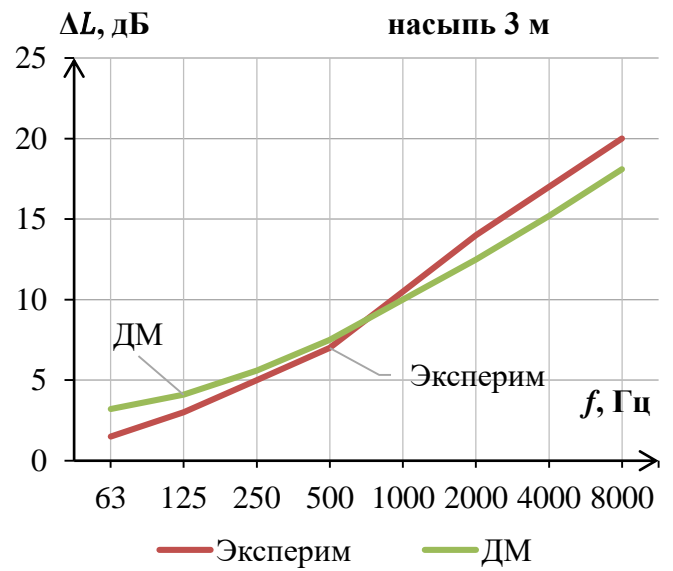
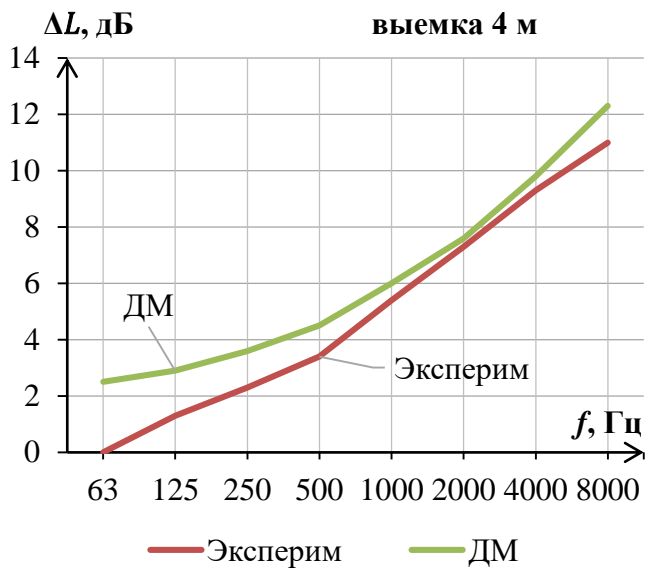


Рисунок 2.14 – Сравнение данных расчета и исследований акустической эффективности ИЗС, дБ

При этом оценка эффективности ШЗК в составе шумозащитного комплекса будет осуществляться в дБА.

Примем  $\Delta L_{max}^B = 20$  дБА как конструкции с дифракцией на одной кромке,  $\Delta L_{max}^H = 20 + K_M$  дБА за счёт дополнительного поглощения звука верхней площадкой и двойной дифракции (при защите малоэтажной застройки высотой ниже насыпи).

### **Выводы по главе**

1. На основании метода преобразования звуковых полей (ПЗП) был разработан инженерный метод оценки снижения шума ИЗС, который помимо конструктивных параметров учитывает дифракцию на кромках выемки и насыпи, а также коэффициенты звукопоглощения покрытий экранирующего сооружения. Звуковое поле в расчётной точке формируется вторичными излучателями шума (основанием со стороны источника шума и кромками ИЗС), преобразующими звуковое поле источника. При распространении звука учитываются явления отражения, поглощения, дифракции и геометрической дивергенции звука. Для создания модели шумозащиты разработана расчётная схема; приняты допущения (источник шума линейный, фронт звуковой волны цилиндрический; длина ИЗС условно принимается равной длине ИШ; для учёта явлений дифракции на кромках ИЗС используется показатель дифракции, определяемый экспериментально; дифракция через боковые рёбра и звукоизоляция ИЗС в расчётах не учитываются), выполнен последовательный переход от акустической мощности к интенсивности звука при каждом изменении характера звукового поля или импеданса препятствия; определена акустическая эффективность ИЗС.

2. Разработаны методики экспериментального определения акустической эффективности искусственных земляных экранирующих сооружений в соответствии с действующей нормативно-технической документацией, в которой указаны основные точки измерений и контрольные точки, показаны методики определения акустической эффективности, приведены условия измерений

(требования к метеорологическим условиям, минимальное число измерений в основных точках, способ обработки полученных результатов, перечень используемой аппаратуры). При усреднении результатов интервал измеренных УЗД составлял  $\pm 2$  дБА, а УЗ  $\pm 1,5$  дБА.

Экспериментально определен показатель дифракции. Выполнены его натурные измерения для насыпи высотой 7 м и выемки глубиной 6 м. Приведена методика экспериментальных исследований. Основные измерительные точки располагаются на высоте 0,1 м до и после кромки ИЗС. Выявлено увеличение ПД с увеличением частоты порядка 1,5 дБ на октаву от 3 дБ (63 Гц) до 10 дБ (8000 Гц), интегральное значение составило 7-8 дБА.

3. Экспериментально получены снижения УЗД и УЗ выемкой глубиной 4, 6 и 8 м, УЗД и УЗ насыпью высотой 3, 5,5 и 7 м. Для каждого исследуемого экранирующего сооружения измерялись УЗД и УЗ на подобных ровных участках в аналогичных точках. Получены значения акустической эффективности, дБ, в частотном диапазоне 63-8000 Гц. Характер полученных зависимостей – постоянное увеличение эффективности с ростом частоты в пределах 1-3 дБ на октаву для выемки, 2-5 дБ для насыпи. Акустическая эффективность насыпи заметно выше, чем выемки (при приблизительно одинаковых значениях высоты и глубины, за счет двойной дифракции и большего угла дифракции): на 2-3 дБ в низкочастотном диапазоне, 5-7 дБ в среднечастотном диапазоне, до 9-12 в высокочастотном диапазоне. Установлено, что с увеличением высоты ИЗС её эффективность увеличивается меньше, в частности, увеличение высоты выемки на 2 метра с 4 до 6 м – 3 дБА, с 6 до 8 м – 2 дБА.

4. Верификация предложенных формул показывает, что точность их расчётов по сравнению с экспериментом составляет  $\pm 3$  дБ во всем диапазоне частот. 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 дБА.



5. Уточнены расчётные схемы распространения звука при наличии ИЗС, влияние крутизны склонов и звукопоглощающих свойств ИЗС на его эффективность, на основании чего преобразованы формулы методик НТД, основанные на оптико-дифракционной теории. Для возможности проведения сравнительных расчётов акустической эффективности ШЗК разных видов и типов рассмотрены 5 схем расчёта разности хода звукового луча в присутствии экранирующего сооружения (с учётом высоты и формы всех рассмотренных ИЗС и расположения ИШ); введён коэффициент, учитывающий материал сооружения; исключена поправка на склон. Эффективность выемки, рассчитанная дифракционным методом, превышает экспериментальную на 2-2,5 дБ на низких частотах и практически совпадает с ней и рассчитанной методом ПЗП в средне- и высокочастотном диапазоне. Для насыпей: большее расхождение в низко- и высокочастотном диапазоне.

В общем и целом, результаты сравнения показали, что метод преобразования звуковых полей более точен. Для оценки акустической эффективности ШЗК в составе шумозащитного комплекса, которая будет осуществляться в дБА, применимы оба метода.

## ГЛАВА 3. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШУМОЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ. ОПТИМИЗАЦИЯ ШУМОЗАЩИТНОГО КОМПЛЕКСА

### 3.1. Разработка методики оценки экономической эффективности шумозащитных мероприятий

Для сравнения вариантов шумозащиты и выбора оптимального прием показатель «чистая приведённая стоимость» (ЧПС). Преобразуем его с учётом полного перечня затрат на реализацию шумозащитных мероприятий на протяжении всего жизненного цикла дороги (25-30 лет) и реального срока службы конструкций, входящих в состав шумозащитного комплекса.

Итак, стоимость шумозащитных конструкций складывается из пяти групп затрат:

- 1) Затраты на проектирование ( $C_{пр}$ ),
- 2) Капитальные вложения в строительство ( $K$ ),
- 3) Эксплуатационные расходы ( $C_t$ ),
- 4) Расходы на реконструкцию, частичную или полную замену ( $C_p$ ),
- 5) Затраты на ликвидацию ( $C_л$ ).

Распределение этих затрат, выраженных в условных денежных единицах (у.е.), во времени (в годах) показано на рисунке 3.1 а. Зачастую первые две группы затрат осуществляются в начальный, относительно короткий период времени, не больше года, и применение дисконтирования к ним не требуется (единовременные затраты). Эксплуатационные расходы начинаются с момента сооружения ШЗК и осуществляются в течение последующих лет её жизненного цикла, вплоть до ликвидации. Приведение их стоимости к начальному периоду времени (дисконтирование) приводит к уменьшению их размера на графике.

Важным фактором, который необходимо учесть в современных реалиях, является долговечность ШЗК (или её элементов). Проведённые исследования и НИОКР, а также анализ качества установленных на дорогах Российской Федерации шумозащитных конструкций, главным образом, экранов показывают, что многие

из них не обеспечивают заявленный производителем срок эксплуатации и возникает ситуация, когда до истечения рассматриваемого периода 25 – 30 лет осуществляется их частичная или полная замена. По истечению срока службы конструкции ( $t_d$ ) возникают расходы на её реконструкцию или замену (рис. 3.1 б).

Затраты на ликвидацию по шкале времени не распределяются, т.к. осуществляется в довольно короткий срок времени, но имеют место и в конце срока службы ШЗК ( $t_d$ ), и в конце рассматриваемого периода эксплуатации транспортного комплекса (Т).

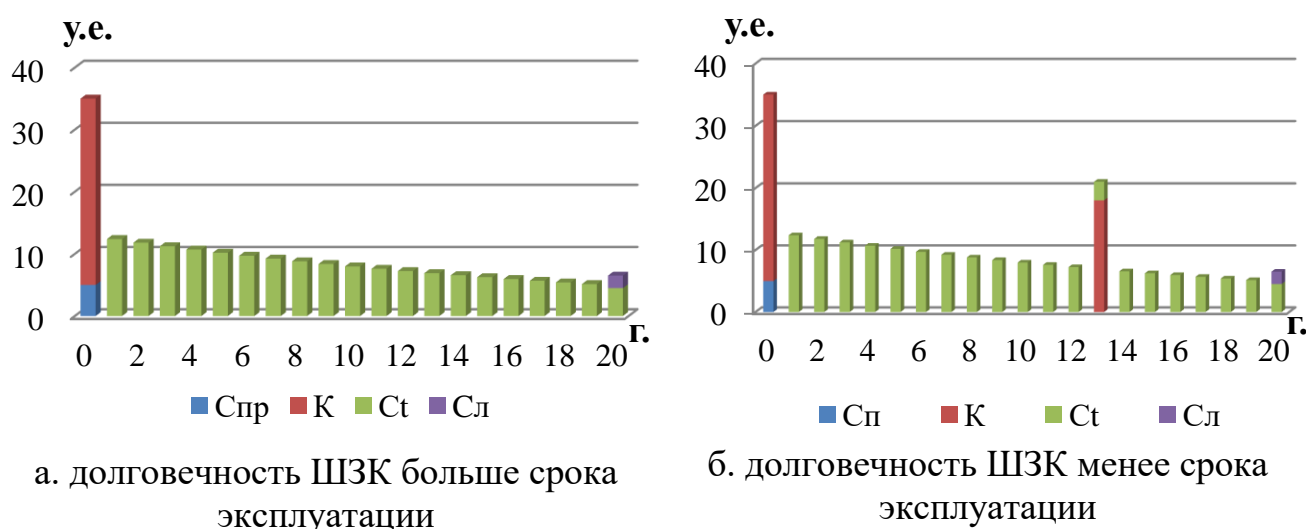


Рисунок 3.1 – Чистая приведённая стоимость ШЗК и её составляющие (у.е.) во времени.

Таким образом, формулу экономической эффективности ШЗК можно представить как:

$$\text{ЧПС} = C_{\text{пр}} + K + \sum_{t=1}^T \frac{C_t - \text{Э}}{(1+E)^t} + \sum \frac{C_p}{(1+E)^{t_d}} + \frac{C_l}{(1+E)^T}, \quad (3.1)$$

где  $K$  – капитальные вложения в строительство ШЗК, руб.;

$C_t$  – эксплуатационные затраты, руб.;

$C_{\text{пр}}$ ,  $C_p$  и  $C_l$  – затраты на проектирование, реконструкцию и ликвидацию, руб.;

$\text{Э}$  – дополнительный эффект от внедрения шумозащиты (при оценке многоцелевых мероприятий), руб.;

$T$  – рассматриваемый период эксплуатации, принимаемый в пределах 25-30

лет;

$t_d$  – долговечность (срок службы) ШЗК, лет;

$E$  – норма дисконта, доля единицы в год.

Предпочтение должно отдаваться варианту с минимальным значением ЧПС.

Для многоцелевых мероприятий, когда помимо снижения шума имеет место дополнительный эффект, например, в виде предотвращенного экологического ущерба, при расчёте дисконтируемых показателей учитывается значение такого эффекта ( $\mathcal{E}$ ). В данном исследовании не будем его касаться, рассмотрим шумозащиту только с целью обеспечения требуемого снижения шума, поэтому и индекс доходности не рассчитываем [127].

Каждый элемент затрат получается на основе сметных расчётов. Процесс составления сметы требует времени и зависит от числа рассматриваемых вариантов шумозащиты. Если будет установлена зависимость стоимости ШЗК от ключевых конструктивных параметров: высота, форма и материал, процесс существенно упростится. Это позволит в реальном времени оценить, как замена одного мероприятия другим отразится на полной стоимости шумозащиты, и не упустить из виду оптимальный вариант. Для этого проанализируем структуру и состав сметной стоимости основных ШЗК по каждому этапу, выявим закономерность изменения стоимости от изменения рассматриваемых в исследовании параметров, и подставим их в функцию ЧПС [16].

### 3.1.1. Затраты на проектирование

Вследствие отсутствия соответствующего сметного справочника базовых цен на проектные работы в области шумозащиты, невозможности определения стоимости проектирования по справочникам для дорог, затраты на проектирование оценим как [188]:

$$C_{\text{пр}} = [\sum(T_i \text{СДЗ}_i) \cdot k_{\text{нач}} + \text{ПЗ}] \cdot k_{\text{НР}} \cdot k_{\text{СП}} \quad (3.2)$$

где  $T_i$  - трудозатраты на проектно-изыскательные работы, чел.-дн.;

$\text{СДЗ}_i$  – средний дневной заработок проектировщика, руб./чел.-дн.;

$k_{\text{нач}}$  - коэффициент начислений на оплату труда, доля единицы;

ПЗ - прочие прямые затраты, руб.;

$k_{\text{НР}}$  и  $k_{\text{СП}}$  - коэффициенты накладных расходов и сметной прибыли соответственно, доля единицы.

На предпроектной стадии выбор шумозащитных мероприятий, как правило, проводится по ориентировочной эффективности ШЗК, защита в источнике шума и объекте защиты оценивается как 2 и 10 дБА соответственно. На этапе разработки проектной документации на основании результатов инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий, а также анализа данных о строении и конструктивных параметрах элементов дорог выполняется обоснование возможности устройства выбранных шумозащитных конструкций и детальный расчет параметров шумозащитных мероприятий.

Затраты на разработку проектно-сметной документации, например, шумозащитных насаждений включают [127]:

1) оплату работ по сбору и анализу первичной информации на объект изысканий: справочных и нормативных документов; картографических материалов; данных об уже имеющихся насаждениях, их состоянии, схемах посадок; почвенно-гидрологических и топографических характеристиках территории, лесорастительных условиях; сведений о метеопараметрах атмосферы района посадки, об осадках, характеристиках почвы и снежном покрове, вегетационном периоде; параметры негативного воздействия транспорта, уровни шума и др.;

2) расходы на рекогносцировочные и детальные натурные изыскания для уточнения границ посадок, визуальной оценки имеющихся насаждений, составления объёма и состава работ по шумозащитному озеленению и принятия обоснованного решения для включения материалов в рабочий проект.

3) затраты на создание рабочего проекта по шумозащитному озеленению. Этот документ содержит:

- общую пояснительную записку с исходными данными для проектирования (метео- и погодные условия района, характеристика участков дороги, рельеф, растительность и др.); технологическими решениями (рабочие схемы посадки,

входящие в состав озеленения растения, агротехнические приемы обработки почвы, выращивания и ухода за насаждениями); организацией работ с распределением объемов работ и их очередности; мероприятиями по охране окружающей среды; технико-экономическими показателями;

- сметную документацию (локальные сметы по видам работ, смета участка озеленения, сводный сметный расчет);

- рабочую документацию (ведомости лесомелиоративных выделов с принятыми проектными решениями; породный состав, схемы размещения растений в насаждениях; расчетно-технологические карты по видам работ; ведомости потребности в рабочей силе, механизмах и материалах);

- картографические материалы (ситуационный план дороги с указанием участков, на которые разрабатывается проект; план участков дороги с проектируемыми мероприятиями; рабочие схемы озеленения).

Для шумозащитного комплекса затраты на проектирование включают затраты на проектирование каждой ШЗК и комплекса в целом. Эта статья затрат если не одина, то мало отличается в зависимости от ШЗК. Поэтому при сравнении вариантов её можно не учитывать и не приводить этапы проектирования остальных ШЗК.

### **3.1.2. Капитальные вложения в строительство.**

#### **Формирование функции сметной стоимости**

Из анализа смет на строительство экранов, насыпей, выемок и лесопосадки (Приложения А-В) видно, что каждый элемент затрат по наименованию работ или расценка (Р), включающая: 1 - оплату труда (ОТ), 2 - эксплуатацию машин (ЭМ), 3 – оплату труда машиниста (ОТм), 4 – стоимость материалов (М), определяется умножением единичной сметной стоимости указанных затрат (1-4) на некий ключевой параметр. К расценке прибавляются накладные расходы (НР) и сметная прибыль (СП), начисляемые как процент от фонда оплаты труда (ФОТ, сумма 1 и 3) согласно Приказу Минстроя России в зависимости от вида работ (например, НР

земляные работы – 0,92; СП земляные работы – 0,46). В общем виде функция сметной стоимости выглядит как [16]:

$$K = \sum_1^n (P + \text{ФОТ} \cdot (k_{\text{НР}} + k_{\text{СП}})) \cdot \Pi_i \cdot k_{\text{инд}}, \quad (3.3)$$

где  $\Pi_i$  – параметры, в отношении которых выполняется работа (осуществляются затраты);

$P$  - расценки на выполнение работ (как за единицу измерения, так и в целом) в отношении  $i$ -го параметра, у.е.;

ФОТ - фонд оплаты труда, у.е.;

$k_{\text{НР}}$  и  $k_{\text{СП}}$  - коэффициенты накладных расходов и сметной прибыли по каждому виду работ соответственно, доля единицы;

$k_{\text{инд}}$  - коэффициент индексации;

$n$  – количество параметров.

$$P = \text{ОТ} + \text{ЭМ} + \text{ОТ}_M + M, \quad (3.4)$$

$$\text{ФОТ} = \text{ОТ} + \text{ОТ}_M. \quad (3.5)$$

Самой весомой составляющей формулы (3.4) является стоимость материалов ( $M$ ).

К ключевым параметрам ( $\Pi_i$ ), определяющим стоимость шумозащитной конструкции, относятся: объем грунта, площадь откосов, площадь шумозащитного полотна и т.д., определяющиеся высотой и формой сооружения.

**Сметная стоимость строительства ИЗС** определяется объемами земляных работ ( $V$ ),  $\text{м}^3$  и площадью откосов ( $S$ ),  $\text{м}^2$  (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Параметры, определяющие стоимость ШН и ШВ

Наименование работ и затрат	Параметр
разработка выемки или возведение насыпи и уплотнение грунта	$V$
планирование и укрепление откосов посевом многолетних трав, полив посевов трав	$S$
материальные затраты на покупку земли, песка, семян, удобрений	$V$ или $S$

При равных уклонах откосов выемки и насыпи объём земляных работ для их возведения рассчитывается как:

$$V = (e + y \cdot H) \cdot H \cdot l, \quad (3.6)$$

где  $l$  - длина шумозащитного сооружения, полагая  $l = 1$  м, получаем:

$$V = y \cdot H^2 + e \cdot H. \quad (3.7)$$

Аналогичным образом получена площадь откосов:

$$S^B = 2 \cdot \sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2} + e. \quad (3.8)$$

Если нижняя площадка выемки не «обрабатывается»,  $e$  в формуле не прибавляется.

Материальные затраты на землю ( $M_3$ ), семена ( $M_c$ ), песок ( $M_{п}$ ), удобрения ( $M_y$ ) выражаются как:

$$M_3 = 15,8 \cdot S \cdot C_3, \quad M_c = 2,7 \cdot S \cdot C_c, \quad M_{п} = V \cdot C_{п}, \quad M_y = 0,0034 \cdot S \cdot C_y, \quad (3.9)$$

где  $C_3, C_c, C_{п}, C_y$  – стоимость единицы указанных материалов, руб.

К ряду позиций допускается применение коэффициентов запаса (уплотнение грунта, например).

Расценки на работы ( $P$ ) и фонд оплаты труда (ФОТ) будут зависеть от подвида работы (например, разработка выемки и возведение насыпи от вместительности ковша и группы грунта), накладные расходы и сметная прибыль от вида земляных работ [16].

Таким образом, функция сметной стоимости капитальных вложений представленных в Приложении Б насыпей примет вид:

$$K^H = 82,7 \cdot (y \cdot H^2 + e \cdot H) + 31,1 \cdot (2 \cdot \sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2} + e). \quad (3.10)$$

Стоимость ШН (1;2) – насыпи с уклоном 1:1 и шириной верхней площадки 2 м – в зависимости от высоты:

$$K^H = 82,7 \cdot (H^2 + 2 \cdot H) + 31,1 \cdot (2 \cdot \sqrt{2 \cdot H^2} + 2).$$

Функция сметной стоимости представленных в Приложении Б выемок:



$$K^B = 5,5 \cdot (y \cdot H^2 + e \cdot H) + 31,9 \cdot (2 \cdot \sqrt{H^2 + (y \cdot H)^2} + e). \quad (3.11)$$

Стоимость, например, ШВ (1,5;15) – выемки уклоном 1:1,5 и шириной нижней площадки 15 м:

$$K^B = 5,5 \cdot (1,5 \cdot H^2 + 15 \cdot H) + 31,9 \cdot (2 \cdot \sqrt{H^2 + (1,5 \cdot H)^2} + 15).$$

Если учесть затраты на транспортировку грунта (Приложение А, позиция ФССЦпг-03-21-01-015), К увеличится на:

$$C_{\text{тр}} = 2,8 \cdot (y \cdot H^2 + e \cdot H), \quad (3.12)$$

где  $C_{\text{тр}}$  – стоимость транспортировки грунта, руб.

Если грунт от выемки не увозится, а используется на сооружение насыпи, то экономия на транспортные расходы существенная.

Для упрощённой оценки стоимости ИЗС с подпорными стенками с целью уменьшения уклона воспользуемся следующим допущением:

- 1) сокращение уклона осуществляется только со стороны источника шума;
- 2) подпорные стенки устанавливаются по всей площади откоса, обращенного к источнику шума;
- 3) экономия от уменьшения откоса соизмерима со стоимостью подпорных материалов и работами по их сооружению/возведению;
- 4) эксплуатационные затраты выше, а долговечность подпорной конструкции уступает цельному сооружению;
- 5) влияние подпорных стен на звукопоглощающие свойства ИЗС не оказывается.

Таким образом, стоимость ИЗС с уменьшенным уклоном упрощенно рассчитываем по той же формуле, что и с неуменьшаемым.

**Сметная стоимость строительства ШЭ** складывается из стоимости работ (земляные работы, устройство фундамента, устройство шумозащитного полотна) и стоимости материалов для их выполнения. Дополнительно могут возникать расходы, связанные с архитектурой, декорированием или эстетической отделкой. На выбор материалов сооружения могут повлиять климатические условия, особенности эксплуатации и даже традиции.

Ключевым параметром экрана (ШЭ), формирующим его стоимость, является площадь шумозащитного полотна,  $m^2$  (75-90% стоимости ШЭ). Площадь и материал определяют вес конструкции, а, следовательно, тип фундамента. Так ШЭ 4 м имеет монолитный ленточный фундамент, ШЭ 6 м – фундамент свайный с ростверком для устройства на небольших насыпях, ШЭ 8 м – фундамент свайный с ростверком для устройства на больших насыпях; каждому фундаменту соответствует свой вид земляных работ (Приложение А). При заданной длине на стоимость влияет высота ШЭ. Тип стоек также определяется высотой экрана.

В таблице 3.2 приведена стоимость материалов и строительно-монтажных работ по элементам экрана в зависимости от его высоты (в отношении ШЭ Приложения А). Сметная стоимость каждого вида работ может быть выражена формулой (3.3), статья «благоустройство» не рассматривается.

Таблица 3.2 – Элементы стоимости экрана

Высота экрана, м	Стоимость материалов и строительно-монтажных работ по элементам экрана, %		
	Земляные работы	Фундамент	Шумозащитное полотно (панели-стойки-крепление)
4	3	17	80 (89-10-1)
6	1	10	89 (79-20-1)
8	0,5	24	75,5 (78-21-1)

С учётом веса конструкции и шага по высоте 0,5 м выделим три диапазона высот ШЭ: 3-5 м; 5,5-7 м, 7,5-9 м.

Объединим стоимость фундамента и земляных работ и возьмём её из данных сметы. Стоимость шумозащитного полотна  $K_{шп}$  включает:

– стоимость панелей («алюминиевых или стальных оцинкованных со звукопоглощающими вкладышами»):  $K_{п} = 1384,12 \cdot H \cdot l$ , руб.

– стоимость стоек («оцинкованная в комплекте с крепежными деталями»):  $K_{ст} = 156,37 \cdot k_{ст} \cdot H \cdot l$ , руб.  $k_{ст} = 1$  для ШЭ 3-5 м; 1,97 для ШЭ 5,5-7 м; 2,24 для ШЭ 7,5-9м (по данным сметы),

– стоимость креплений («болты строительные анкерные с гайками»):  $K_{кр} = 8,68 \cdot H \cdot l$ , руб.

Для длины 1 метр:

$$K_{\text{шп}} = 1392,86 \cdot H + 156,37 \cdot k_{\text{ст}} \cdot H$$

При установке экрана на вновь возводимых насыпе и выемке используем фундамент свайный с ростверком для устройства на больших насыпях вне зависимости от высоты экрана без учёта земляных работ. При установке экрана на существующих насыпях и выемке – тот же, что и при установке на земле.

Тогда стоимость ШЭ из оцинкованной стали составит:

$$K_{\text{оц}} = \begin{cases} 1490,39 + 1549,23 \cdot H & \text{для } H = 3..5 \text{ м} \\ 1251,41 + 1746,57 \cdot H & \text{для } H = 5,5..7 \text{ м} \\ 4244,69 + 1773,27 \cdot H & \text{для } H = 7,5..9 \text{ м} \\ 4151,19 + 1549,23 \cdot H & \text{для } H = 3..5 \text{ м на ИЗС} \\ 4151,19 + 1746,57 \cdot H & \text{для } H = 5,5..7 \text{ м на ИЗС} \end{cases} \quad (3.13)$$

В отличие от ИЗС, представленных в основном грунтами, на рынке представлен широкий выбор материалов акустических экранов. Для каждого подвида (типа) в ключевых диапазонах следует разработать смету.

С целью упрощения расчётов или при отсутствии данных сметы для различных материалов можно воспользоваться анализом (экспертной оценкой) относительной стоимости панелей из 10 различных материалов, представленным в таблице 3.3. За эталон взята «панель звукоизолирующая шумозащитная из оцинкованной стали, окрашенная полиэфирной порошковой краской, с глухой или перфорированной фасадной крышкой», её стоимость (1251,74 у.е./м<sup>2</sup>) принята за единицу.

Таблица 3.3 – Относительная стоимость шумозащитных панелей

Материал панели	Относительная стоимость
Оцинкованная сталь <1мм	1*
Оцинкованная сталь ≥1мм	1,8
Алюминий <1мм	1,1
Алюминий ≥1мм	1,3
Аустенитная нержавеющая сталь ≥0,7мм	1,7
Древобетон	0,8

### Продолжение таблицы 3.3

Бетон	0,6
Композитные материалы, стеклопласты, пластик	1
Импрегнированная древесина	0,7
ПММА, монолитный поликарбонат прозрачный	1,5

С учётом данных таблицы 3.3 можно составить аналогичные формуле (3.13) функции стоимости ШЭ. Также можно принять во внимание следующую классификацию панелей экрана для выбора фундамента:

- облегченные панели (массой ниже 20 кг): панели из алюминия (до 1,2 мм), композитные панели;
- легкие панели: из оцинкованной или нержавеющей стали, импрегнированной древесины со звукопоглощением, стекла, ПММА и монолитных поликарбонатов (при толщине свыше 10 мм);
- тяжелые панели: из бетона или с наполнением бетона щепой, керамзитом и пр.

Типы ШЭ отличаются по форме. Альтернативой прямого «не тяжелого» экрана высотой более 4 метров является Г-образный экран. Для более точной оценки стоимости целесообразно составить смету, при упрощённых расчётах – использовать данные таблицы 1.2. Логично предположить, что указанные в таблице 10% распространяется на элемент затрат «шумозащитное полотно»  $K_{шп}$ . Следует учесть увеличение затрат на эксплуатацию вследствие усложнения обслуживания и содержания, а также возможное сокращение срока службы из-за дополнительных нагрузок (ветровые, дождевые, снеговые) на козырёк.

Для получения реальной стоимости шумозащиты следует проиндексировать полученную стоимость в цены рассматриваемого года.

Для сравнения вариантов шумозащиты можно использовать условные денежные единицы (у.е.). Главное, чтобы сметы были составлены одним методом (ресурсным, базисно-индексным или ресурсно-индексным) в одном текущем (базисном) уровне цен (2000 или 2001), желательно использовать один сборник единичных расценок одной редакции [16].

**Прочие капитальные вложения.** Если сравнивать полученные значения сметной стоимости, то стоимость снижения шума экранами окажется выше. Однако следует учитывать, что помимо сметной стоимости строительства ШЗК, имеют место прочие капитальные вложения.

Стоимость освоения новых земель взамен изымаемых ( $K_2$ ) в формуле (1.21) актуальна только для протяжённых по направлению от дороги к защищаемой территории ШЗК (насыпей, выемок, насаждений), эта статья заимствована из Руководства 1981 г. [136], где применялась для случаев изымания городских территорий для создания шумозащитных зон или отчуждения сельскохозяйственных земель.

Затраты на приобретение или аренду машин и механизмов для содержания ШЗК ( $K_3$ ) будут отличаться для каждой конструкции. Их целесообразно учесть в числе эксплуатационных расходов.

К прочим капитальным затратам ( $K_n$ ) относят такие как: установка дренажной системы; расходы на устройство различных конструкций для доступа дороги (подъезды, проходы, технические двери, лестничные сходы, дорожные знаки, уклоны, уширение земляного полотна, рвы и т.п.) в местах, где со стороны жилой застройки проходят транспортные пути; стоимость защитных элементов (ограждений); расходы на подземное и наземное перемещение (временное или постоянное) из-за установки ШЗК. Для ИЗС они будут выше, чем для ШЭ. К  $K_n$  для насыпей и выемок можно дополнительно отнести расходы, связанные со строительством инфраструктуры (переходы и мосты); устройством кювет-траншей; созданием систем водоотведения; сооружением инженерной защиты земляного полотна от природных геофизических процессов и т.д. Для экранов – нанесение на экран указателей и табличек, установка шумозащитных дверей и контрэкранов в местах проходов через ШЭ и т.п.

Также на стоимость ШЗК окажут влияние транспортные расходы. Так, доставка грунта для возведения насыпи может существенно увеличить её стоимость. Экономически целесообразнее возводить ШН из остатков грунта от проложения дороги. Комбинация ШВ-ШН экономически выгодна, но акустически

не эффективна. Также очевидно, что стоимость ИЗС ниже в малонаселённых местах или местности, где застройка находится с одной стороны дороги и не требует доступа к другой. Лесопосадка не даст такого снижения шума как экран, а стоимость шумозащитного озеленения оказывается сопоставимой со стоимостью ШЭ, уступая экрану в акустической эффективности.

Существуют и другие внешние факторы, оказывающие влияние на стоимость ШЗК [174]:

- доступность места установки, рельеф места строительства, например, наличие возвышенности требует дополнительных затрат на работы по уширению полотна, бурению, размещению крупногабаритного оборудования и т.п.;

- доступность материалов, деталей, комплектующих, снижающая транспортные расходы;

- ситуация на рынке строительных материалов и услуг, прогнозируемое удорожание за время строительства, затраты на создание и пополнение оборотных средств и др.

Перечисленное не охватывает всего влияния внешних факторов, но показывает широкий их диапазон и потенциальную возможность учета при расчете стоимости ШЗК для каждого конкретного случая возведения и эксплуатации.

Инвестору необходимо знать единовременные капитальные вложения, чтобы оценить размер будущих выплат («процентов») в случае получения кредитов под строительство шумозащитного комплекса и выбора схемы кредитования. При этом указанные выплаты относятся к эксплуатационным расходам [16].

### **3.1.3. Эксплуатационные расходы**

Эксплуатационные затраты на мероприятия по содержанию и ремонту ШЗК ( $C_t$ ) приводятся к первому году инвестиций дисконтированием. Их размер зависит от количества и периодичности проводимых за год мероприятий в течение всего периода использования ШЗК. Сметная стоимость указанных работ также может

быть представлена функцией, зависящей от основных конструктивных параметров ШЗК.

Эксплуатационные расходы на содержание экранов включают оплату труда [37, 127]:

- по очистке поверхности экрана и его прозрачных элементов (параметр, определяющий стоимость работ – площадь  $S_{\text{шп}}$  или  $H$  при длине 1 м);

- по окраске металлических и железобетонных поверхностей, поддержанию цветового решения экрана ( $S_{\text{шп}}$  или  $H$ );

- на текущий ремонт элементов экрана, а также аварийные ремонтные работы ( $S_{\text{шп}}$  или  $H$ );

- по зимнему содержанию (снегоочистка) участков дорог с экранами ( $S_{\text{шп}}$  или  $l$ ) и др.,

а также материальные затраты на покупку средств для выполнения указанных работ (краска, чистящие средства, инвентарь и оборудование, др.)

Ежегодные затраты по содержанию насыпи и выемки будут складываться из прямых затрат на оплату труда по очистке и укреплению откосов ИЗС, дорожного полотна (параметры – площадь откосов, т.е.  $y$  и  $H$ ,  $e^H$  и  $e^B$  соответственно) и косвенных затрат на:

- работы по дополнительной снего-, водо- и пескоборьбе в виде затрат на оплату труда по обслуживанию снегоочистителей, снегоуборщиков, снеготаялок, компрессоров, подогревателей и др. механических устройств, на вывоз снега или оплату указанных работ сторонними организациями ( $y$  и  $H$ );

- содержание сооружений инженерной защиты земляного полотна от природных геофизических процессов (в случае их возведения);

- содержание дополнительной инфраструктуры;

- материальные затраты: материалы, расходуемые на указанных работах; топливо для механизмов и обогрева; электроэнергия для механических устройств.

В ОДМ [37] предлагается рассчитывать ежегодные текущие затраты по содержанию и эксплуатации шумозащитных сооружений (насыпей и экранов) ориентировочно, принимая их как процент от сметной стоимости строительства.

Такой подход не совсем верен. Так, по логике разработчиков, на металлические экраны тратится 1,8 % от сметной стоимости. Как показано в табл. 3.3 стоимость металлических панелей может отличаться в 2 раза, при этом эксплуатационные затраты на панели из оцинкованной стали (её стоимость принята за 1), наоборот, могут быть даже выше (в случае применения дополнительной антикоррозионной обработки) по сравнению с экраном из нержавеющей стали (со стоимостью выше в 1,7 раз). Также, как было показано выше, стоимость ШЭ существенно отличается (непропорционально высоте) в зависимости от фундамента конструкции (на который идут несущественные эксплуатационные затраты). Т.е. при сравнении экранов высотой 6 м и 8 м на 30 летнюю перспективу коэффициент  $k$  [37], начисляемый в т.ч. и на фундамент с земляными работами (составляющие 11% и 24,5% соответственно) даст превышение ЧПС более, чем в 4 раза.

Поэтому использовать предложенный в [37] подход можно, но с рядом допущений для ШЭ:

- 1) ввести коэффициент эксплуатации  $k_э$  (в долях единицы), приведённый относительно стоимости панели, т.е. аналогично табл. 3.3.
- 2) для высоких ШЭ (принятых выше 7,5-9 м) и экранов, расположенных на вновь построенных насыпях и выемках, ввести дополнительную поправку (на фундамент), уменьшающую  $k_э$  на 13% (0,87); для низких и средних высот не использовать поправок, допуская, что ленточный фундамент, находящийся на поверхности также требует неких эксплуатационных затрат,
- 3) на  $k_э$  для ШЭ с модифицированной конструкцией верхней части вводим надбавку 10-15% (1,1).

Очевидно, более точные результаты могут быть получены по формуле:

$$C_t = k_э \cdot K_{шп}. \quad (3.14)$$

Но с учётом принятых допущений для целей сравнения нескольких вариантов экранов (с идентичной технологией производства и строительства) эксплуатационные расходы будем рассчитывать как:



$$C_t = k_3 \cdot K, \quad (3.15)$$

где  $k_3$  – приведённый коэффициент эксплуатации, доля единицы.

Вследствие соотнесения прямых эксплуатационных затрат по содержанию насыпи и выемки главным образом на площадь откосов, применение коэффициента [37] к сметной стоимости указанных сооружений (включаящую в свой состав на 33 % стоимость объёма грунта, а для высоких/глубоких ИЗС и существенные транспортные расходы) будет завышена. Данный показатель стоит умножать на статьи расходов, относящиеся на площадь ИЗС. Даже если предположить, что указанный в [37] верен (изначально его рассчитали как процент от стоимости некоего земляного сооружения), применять его к ИЗС отличной высоты будет ошибочно. Эксплуатационные затраты на выемку аналогичны, но вследствие расположения её откосов с двух сторон от дороги имеют большее значение, чем расходы на насыпь. Примем их как 0,007 для насыпи и 0,008 для выемки с учётом косвенных затрат.

Обоснованные  $k_3$  приведены в таблице 3.4.

### 3.1.4. Расходы на реконструкцию (замену) и ликвидацию

Расходы на реконструкцию (замену) ШЗК будем оценивать как сумму затрат на ликвидацию сооружения (его части) и капитальных вложений в строительство нового, умноженную на процент замены (реконструкции):

$$C_p = \sum \frac{k_3 \cdot (C_d + K)}{(1+E)^{t_d}}, \quad (3.16)$$

где  $k_3$  – коэффициент замены, доля единицы;

$t_d$  – долговечность (срок службы) ШЗК, лет.

Для оценки долговечности (срока службы) конструкций можно использовать подходы, представленные в [20, 91]. Опираясь на опыт использования экранов в Российской Федерации и метод определения акустической долговечности ШЭ [91] в таблице 3.4 приведены сроки службы разных конструкции, а также коэффициенты их эксплуатации и замены.

При  $t_d \geq T$  расходы на реконструкцию отсутствуют, при  $x \cdot t_d \leq T$  осуществляются  $x$  раз в рассматриваемый период  $T$  ( $x$  – целое).

Затраты на ликвидацию включают расходы на разбор конструкции, погрузку и транспортировку, а также её утилизацию [127].

Оценить затраты на утилизацию объекта на сегодняшний момент затруднительно. В стране развивается механизм продажи вторичных материальных ресурсов и сырья (металлические панели и стойки ШЭ, ограждения, перила, деревянные и пластиковые панели и т.п.). Величина  $C_d$  будет зависеть от размеров и материала конструкции, транспортных расходов до покупателя или переработчика и других факторов. Поэтому оставим их для дальнейших исследований и рассматривать не будем.

### 3.1.5. Модифицированная чистая приведённая стоимость шумозащиты

Согласно приведённым рассуждениям модифицированный с учётом особенностей строительства и эксплуатации шумозащитных сооружений показатель экономической эффективности – чистая приведённая стоимость ШЗК в упрощённом виде может быть выражена как [127]:

$$\text{ЧПС} = K + \sum_{t=1}^T \frac{k_3 \cdot K}{(1+E)^t} + \sum \frac{k_3 \cdot K}{(1+E)^{t_d}} \quad (3.17)$$

где  $K$  – капитальные вложения в строительство ШЗК, руб.;

$k_3$  и  $k_3$  – коэффициенты эксплуатации и замены, доля единицы;

$t_d$  – долговечность (срок службы) ШЗК, лет;

$T$  – рассматриваемый период эксплуатации, 25-30 лет;

$E$  – норма дисконта, доля единицы в год.

Капитальные вложения рассчитываются по формулам (3.10), (3.11), (3.13);  $k_3$ ,  $k_3$  и  $t_d$  приведены в таблице 3.4.

Для расчёта динамических показателей экономической эффективности экономисты используют программные продукты или функции MOExcel.

Для ориентировочной оценки на этапе проектирования при сравнении

однотипных инвестиционных проектов функцию ЧПС, формула (3.17), можно преобразовать введением коэффициента  $k_{\text{ЧПС}}$ :

$$\text{ЧПС} = K + T \cdot K \cdot \left( k_3 + \frac{k_3}{t_d} \right) = k_{\text{ЧПС}} \cdot K \quad (3.18)$$

$$k_{\text{ЧПС}} = 1 + T \cdot \left( k_3 + \frac{k_3}{t_d} \right) \quad (3.19)$$

$k_{\text{ЧПС}}$  определяется исключительно материалом ШЗК. При относительно равной сметной стоимости строительства более низкую ЧПС будет иметь ШЗК с меньшим  $k_{\text{ЧПС}}$ .

Параметры для расчёта ЧПС представлены в таблице 3.4

Таблица 3.4 – Параметры для расчёта ЧПС ШЗК

ШЗК	Срок службы, $t_d$ , лет	Коэффициент замены, $k_3$	Коэффициент эксплуатации, $k_3$	Коэффициент $k_{\text{ЧПС}}$
ШЭ, оцинкован. сталь менее 1мм	10	0,8	0,018	3,94
ШЭ, оцинкован. сталь более 1мм	15			3,05
ШЭ, алюминий менее 1мм	15	0,8	0,018	3,94
ШЭ, алюминий более 1мм	25			2,78
ШЭ, нержавеющей сталь	30	0,1	0,012	1,47
Бетонный ШЭ	30	0,1	0,007	1,31
Деревянный ШЭ	20	0,8	0,019	2,76
Древо/щепобетон ШЭ	25	0,8	0,013	2,35
Прозрачный ШЭ, стеклопласт	15	0,5	0,020	2,60
Прозрачный ШЭ, ПММА	15	0,5	0,014	2,42
ШЭ, композит, пластик	15	0,8	0,015	3,05
Г-образный ШЭ	та же	тот же	$k_3 \cdot 1,1$	-
ШН укрепление	30	0	0,007	1,21
	15	0,4-0,7	0,009	
ШВ укрепление	30	0	0,008	1,30
	15	0,6-0,8	0,009	

Выбор ШЗК будет осуществляться по минимальному значению ЧПС.

Ключевым фактором, снижающим ЧПС, является увеличение долговечности ШЗК, особенно шумозащитных панелей ШЭ. Так, например, новое металлическое покрытие для панелей из оцинкованных сталей, состоящее из сплава цинка, алюминия и магний (магнелис) позволяет увеличить коррозионную стойкость до 7 раз по сравнению с оцинкованной сталью и в 2 раза выше, чем алюмоцинк. Важной особенностью нового материала является самовосстанавливающаяся защита на обрезных кромках. Применение таких типов покрытия в 2,5 раза позволило увеличить период жизненного цикла ШЭ при незначительном увеличении стоимости панели [19, 165].

Вторым направлением уменьшения ЧПС является «дополнительный эффект» от внедрения шумозащиты при использовании многоцелевых мероприятий. Он может проявляться в дополнительном снижении ущерба, например, за счёт применения шумозащитных насаждений, которые помимо снижения шума способствуют реализации проектов по компенсационному озеленению; защите от снежных, песчаных и пылевых заносов и ветров; снижению концентрации выбросов вредных веществ от транспорта; сохранению естественного ландшафта местности и эстетическому восприятию окружающего вида; защите дороги от высоких температурных колебаний затенением участков. Другой пример - применение ШЭ из вторичных ресурсов: изношенных автомобильных покрышек или из резиновой стружки от утилизируемых изношенных автомобильных шин; панели из переработанного пластика, пластмасс, полиэтилена, ПВХ и стекловолокна. Помимо снижения стоимости конструкции возможно дополнительное финансирование таких проектов государством. Есть примеры использования шумозащитных ограждений из сетчатых мешков, заполненных компостом, где посажены растения, обеспечивающие ограждению вид естественной насыпи. И даже размещение на ШЭ фотоэлементов, элементов солнечной энергоустановки, вырабатывающих электрический ток и др. [93, 127, 128, 174]

### 3.1.6. Стоимость дополнительных мер защиты от шума

К возможным дополнительным мерам защиты относим: снижающие шум в источнике (вибродемпфирующие накладки (ВДН), шлифование рельс (ШР) или пористый асфальт (ПА)); шумозащитное остекление (ШО); шумозащитные насаждения (ШЗН).

Согласно сборнику №47 сметных нормативов и принятым в главе 1 допущениям, выделяем 2 вида посадки: лесопосадка (лесонасаждение, ЛП) и шумозащитное озеленение (ШЗ). Стоимость шумозащитных насаждений:

$$K^{\text{ШЗН}} = K^{\text{ЛП}} + C_{\text{ГДП}}, \quad (3.20)$$

где  $K^{\text{ШЗН}}$  – сметная стоимость ШЗН, руб.;

$K^{\text{ЛП}}$  – сметная стоимость лесопосадки, руб.;

$C_{\text{ГДП}}$  – стоимость главной древесной породы (ГДП, дерево 5 класса), руб.;

Работы и затраты на возведение ШЗН условно можно разделить на [16]:

– относящееся к площади, на которой осуществляется посадка: планировка, разбивка, очистка участка, внесение удобрений (с материальными затратами на удобрения) и зависящие от параметра – площадь посадки ( $S_{\text{ЛП}}$ );

– относящиеся непосредственно к посадке: подготовка посадочных мест, посадка деревьев и кустарников, уход за деревьями, материальные затраты. На единицу площади посадки ( $S_{\text{ЛП}}$ ) приходится определённое число деревьев и кустарника. Умножив их число на сумму штучной стоимости и стоимости работ по посадке, получим полную стоимость посадки. Её принято учитывать с учётом отпада (10-15%).

В Приложении В приведена смета на лесопосадку. Для круглогодичной защиты от шума целесообразнее использовать хвойные породы, поэтому выбраны кустарник – можжевельник двух видов: высокий и низкий (вне зависимости от вида имеющий одну стоимость) и сосна обыкновенная (1,0-1,5 м). На площадь  $S_{\text{ЛП}}=25 \text{ м}^2$  приходится 1 невысокое дерево, 1 кустарник (с чередованием высокого и низкого).

С учётом того, что длина шумозащитных сооружений принята как 1 м (т.е.  $S_{\text{лп}} = b_{\text{лп}}$ ) функция её стоимости из формулы (3.1) примет вид:

$$K^{\text{лп}} = 39,62 \cdot b_{\text{лп}} \quad (3.21)$$

где  $b_{\text{лп}}$  - ширина лесопосадки, м.

Не трудно оценить стоимость 1 дБА этой ШЗК – 660,3 у.е. С учётом формулы (1.18):  $K^{\text{лп}} = 660,3 \cdot \Delta L^{\text{лп}}$ .

Стоимость шумозащитного озеленения будет выше стоимости лесопосадки на стоимость главной древесной породы. Такие деревья имеют достаточно высокую стоимость, например, ель сербская (4,0-4,5 м, достигает 20-30 м) ценой в 3322,51 у.е. с посадкой обойдётся в 5852,81 у.е., существенны и затраты по их транспортировке. А учитывая их невысокую приживаемость на месте посадки, целесообразнее использовать более низкое дерево и получить требуемое снижение через год-полтора. В частности, пихту одноцветную (высота 3,0-3,5 м, годовой прирост 30-40 см, достигает 10-12 м).

Шумозащитное озеленение возводится только на ширину 25 м. На площадь  $S_{\text{лп}}=25 \text{ м}^2$  приходится 1 невысокое дерево (СДП), 1 кустарник (с чередованием высокого и низкого), 1 высокое дерево (ГДП).

Представленная в Приложении В смета несколько «упрощена». Она включает только 2 вида работ: подготовку посадочных мест и посадку деревьев и кустарников. Дополнив её недостающими работами как по отношению к посадочному материалу, так и к площади посадки и применив описанный выше подход к отнесению затрат на общую стоимость деревьев и кустарника, в табл. 3.5 получены сметные стоимости на подготовку участка, посадку кустарника и деревьев.

Таблица 3.5 – Сметная стоимость капитальных вложений в ШЗН, у.е.

Шифр	Наименование работы	Р, у.е.	ФОТ, у.е.	$k_{\text{нр}}/k_{\text{сп}}$
Затраты на подготовку участка посадки (100 м <sup>2</sup> )				
ФЕР 47-01-001-01	Планировка участка: вручную	14,87	2,90	
ФЕР 47-01-001-03	Разбивка участка	73,97	65,66	
	НР/СП	70,62/49,36		1,03/0,72

Продолжение таблицы 3.5

	Итого на 100 м <sup>2</sup>	208,82		
	Итого на 25 м <sup>2</sup>	52,21		
Посадка СДП (сосна обыкновенная, 1,0-1,5 м, 4 группа)				
ФЕР 47-01-005-16	Подготовка посадочных мест	27,73	16,39	
ФЕР 47-01-009-08	Посадка деревьев	147,6	51,55	
ФССЦ-16.2.02.03-0053	Сосна обыкновенная	541,88		
ФЕР 47-01-058-07	Заготовка деревьев	379,37	193,36	
ФЕР 47-01-067-08	Уход за деревьями	97,94	45,14	
	НР/СП	315,63/220,64		1,03/0,72
	Итого на 1 СДП:	1730,79		
Посадка кустарника: можжевельник: высокий (0,8-1,0 м) и низкий (0,4-0,5 м)				
ФЕР 47-01-004-10	Подготовка посадочных мест	16,67	7,53	
ФЕР 47-01-009-02	Посадка кустарников	29,92	5,92	
ФЕР 47-01-067-01	Уход за кустарниками	8,75	2,37	
ФССЦ-16.2.02.05-0017(18)	Можжевельник обыкновенный	30,39		
	НР/СП	16,29/11,39		1,03/0,72
	Итого на 1 кустарник:	113,42		
Итого на 25 м <sup>2</sup> ЛП		1896,41		
Посадка ГДП (Пихта одноцветная, высота 3,0-3,5 м)				
ФЕР 47-01-005-25	Подготовка посадочных мест	639,27	68,09	
ФЕР 47-01-009-09	Посадка деревьев	185,92	66,47	
ФССЦ-16.2.02.03-0037	Пихта одноцветная	1300,49		
ФЕР 47-01-058-08	Заготовка деревьев	532,99	288,6	
ФЕР 47-01-067-09	Уход за деревьями	124,76	53,29	
	НР/СП	490,74/343,04		1,03/0,72
	Итого на 1 ГДП:	3617,22		

Таким образом, функция стоимости лесопосадки по табл. 3.5:

$$K^{ЛП} = 75,8 \cdot b_{ЛП} \quad (3.22)$$

Т.е. снижение шума на 1 дБА стоит 1263,6 у.е. при  $b_{ЛП}=16,7$  м.

Функция стоимости шумозащитного озеленения по табл. 3.5:

$$K^{ШЗ} = 75,8 \cdot b_{ЛП} + 3617,2 \quad (3.23)$$

Снижение шума ШЗ на 6,5 дБА стоит 5512,2 у.е.,  $b_{\text{лп}}=25$  м.

Эксплуатационные затраты на содержание шумозащитных насаждений расходуются на такие работы, как [127]:

- уход за почвой,
- пополнение отпада семян в посадках,
- мелиорация почв и прочие мелиоративные работы,
- рубка текущего ухода, обрезка крон,
- противопожарная опашка насаждений и устройство минерализованных полос для борьбы с вредными насекомыми и болезнями леса,
- охрана насаждений и лесополос,
- другие работы, связанные с текущим содержанием защитных насаждений и лесополос, а также затраты на материалы для выполнения указанных работ.

Оценить указанные затраты можно из сметных расчётов, представленных в табл. 3.6.

Таблица 3.6 – Сметная стоимость эксплуатационных затрат на ШЗН, у.е.

Шифр	Наименование работы	Р, у.е.	ФОТ, у.е.	$k_{\text{нр}}/k_{\text{сп}}$
ФЕР 47-01-067-08	Уход за деревьями	97,94	45,14	
	НР/СП			1,03/0,72
	Итого на 1 СДП:	176, 94		
ФЕР 47-01-067-01	Уход за кустарниками	8,75	2,37	
	НР/СП			1,03/0,72
	Итого на 1 кустарник:	189,83		
ФЕР 47-01-067-09	Уход за деревьями	124,76	53,29	
	НР/СП			1,03/0,72
	Итого на 1 ГДП:	218,02		

Упрощенно стоимость накладок ( $K^{\text{ВДН}}$ , у.е.) можно представить как:

$$K^{\text{ВДН}} = C_{\text{ВДН}} \cdot n_{\text{ВДН}} \quad (3.24)$$

где  $C_{\text{ВДН}}$  - цена 1 п.м. накладки (с учётом работ по подготовке рельса и её установке), у.е.;

$n_{\text{ВДН}}$  - количество накладок, шт.



Длина применяемых средств должна быть соизмерима с длиной ШЗК, снижение шума в зависимости от длины «выносим за рамки настоящего исследования». Будем ориентироваться на стоимость ВДН – 2500 у.е./п.м.

Эксплуатационные затраты по содержанию накладок включают в себя осмотр конструкции, проверку упругости элемента, охватывающего подошву рельса и прижимающей вибродемпфирующие накладки, замену элементов при износе.

Затраты на шумозащитное остекление включают демонтажные работы; монтаж окон и дверей; установку в окно проветривающего шумозащитного устройства; монтаж подоконной доски, порога и водоотлива; отделочные работы. Их стоимость целесообразно отнести на параметр – окно, утя полное количество окон на единицу длины. За стоимость проветривающего шумозащитного устройства «Аэромат-80» взята рыночная и переведена в цены 2000 г. В зависимости от количества окон, попадающих в зону действия ИШ, стоимость шумозащитного остекления ( $K^{ШО}$ , у.е.) составит:

$$K^{ШО} = n_{ШО} \cdot C_{ШО} \quad (3.25)$$

где  $C_{ШО}$  – стоимость шумозащитного остекления окна, включающая работы по остеклению и стоимость шумозащитного устройства (8000 у.е.), у.е.;

$n_{ШО}$  – количество окон, шт.

Условно приняв 0,2 окна на длину 1 м и количество этажей  $h_{рт}/3$ :

$$K^{ШО} = 533,33 \cdot h_{рт} \text{ у.е.}$$

Чем выше застройка, тем больше  $K^{ШО}$ .

Эксплуатационные затраты на обслуживание шумозащитного остекления зависят от условий их эксплуатации. В числе требуемых работ: чистка клапана 4-5 раз в год, замена деталей, вышедших из строя, материальные затраты на моечные средства. Обслуживание осуществляется собственниками помещений или по их согласованию, поэтому трудно поддаются оценке. Срок службы ШО зависит от условий эксплуатации пользователями.

Параметры для расчёта ЧПС дополнительных средств защиты приведены в таблице 3.7

Таблица 3.7 – Параметры для расчёта ЧПС дополнительных средств защиты

ДМ	Долговечность (срок службы), $t_d$ , лет	Коэффициент замены, $k_3$	Коэффициент эксплуатации, $k_э$	Коэффициент ЧПС, $k_{чпс}$
ЛП	30	0-0,05	0,05	2,50-2,65
ШЗ	30	0,05-0,1	0,08	3,45-3,50
ВДН	15	0,8-1	0,06	4,40-4,80
ШО	20	0,5	0,005	1,9

### 3.2. Технологические и эксплуатационные требования, определяющие параметры ШЗК.

Помимо акустической и экономической эффективности при выборе шумозащитного комплекса следует учитывать технологии его изготовления и сооружения, а также условия его эксплуатации. Они определяют конструктивные параметры ШЗК, выбор материала.

#### 3.2.1. Требования к высоте ШЗК

Максимальная высота ШЭ диктуется прочностью и устойчивостью конструкции, при этом учитываются ветровая нагрузка, собственный вес ШЭ, нагрузка от аэродинамического воздействия и т.п. Вес шумозащитных панелей в некоторой мере определяет выбор фундамента. Также отметим, что возведение ШЭ на искусственных земляных сооружениях требует углублений свай на высоту ИЗС.

Максимальная высота ИЗС, как «более устойчивых» конструкций, может превышать высоту ШЭ. Она будет в большей степени ограничиваться эксплуатационными показателями (возможность снегоотвода, установка дренажной системы), экономической целесообразностью (чем выше насыпь, тем больший землеотвод требуется для её возведения, например, ШН (1;2) высотой 5 м в своём основании имеет 12 м; при этом объёмы грунта увеличиваются в

квадратичной зависимости вместе со стоимостью, транспортными и эксплуатационными расходами), возможностью доступа к дороге.

Минимальная высота ШЗК определяется с позиций акустики. Она определяется прямой из центра ИШ до РТ, что даёт минимальную эффективность 4,8 дБА.

Производители ШЭ предлагают панели с шагом по высоте, как правило, 0,5 м или 1 м, реже 0,25 м. При определении требуемой высоты, выбирается ШЭ ближайшего большего шага. ИЗС также возводятся с шагом по высоте (0,1; 0,5 м), поэтому и их функции эффективности дискретны.

Таким образом, искомые переменные задачи оптимизации (высоты ШЗК) – дискретные, ограничены минимальной и максимальной высотой конструкции.

### **3.2.2. Требования к форме ШЗК**

Уклон ИЗС определяется видом грунта.

Уклон насыпи нормируется в случае расположения на ней дороги. В частности, по [181] в зависимости от вида грунта он варьируется в пределах от 1:1,5 до 1:2. Уклон ШН как защитного сооружения выбирается минимально возможным. Устойчивость её откосов рекомендуется рассчитывать в соответствии с положениями указаниями ВСН № 04-71 с учётом свойств грунта, несущую способность – в соответствии с требованиями правил СП 22.13330. Как правило, уклон ШН составляет 1:1 - 1:0,5 с шагом, принимаемы ЛПР в зависимости от технологий возведения.

Согласно [37] внутренние откосы выемки (со стороны источника шума) должны иметь уклон 1:2 или 1:1,5. Внешние откосы выемки (со стороны защищаемой территории) для большего снижения шума следует выполнять необтекаемыми, без округления верхней бровки. Величина уклона выемки с высотой откосов до 12 м в зависимости от грунта согласно [181] представлена в табл. 3.8.

Таблица 3.8 – Уклон выемки в зависимости от грунта [181]

Вид грунта	уклон
Скальные слабовыветривающиеся	1:0,2
Скальные выветривающиеся	1:0,5 - 1:1
Скальные легковыветривающиеся	1:1,5
Крупнообломочные, песчаные, глинистые (в т.ч. лессовидные) твердой, полутвердой, тугопластичной консистенции	1:1,5
Глинистые грунты в районах избыточного увлажнения	1:2
Пески мелкие (барханые) в засушливых районах	1:1,75 - 1:2
Лессы на неорошаемых участках в районах с засушливым климатом	1:0,1 - 1:0,5
Лессы вне районов с засушливым климатом	1:0,5 - 1:1,5

Шаг (для значений уклонов, представленных в таблице в диапазоне) в зависимости от технологий возведения составит 0,25-0,5 м.

Уменьшения уклона ШН и ШВ с сохранением устойчивости их откосов добиваются установкой подпорных стенок из недорогих, преимущественно местных материалов: древесина, каменная кладка, армированный грунт, габионы и т.п. Для защиты откосов ШН от размыва целесообразно устройство газона или обработка его поверхности вяжущими материалами [33, 37].

Ширину площадки насыпи ( $e^H$ ) стоит выбирать размером 2-3 метра. Её увеличение нецелесообразно ни с акустической, ни с экономической точки зрения (табл. 3.9). Увеличения эффективности ШН (1;2) высотой 4 м, ( $h_{иш}=0,5$ ,  $h_{рт}=1,5$  м, расстояние ИШ-ШН 4,5 м) дешевле добиться увеличением высоты на 1 м, нежели увеличением площадки  $e^H$ .

Таблица 3.9 – Влияние формы на эффективность ШН (расстояние ИШ-ШН 4,5 м)

Показатель	ШН (1;2) 4 м	ШН (1;2) 5 м	ШН (1;6,5) 4 м	ШН (0,5;2) 4 м	ШН (1;3) 4 м
$\Delta L_n$ , дБА	17,7	19,8	19,8	18,6	18,4
Стоимость, у.е.	2398,9	3396,5	4027,4	1663,6	2760,8
Основание, м	10	12	14,5	6	11

Снижение уклона (с 1 до 0,5) даст 1 дБА. Увеличение  $e$  на 1 м (с 2 до 3) даст также порядка 1 дБА. ШН (1;3) и ШН (0,5;2) примерно равнозначны для снижения

шума, при этом стоимость последней в 1,5 раза ниже. Разница в ЧПС будет ниже из-за эксплуатационных качеств подпорной стенки (в случае её использования).

Однако, существенная разница в стоимости наблюдается при близком расположении насыпи от ИШ. При удалении ИШ от ШН более, чем на 10 м, увеличение высоты на 1 м равно по эффективности увеличению площадки не на 4,5 м (как приведено выше), а на 3 м (табл. 3.10).

Таблица 3.10 – Влияние формы на эффективность ШН (расстояние ИШ-ШН 10 м)

Показатель	ШН (1;2) 4 м	ШН (1;2) 5 м	ШН (1;5) 4 м
$\Delta L_{Н}$ , дБА	14,4	16,6	16,5
Стоимость, у.е.	2466,1	3494,5	3585,4
Основание, м	10	12	13

Ширина площадки выемки ( $e^B$ ) определяется категорией дороги и количеством полос движения с учётом ширины проезжей части, обочин, разделительных полос и ограждений. При этом важно отметить, что чем дорога шире, тем больше расстояние ИШ-ШЗК. Если оценка шумовой характеристики ИШ производится от края проезжей части (пути), ближайшего от РТ; то для оценки эффективности ШЗК акустический центр ИШ берется на оси проезжей части (ПЧ) для двухполосных дорог, на оси наиболее удаленной от РТ полосы движения в случае многополосных автодорог [37]. Не во всех НТД данный факт указывается корректно.

В зависимости от категории железных дорог, числа главных путей, ширины земляного полотна (ЗП), определяемой видом грунтов, расстояний между путями по [181], а также с учётом расположения акустического центра ИШ в таблице 3.11 приводятся ориентировочные минимальные размеры нижней площадки ШВ ( $e^B$ ) и расстояние ИШ-ШЗК ( $r_1 + r_2$ , где  $r_1$  – расстояние от центра ИШ до края ПЧ (пути),  $r_2$  – расстояние от края ПЧ (пути) до (первой в случае комбинации) ШЗК, примем  $r_2=4$  м).

Размеры поперечного сечения земляного полотна определяются расстоянием между осями главных путей: на обычных железных дорогах оно составляет около 4 м (в России – 4,1 м), на ВСМ в целях снижения

аэродинамического воздействия встречных поездов друг на друга – 4,7-4,8 м. При этом ширина основной площадки достигает 13 м и более.

Таблица 3.11 – Параметры для определения  $e^B$  и расстояния ИШ-ШЗК при защите от шума железной дороги (прямые участки) с учётом грунта

Категория ж/д	I+	I и II		III		IV
		1	2	1	2	
Число путей	2	1	2	1	2	1
Ширина ЗП, м	10,7/11,7	6,6/7,6	10,6/11,6	6,3/7,3	10,2/11,2	6,2/7,1
Расстояние $r_1$ , м	5,35/5,85	3,3/3,8	5,3/8,8	3,15/3,65	5,1/5,6	3,1/3,55
Расстояние ИШ-ШЗК, м	9,35	7,3	9,3	7,15	9,1	7,1
Минимальная ширина $e^B$ , м	18,7/19,7	14,6/15,6	18,6/19,6	14,3/15,3	18,2/19,2	14,2/15,1

Аналогичные параметры отражены в табл. 3.12 для автодорог с учётом ГОСТ 33475-2015 [182].

Таблица 3.12 – Параметры для определения  $e^B$  и расстояния ИШ-ШЗК при защите от шума автомобильной дороги (прямые участки)

Параметры элементов дорог	Авто магистраль	Скоростная дорога	Автомобильные дороги обычного типа (нескоростная дорога) категории					
	IA	IB	IV	II	III	IV	V	
Число полос движения, шт.	4	4	4	4	2	2	2	1
Ширина полосы движения, м	3,75	3,75	3,75	3,5	3,75	3,5	3,0	4,5
Ширина обочины, м	3,75	3,75	3,75	3,0	3,0	2,5	2,0	1,75
Ширина ЗП, м	24,5 и более				13,5	12	10	8
Расстояние $r_1$ , м	19 и более			17,3	6,8	6,0	5,0	4,0
Минимальная ( $e^B$ ), м	32,5				21,5	20	18	16

Для четырёхполосных дорог применяется разделительная полоса (2 м при наличии ограждений, по ранее действовавшему ГОСТу - 5 м).

Пример расчёта эффективности в зависимости от расстояния ИШ-ШЗК ( $r_1 + r_2$ , м) приведён в таблице 3.13. При расположении в четырёх метрах от края дороги минимальное расстояние ИШ-ШЗК составит 7,5-8 м.

Таблица 3.13 – Эффективность ШЗК в зависимости от удаления

ШЗК	$\Delta L$ , дБА в зависимости от расстояния ИШ-ШЗК, м							
	7	8	9	10	11	16	20	24
ШЭ	15,8	15,3	14,8	14,4	14,1	12,6	11,8	11,2
ШН	13,4	13,1	12,9	12,6	12,9	11,8	11,2	10,7
ШВ	11,2	10,7	10,3	10,0	9,6	8,1	7,7	6,9

Также следует учесть, что у подошвы откосов выемок глубиной более 6 м в скальных легковыветривающихся грунтах следует предусматривать устройство кювет-траншей (шириной понизу 4 м и глубиной 0,6 м). В слабовыветривающихся и выветривающихся скальных грунтах при невыдержанности их залегания, сильной дислоцированности и неблагоприятном расположении поверхностей ослабления следует у подошвы откосов предусматривать улавливающие траншеи с габаритами по расчету. Выемки в подвижных песках должны устраиваться с кювет-траншеями. Поэтому использовать ШВ для защиты от шума широких дорог нецелесообразно [181].

### 3.2.3. Требования к материалу ШЗК

Материал ШЭ влияет на его акустическую эффективность, долговечность и стоимость, возможность применения в конкретной местности.

С акустической точки зрения в зависимости от отражающих и поглощающих свойств, учитываемых  $K_M$  или коэффициентом звукопоглощения  $\alpha_3$ , ШЭ делят на:

- однослойные (отражающие) из бетона, асбоцементных панелей, кирпича, дерева, пластика, полимерных материалов (акриловое стекло, поликарбонаты), закаленного стекла или триплекса и пр. ( $\alpha_3 = 0,01 - 0,05$ ,  $K_M=3$ );
- однослойные смешанные (например, древобетон,  $\alpha_3 = 0,05 - 0,15$ ,  $K_M$  не регламентирован);

- двух- или трехслойные (поглощающие) со слоем звукопоглощающего материала внутри (шлаковата, капроновое волокно, стекловата, пенополиуретан и другие пористые или волокнистые материалы), доступ к которому осуществляется за счёт перфорации со стороны ИШ в наружных панелях из стали, нержавеющей стали, алюминия, импрегнированной древесины и др. ( $K_M=0$ ),
- комбинированные (например, металлические 3-х слойные панели с панелями из стекла или прозрачного пластика).

Также необходимо принимать во внимание долю отражающих опорных элементов ШЭ.

Для достижения одинакового снижения шума отражающие ШЭ должны быть выше поглощающих. Поэтому необходим более точный учёт  $K_M$  (через  $\alpha_3$ ), что демонстрирует табл. 3.14.

Таблица 3.14 – Стоимость ШЭ с разными поглощающими свойствами материала (одинаковой стоимостью 1 м<sup>2</sup>)

Величина $K_M$	$K_M=0$	$K_M=1$	$K_M=2$	$K_M=3$
Высота, м	3,6	3,8	4,1	4,4
Стоимость, у.е.	7539,1	7888,4	8412,3	8936,3

Металлические и прозрачные экраны под определённым углом падения могут создавать эффекты бликов.

Поликарбонат теряет прозрачность под воздействием атмосферных условий и ультрафиолета. Сталь и алюминий подвержены коррозии. Близкое расположение к проезжей части усиливает загрязнение экрана. Указанные факторы оказывают влияние на долговечность, а также эксплуатационные затраты по надлежащему обслуживанию.

Благодаря внедрению в производство различных перерабатываемых материалов становится доступным растущее число продуктов, «не наносящими ущерба окружающей среде». Примеры: переработанный пластик в опорных конструкциях, отходы производственного процесса в поглощающих элементах,



части старых шин в качестве декоративных кадок для растений, бытовые отходы, превращенные в компост. Использование смешанного лома и излишков может сказаться на выборе цвета; устранение загрязнения и переработка утилизированных материалов может увеличить стоимость работ. Важно установить, сопоставим ли переработанный продукт с новым материалом, и удостовериться, что он не будет разрушаться быстрее.

Существуют требования к толщине листов панелей, звукопоглощению материала, площади перфорации, крепёжным материалам и фундаменту, площади прозрачных панелей ШЭ (не более 50% его полной площади) и ряд других.

Материалом ИЗС является шумопоглощающий грунт, как правило, с растительностью: травы, низкий кустарник; реже применяются каменные материалы, габионы, армированный грунт для устойчивости откосов, эти материалы – шумоотражающие.

### 3.2.4. Требования к шумозащитным насаждениям

Ширина насаждений ( $b_{\text{лп}}$ , м) задаётся проектировщиком. При требовании иметь не менее 50% ширины санитарно-защитной зоны железной дороги:  $b_{\text{лп}} \geq R_3/2$ . Шумозащитное озеленение возводится на ширину 25 м (его эффективность принята как 6,5 дБА).

Максимальное значение  $b_{\text{лп}}$  определяется исходя из расстояния от ШЗН до домов и до ШЗК (3, м, задаёт проектировщик). Для возможных вариантов ШЗК в таблице 3.15 приведена максимальная ширина ЛП.

Таблица 3.15 – Максимальная ширина шумозащитных насаждений, м

Формула расчёта $b_{\text{лпmax}}$ для различных ШЗК			
ШЭ	ШН, ШН-ШЭ	ШВ	ШВ-ШЭ
$R_3 - x_2 - 3$	$R_3 - x_2 - y \cdot H - e - 3$	$R_3 - x_2 - y \cdot H - 3$	$R_3 - x_2 - y \cdot H - 3 - x_3$

Указанные в табл. 3.15 расстояния должны быть уменьшены для ШЭ и ШН на ширину, исключаящую их попадание в зону акустической тени ШЗК, для чего

требуются дополнительные исследования совместного действия ШЗК и ШЗН.

Высадка ШЗН также возможна с неким шагом ( $s$ ), для ШЗ предусмотрены определённые разрывы между рядами [140].

Дендрологический состав посадки должен быть подобран с учётом климатических, экологических, эксплуатационных и экономических факторов.

### **3.2.5. Учёт технологических и эксплуатационных показателей при оптимизации шумозащитного комплекса**

При выборе ШЗК в составе шумозащитного комплекса, обеспечивающего необходимое значение акустической эффективности, оценивают:

- возможность устройства той или иной конструкции в имеющихся условиях;
- его экономическую эффективность;
- оптимальность устройства, определяемую по технологическим и эксплуатационным показателям (согласно предъявляемым к ШЗК требованиям).

Ряд показателей технологического и эксплуатационного характера оказывают влияние на выбор конструктивных параметров ШЗК, определяя её акустическую и экономическую эффективность. Целесообразен их учёт в процессе оптимизации. Для установления параметра  $\delta$  необходим учёт характеристик источника шума и защищаемого объекта. Условное распределение указанных показателей по блокам приведено на рисунке 3.2.

Блок «окружение» включает исходные данные модели оптимизации:

- характеристики ИШ: частота  $f$  или длина волны  $\lambda$ , высота ИШ  $h_{\text{иш}}$  (определяющая среди прочих  $\delta$ ); категория дороги ( $r_1, \delta$ , ширину нижней площадки выемки  $e^B$ ); УЗ, УЗД ( $\Delta L_{\text{тр}}$ );
- характеристики защищаемого объекта: расстояние до застройки  $R_3$  и её высота  $h_{\text{рт}}$  ( $\delta$ ), назначение помещений или территорий –  $\Delta L_{\text{тр}}$ ; наличие СЗЗ (минимальная ширина лесопосадки  $b_{\text{лшmin}}$ ),
- климат: агрессивность окружающей среды –  $K_M$  (линейка материалов ШЭ, вид

грунта ИЗС, деревьев ШЗН), почвогрунт –  $K_m$  ИЗС,  $y$  и др.

Блок «Технология» содержит исходные данные для формирования функции эффективности (расположение ШЗК относительно ИШ  $r_2, r_3$ , определяющие  $\delta$ ), а также требования, налагающие ограничения на конструктивные параметры ШЗК (нагрузки (ветровые, аэродинамические) влияют на  $H_{\min}^3 \cdot H_{\max}^3$ , технология строительства на  $H, y, e$ , шаг ( $h$ ), землеотвод на  $H_{\max}^{\text{изс}}$ ).

В блок «Долговечность-Стоимость» входят показатели: срок службы  $t_d$ , коэффициент замены  $k_3$ , прочность, определяющие выбор линейки материалов ШЭ, вида грунта ИЗС, деревьев ШЗН. Они формируют целевую функцию оптимизации.

Блок «Эксплуатация» и его характеристики налагают ограничения на конструктивные параметры ШЗК: технология эксплуатации –  $H$ , коэффициент эксплуатации ( $k_9$ ) – материал, целевую функцию.

В каждом блоке от «Технологии» до «Эксплуатации» можно выделить «прочие» критерии, которые могут быть учтены проектировщиком при выборе ШЗК: устройство дренажа дороги, ограждений, качество сборки и установки, доступ дороги, снегоперенос, стойкость к воздействию ОС (биостойкость, стойкость к гниению, выбросам транспорта), удобство обслуживания и ремонтпригодность, безопасность при эксплуатации, вандалозащищенность, пожаро- электро- безопасность, огнестойкость, архитектурно-эстетический вид, отсутствие помех визуальному осмотру и др. Их оценка возможна как после оптимизации по стоимостному критерию, так и совместно с экономической по бально-рейтинговой системе.

Блок «Акустика» – первичный в выборе шумозащитного комплекса. Функция акустической эффективности зависит от ключевых параметров ШЗК, её значение должно превышать требуемое снижение шума. Помимо расчётной эффективности ШЗК существуют ряд акустических требований к индексу звукоизоляции, коэффициенту звукопоглощения, определяемые по НТД. Минимальная и максимальная акустическая эффективность налагает ограничения на высоту ШЗК.

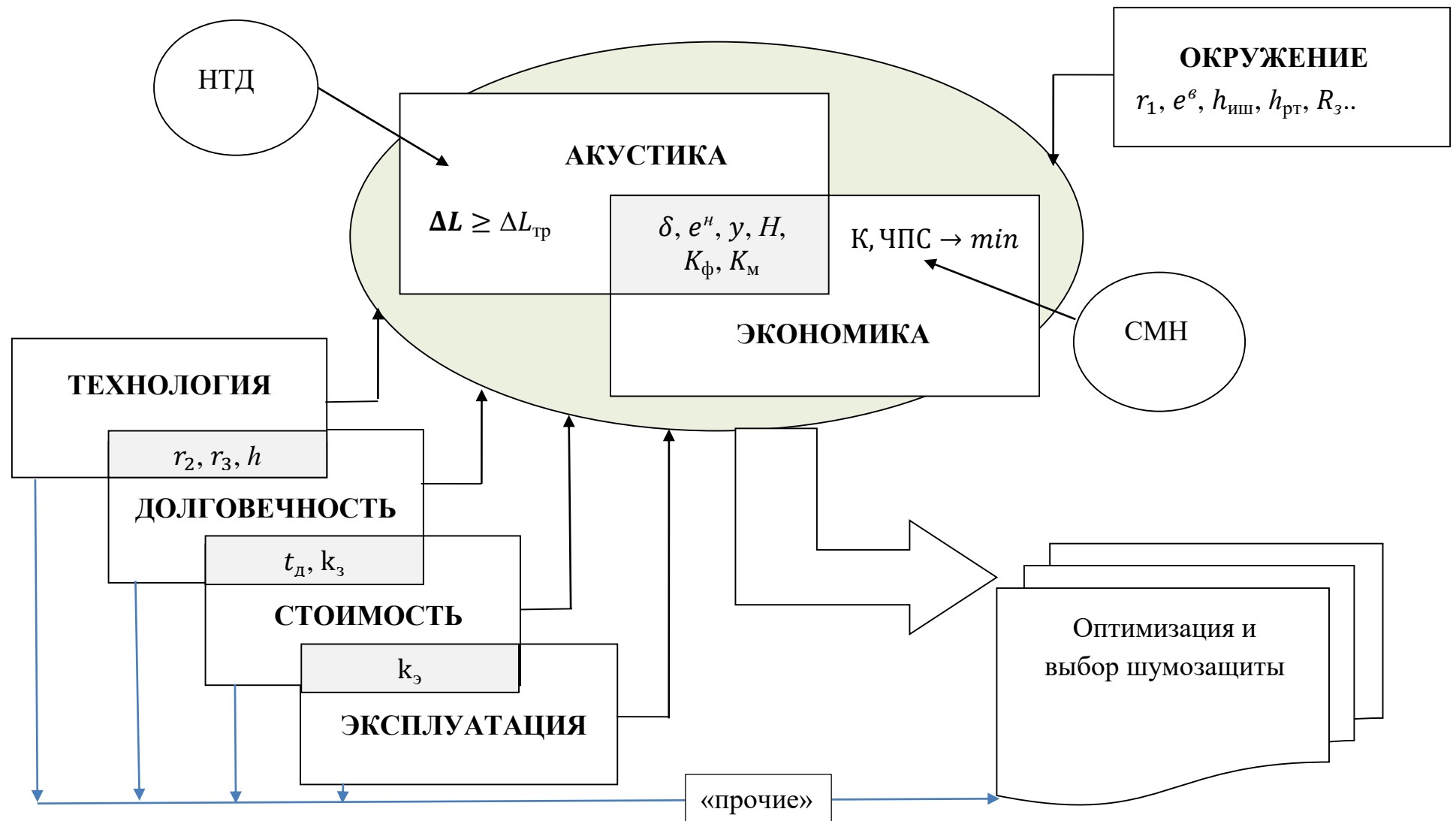


Рисунок 3.2 – Параметры, определяющие эффективность ШЗК и учёт их при оптимизации

«Экономика» – блок, функции которого (К и ЧПС) минимизируются в процессе оптимизации. Стоимость и экономическая эффективность ШЗК зависит от ключевых параметров ШЗК, коэффициенты при этих параметрах и константы в указанных функциях формируются по данным сметных нормативов (СМН) с учётом технологической карты строительства.

### **3.3. Оптимизация шумозащитного комплекса**

Можно сформулировать два направления оптимизации шумозащитного комплекса:

- 1) Перебор всех возможных сочетаний различных шумозащитных мер с целью нахождения экономически обоснованного.
- 2) Нахождение оптимальной ШЗК в случае возможности применения только одного сооружения (ШЭ, ШН, ШВ, или ШН-ШЭ, ШВ-ШЭ). В случае, когда требуемое снижение шума превышает максимальную эффективность сооружения, подбирается высота ШЗК, обеспечивающая максимальное снижение шума, а «недостающие дБА» снижаются за счёт дополнительных мер.

Выбор шумозащитного комплекса может диктоваться условиями:

- 1) избегать применения шумозащитного остекления, особенно если требуется снижение шума на селитебной территории вне помещений;
- 2) применять конструкции, относящиеся к техническим сооружениям дороги;
- 3) при относительно равной стоимости отдавать предпочтение варианту с меньшим количеством мероприятий;
- 4) учитывать технологии возведения и условия эксплуатации объекта.

#### **3.3.1 Области принятия решения**

Предлагается выделить следующие условные области принятия решения в зависимости от [183]:

- 1) расстояния до защищаемого объекта:

- область близко расположенной застройки: условно до  $R' = 50$  м,
- область расположения застройки за пределами  $R'$  (50..100 м). Это область санитарно-защитной зоны железной дороги. Ширину СЗЗ до границы садовых участков можно принимать равной 50 м; при размещении железных дорог в выемке глубиной не менее 4 м или при осуществлении специальных шумозащитных мероприятий ширина СЗЗ также может быть уменьшена со 100 м до 50 м [184].

2) этажности защищаемой застройки (высоты РТ):

- область малоэтажной застройки (МЭЗ), а также мест пребывания и отдыха людей;
- область среднеэтажной застройки (СЭЗ).

Границы отнесения застройки к малоэтажной отличаются в случае использования ШН. Для насыпи малоэтажной является застройка высотой ниже высоты ШН (рис. 3.3). Местами пребывания людей считаем РТ высотой 1,5 м. Условно допускаем 1 этаж – 3м, второй - 6 м, третий – 9 м и т.д.

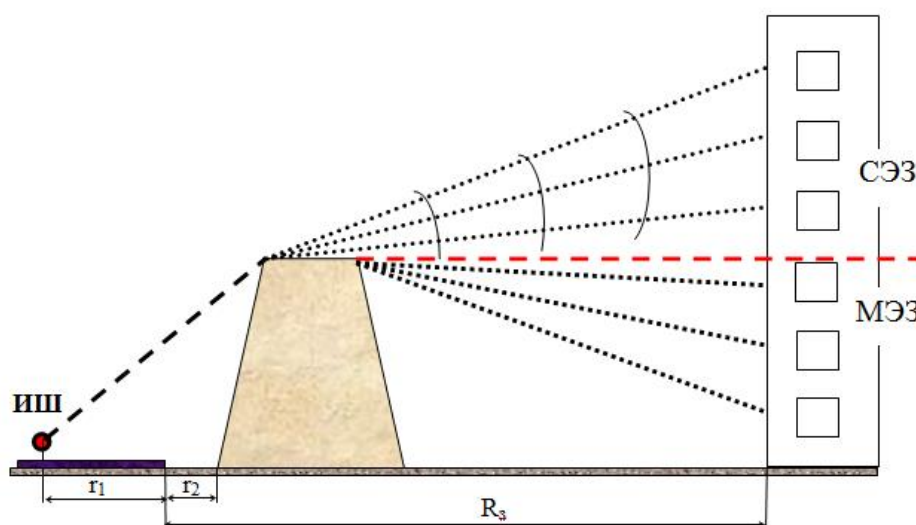


Рисунок 3.3 – МЭЗ и СЭЗ по отношению к высоте ШН

3) значений требуемого снижения шума ( $\Delta L_{\text{треб}}$ ):

- находящиеся в пределах максимальных значения эффективности ШЗК ( $\Delta L_{\text{max}}$ ), когда применима одна ШЗК. В этом случае не требуется решение математической задачи, а оптимальный вариант находится перебором нескольких ВОЗМОЖНЫХ;

– превышающие  $\Delta L_{max}$ . В качестве шумозащиты здесь помимо ШЗК (и зелёных насаждений для СЗЗ) требуемое снижение достигается за счёт применения дополнительные варианты шумозащитных мероприятий (ДМ), в источнике шума и на объекте защиты, либо рассматривается вариант проектирования тоннеля или галереи. В качестве инструмента возможно использование математического моделирования и программирования.

Начинать выбор необходимо с выявления перечня возможных вариантов шумозащиты для рассматриваемой области принятия решения или руководствоваться таблицей 3.16.

Таблица 3.16 – Рекомендуемые варианты ШЗК для защиты от транспортного шума

	Область принятия решения	Рекомендуемые мероприятия			Варианты ШЗК ( $\Delta L_{max}^{ШЗК}$ , дБА)
		ШЗК	ШЗН	ДМ	
1	Малоэтажная застройка за $R'$ (в пределах 50-100 м), требуемое снижение в пределах $\Delta L_{max}$ (МЭЗ, $R_3 \geq R'$ , $\Delta L_{тр} \leq \Delta L_{max}^{ШЗК}$ )	+	(+)	-	ШЭ (20+ $K_\phi$ ), ШН (20+ $K_M$ ), ШВ (20)
2	Малоэтажная застройка за $R'$ (в пределах 50-100 м), требуемое снижение свыше $\Delta L_{max}$ (МЭЗ, $R_3 \geq R'$ , $\Delta L_{тр} \geq \Delta L_{max}^{ШЗК}$ )	+	(+)	(+)	
3	Среднеэтажная застройка за $R'$ (в пределах 50-100 м), требуемое снижение в пределах $\Delta L_{max}$ (СЭЗ, $R_3 \geq R'$ , $\Delta L_{тр} \leq \Delta L_{max}^{ШЗК}$ )	+	(+)	-	ШН (20); ШЭ, ШН-ШЭ, ШВ-ШЭ (20+ $K_\phi$ )
4	Среднеэтажная застройка за $R'$ (в пределах 50-100 м), требуемое снижение свыше $\Delta L_{max}$ (СЭЗ, $R_3 \geq R'$ , $\Delta L_{тр} \geq \Delta L_{max}^{ШЗК}$ )	+	(+)	(+)	
5	Близко расположенная застройка, требуемое снижение в пределах $\Delta L_{max}$ (БРЗ, $R_3 < R'$ , $\Delta L_{тр} \leq \Delta L_{max}^{ШЗК}$ )	+	-	-	ШЭ, ШН, ШН-ШЭ (при малых уклонах ШН)
6	Близко расположенная застройка, требуемое снижение свыше $\Delta L_{max}$ (БРЗ, $R_3 < R'$ , $\Delta L_{тр} \geq \Delta L_{max}^{ШЗК}$ )	+	-	+	

Для защиты малоэтажной застройки (области 1, 2) не целесообразно применение комбинаций экранирующих сооружений (за исключением варианта с уже существующей выемкой, не обеспечивающей требуемое снижение шума). Эффективность каждой ШЗК имеет свою формулу расчета: выемка (2.24 или 2.33), насыпь (2.29 или 2.33), экран (2.31 или 2.34). Высокие насыпи способны конкурировать с прямыми ШЭ (их максимальная эффективность способна превысить 20 дБА).

Для защиты среднеэтажной застройки эффективность всех ШЗК рассчитывается по одной формуле (2.31 или 2.34) с учётом формул таблицы 2.5, высота ШН и ШЭ не превышает высоту РТ, звук дифрагирует через одну верхнюю кромку ШЗК. Защита высоких зданий в ряде случаев возможна только комбинацией ШЗК. Выемка с уклоном склонов 1,5 и более вследствие малой эффективности не входит в число шумозащитных мероприятий данной области как отдельный вариант. Высокие ШЭ и ШН можно рассмотреть в качестве полноценных вариантов шумозащиты.

Этажность не влияет на определение эффективности ШЭ. Для дополнительного повышения его эффективности рекомендуется надстройка на верхнем ребре. При возможности выбора уклона ИЗС выбирается наименьший.

На границе МЭЗ-СЭЗ нужно отслеживать соотношение высот РТ и ШН. Применяя 8-ми метровую насыпь под действием «двойной дифракции» окажутся одно- и двухэтажные здания, 9-10-ти метровую – трёхэтажные.

Также следует иметь в виду, что для защиты от железнодорожного шума областей 1-4 не менее 50% ширины санитарно-защитной зоны должно иметь зеленые насаждения [184].

Близко расположенную застройку (области 5, 6) рекомендуется защищать с помощью шумозащитного экрана. Для высоких этажей и(или) при требуемом снижении шума большем, чем эффективность ШЭ (область 6) дополнительно использовать средства защиты в источнике и (или) объекте защиты, в качестве альтернативы можно рассмотреть вариант возведения тоннеля или галереи.



Применение шумозащитного озеленения и насыпи (в т.ч. с ШЭ) в большинстве случаев будет ограничено расстоянием до застройки.

При использовании ШЗК для защиты среднеэтажной застройки на близком расстоянии к ИШ (области 3-6) функции их эффективности следует проверять на минимум в зависимости от высоты застройки и не использовать выше.

Любой вариант в комплексе трёх и более различных шумозащитных конструкций сравнивается с альтернативным – шумозащитным тоннелем (галереей) [183].

Таким образом, задача оптимизации для областей МЭЗ, СЭЗ будут отличаться набором ШЗК и функцией расчёта  $\Delta L^H$ . Экономические функции останутся неизменными.

### **3.3.2. Задача оптимизации шумозащитного комплекса**

Рассмотрим подробно задачу оптимизации шумозащитного комплекса [173].

Шумозащитный комплекс может содержать следующие шумозащитные мероприятия:

1. шумозащитный экран (ШЭ);
2. насыпь (ШН);
3. выемка (ШВ);
4. лесополоса (ЛП) или шумозащитное озеленение (ШЗ);
5. шлифование рельса (ШР) или вибродемпфирующие накладки (ВДН);
6. шумозащитное остекление (ШО).

Шумозащитные конструкции 1-3 включают типы в зависимости от формы и материала, влияющих на их экономическую и акустическую эффективность. Мероприятия 4-й группы – это либо одна лесопосадка, либо ШЗ, включающее помимо лесопосадки несколько рядов высокой древесной породы. Стоимость и эффективность ЛП зависит от её ширины. Стоимость и эффективность ШЗ дополняются стоимостью главной древесной породы и постоянными 5 дБА (к ЛП шириной от 25 м). Акустическая эффективность мер 5 и 6 – 2 и 10 дБА

соответственно, установлена экспериментально. Для сочетания мер (1-2 или 1-3) эффективность рассчитывается по формуле, включающей высоты и параметры соответствующих шумозащитных сооружений ( $y$ ,  $e$ , поправки). Требуется подобрать шумозащитный комплекс, обеспечивающий необходимую эффективность, при этом имеющий наименьшую стоимость.

Таким образом, в наиболее общем виде математическая модель выглядит следующим образом:

$$\left[ \sum_{k=1}^6 [C_k(x_k)] \rightarrow \right] \min \quad (3.26)$$

При условии:

$$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3) + \Delta L_4(x_4) + \Delta L_{5,6}(x_1, x_2, x_3) \geq \Delta L_{\text{тр}}$$

$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3)$  может быть как функцией только одной переменной –  $\Delta L_{1-3}(x_k)$ , где  $k = 1, 2, 3$ , так и функцией 2-х (реже 3-х) переменных,  $x$  – ключевой параметр ШЗК (высота, ширина).

Возможный вид функций эффективности ( $\Delta L$ ) и стоимости ( $C$ ), при условии, что меры 4-6 не используются, представлен в таблице 3.17. В качестве стоимости будем рассматривать и К и ЧПС.

Таблица 3.17 – Вид функций эффективности и стоимости ШЗК

Функция эффективности	Функция стоимости
$\Delta L_{1-3}(x_1)$	$C_1(x_1)$
$\Delta L_{1-3}(x_2)$	$C_2(x_2)$
$\Delta L_{1-3}(x_3)$	$C_3(x_3)$
$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2)$	$C_1(x_1) + C_2(x_2)$
$\Delta L_{1-3}(x_1, x_3)$	$C_1(x_1) + C_3(x_3)$

Множества значений переменных:

$x_1$  - принимает значения от минимального значения ( $mm_1$ ) до максимального ( $mx_1$ ) с некоторым шагом (т.е., например,  $x_1^i=3$ ;  $x_1^{i+1}=x_1^i+h$ ) т.е. являются дискретными;  
 $x_2$  принимает значения из отрезка  $[mm_2, mx_2]$ ,  $x_3$  - из отрезка  $[mm_3, mx_3]$ ;

$x_4$  и  $x_5$  могут принимать значения 0 или 1 или 2 (0 - в случае, когда эта мера не используется, 1 и 2 соответствуют 2-м различным вариантам);

$x_6$  принимает значения 0 и 1 (0 - в случае, когда эта мера не используется, 1 - когда используется).

Функции эффективности имеют следующий вид:

$$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3) = \min(\Delta L_{1-3}^p(x_1, x_2, x_3); \Delta L_{max}), \quad (3.27)$$

где  $\Delta L_{1-3}^p(x_1, x_2, x_3)$  рассчитывается по формулам, включающим высоту соответствующих шумозащитных сооружений,  $\Delta L_{max}$  в зависимости от области принятия решения принимает значения, приведённые в табл. 3.16.

Эффективности остальных мер (4-6) просто складываются.

В случае изменения ширины ЛП:  $x_4$  примет значения  $[mm_4, mx_4]$ ,

$$\Delta L_4(x_4) = \min(\Delta L_4^p(x_4); \Delta L_{max}),$$

$\Delta L_4^p(x_4)$  определится шириной посадки, максимальная по табл. 3.15.

Предположим, что очерёдность выбора соответствующих шумозащитных мер не устанавливается.

В этом случае, т.к. в реальных расчётах высота насыпи и выемки принимают дискретные значения с некоторым шагом, задачу можно свести к задаче целочисленного программирования, приписав каждому значению высоты шумозащитного сооружения порядковый номер.

Минимальное значение высоты ШЗК принимается за 1, минимальное + шаг – за 2 и т.д. В результате получаем набор целых чисел, каждому из которых соответствует определённая высота ШЗК, при этом, если данная ШЗК не применяется, то соответствующая переменная равна 0.

Задача целочисленного программирования в этом случае записывается следующим образом:

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

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

$0 \leq x_k \leq b_k$ ,  $k$  - целое и меняется от 1 до 6,

$$b_k = \frac{h_k^{max} - h_k^{min}}{t_k} + 1$$

для  $k = 1, 2$  и  $3$ , где  $t_k$  - шаг изменения высоты соответствующей ШЗК,

$$b_4 = 2, b_5 = 2, b_6 = 1$$

То есть при этом каждому натуральному значению первых 3-х переменных соответствует своя высота ШЗК. Например, для ШЭ:

$h_1^1$  = минимальная возможная высота экрана соответствует  $x_1^1 = 1$ ;

для целых  $i$  от 2 до  $b_k h_1^i = h_1^{i-1} + t_1$  соответствует  $x_1^i = i$ ,

$x_2^1 = 3$ ;  $x_1^j = x_1^{j-1} + h_2$

$x_1^1 = 3$ ;  $x_1^i = x_1^{i-1} + h_1$

для насыпи и выемки аналогично.

При этом при вычислении функции эффективности в соответствующие формулы подставляем высоту ШЗК, соответствующую выбранному значению переменной  $x_k$ .

Данная задача является NP-трудной, т.е. решается полным перебором вариантов. Однако учитывая, что оптимизируемая функция является аддитивной, для решения этой задачи может быть применено динамическое программирование, которое разбивает задачу на ряд подзадач, причём найденное решение является оптимальным на данном шаге. Задача является обратной к стандартной задаче поиска максимума функции стоимости, при условии, что вес не превосходит заранее заданного уровня.

Модифицируем алгоритм для рассматриваемой задачи. В качестве начальной точки возьмём максимально возможное расчётное значение эффективности (аналог веса в стандартной задаче). По условию это состояние обеспечивает заданную эффективность, значит множество решений не пусто. (Если данный полный набор не обеспечивает необходимую эффективность, задача решений не имеет). В качестве дальнейших шагов пробуем заменять максимальное значение соответствующей переменной на меньшее, последовательно снижая эффективность до заданного уровня.

Таким образом, состояниями системы будут значения эффективности  $\xi$ :  $\Delta L_{max}, \Delta L_{max} - t_1, \Delta L_{max} - t_2, \dots, \Delta L_{тр}$ , где  $t_j$  – изменения эффективности. Тогда целевая функция  $F_i(\xi)$  – минимальная стоимость мер, обеспечивающих эффективность  $\xi$ , при условии, что для рассматриваемых  $i$  переменных выбраны значения, обеспечивающие эту минимальную эффективность.

Однако, учитывая тот факт, что при решении задач для переменных с четвёртой по шестую не только функция стоимости, но и функция эффективности является аддитивной, алгоритм может быть модернизирован. Начинаем решение задачи именно с этих переменных. Таким образом, разбиваем решение задачи на несколько этапов.

- 1) Рассмотрим переменные с 4 по 6 и решим методом динамического программирования серию задач вида:

$$\left( \sum_{i=0}^2 C_{6-i} \right) \rightarrow \min$$

При  $\Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6) \geq \xi$  для всех возможных значений  $\xi$ . При этом в качестве максимальной эффективности рассмотрим наибольшую возможную суммарную эффективность мер 4-6 и далее будем снижать эффективность в соответствии с тем, какую именно меру мы исключаем из использования или заменяем на другую (шумозащитное озеленение заменяем на лесополосу).

$F_i(\xi)$  – минимум стоимости по всем значениям  $i$  переменных, при которых уровень эффективности остаётся выше  $\xi$ .

Если таких значений нет, то  $F_i(\xi) = F_{i-1}(\xi)$ . При  $\xi = \Delta L_{max}$ , т.е. в начальной точке имеем сумму стоимостей, соответствующих выбору всех мер.  $F_0(\xi) = F_i(\Delta L_{max})$ . Если мы не заменяем никакое значение переменной, т.е.  $i = 0$ , то стоимость тоже остаётся наивысшей.

Таким образом, уравнение Бэллмана в данном случае выглядит следующим образом:

$$F_i(\xi) = \min\{F_{i-1}(\xi - \Delta L_{max}(x_{6-i}, \dots, x_6) + \Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6) - c_{6-i}^{max}(x_{6-i}) + c_i(x_{6-i}))\},$$

при  $\xi \geq \Delta L_{\max}(x_{6-i}, \dots, x_6) - \Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6)$

$F_i(\xi) = F_{i-1}(\xi)$  при  $\xi < \Delta L_{\max}(x_{6-i}, \dots, x_6) - \Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6)$

В результате мы получаем таблицу, элементами которой являются значения  $F_i(\xi)$ , где  $i$  соответствует номеру строки, а номер столбца определяется по  $\xi = \Delta L_{\max} - t_j$ . Таблица заполняется по строкам с учётом соответствующего значения в предыдущей строке. Необходимо также запоминать какой именно набор значений  $i$  переменных обеспечивает стоимость, стоящую в соответствующей клеточке. Решение задачи – это множество наборов значений переменных, соответствующих элементам матрицы  $F_4(\xi)$ , где  $\xi$  – возможное значение эффективности.

2) Рассматриваем оптимальное сочетание мер 4-6 с экраном, учитывая его возможные значения (варианты).

В данном случае задача сводится к отысканию такой минимальной высоты шумозащитного сооружения, которая соответствует неравенствам  $\Delta L_{\text{тр}} - \Delta L_{1-3}(x_1) - \Delta L_{4-6} > 0$ , где в качестве обеспечивающих эффективность  $\Delta L_{4-6}$  рассматриваются возможные оптимальные сочетания мер с 4 по 6.

Таким образом, мы получаем таблицу возможных сочетаний мер 4-6 с экранами, где высота экрана подбирается к каждому эффективному сочетанию мер. Пример таблицы динамического программирования для мер с 4 по 6 будет приведён для конкретной рассматриваемой задачи ниже.

В качестве высоты экрана соответствующего вида берём минимальное значение, эффективность которого удовлетворяет неравенству. Если значение меньше минимального или больше максимально допустимого, то такой вариант не рассматривается. Все получившиеся варианты сочетаний сравниваем по стоимости (К и ЧПС), выбирая оптимальный.

Аналогично решаем задачу для насыпи и выемки.

3) Далее рассматриваем комбинации ШЗК: ШН-ШЭ, ШВ-ШЭ в сочетании с дополнительными мерами 4-6.

Для поиска оптимального сочетания мер решаем серию задач, перебирая возможные значения высоты экрана определённого вида, подбираем высоту насыпи определённого вида, которые вместе с рассматриваемым сочетанием дополнительных мер обеспечивают заданную эффективность. Т.е. для каждой высоты экрана ищем минимальную высоту насыпи так, чтобы эффективность шумозащитного комплекса удовлетворяла неравенству:  $\Delta L_{\text{тр}} - \Delta L_{1-3}(x_1, x_2) - \Delta L_{4-6} < 0$  (ищем первое значение, где разность становится отрицательной) для сочетания насыпь-экран и  $\Delta L_{\text{тр}} - \Delta L_{1-3}(x_1, x_3) - \Delta L_{4-6} < 0$  для сочетания выемка-экран.

Таким образом, получаем сводную Таблицу 3.18

Таблица 3.18 – Матрица вариантов шумозащиты

	Вариант 1	Вариант 2	...
Высота экрана	0/высота экрана	...	
Высота насыпи	0/высота насыпи	...	
Глубина выемки	0/глубина выемки		
Лесополоса или шумозащитное озеленение	0/1/2		
Вибродемпфирующие накладки или шлифовка рельс	0/1/2		
Шумозащитное остекление	0/1		

Заметим, что в данном случае имеет место задача отыскания корней функции одной переменной, т.е. высота насыпи и глубина выемки могут принимать любое, а не только дискретное значение из заданного диапазона.

Таким образом, данная модификация алгоритма позволяет сначала решить задачу целочисленного программирования, а потом применить результаты её решения к отысканию оптимальных сочетаний ШЗК, учитывая, что высота насыпи и глубина выемки принимает непрерывные значения.

Описанный алгоритм касается варианта перебора всех возможных сочетаний различных шумозащитных мер (и ШЗК, и дополнительных мероприятий) с целью нахождения экономически обоснованного. При традиционном подходе, основанном на приоритетном применении ШЗК, в случае, когда требуемое снижение шума достижимо только применением ШЗК, остальные дополнительные

средства вообще не рассматриваются (области 1, 3, 5). Подбирается необходимая минимальная высота для каждого вида ШЗК, обеспечивающая требуемое снижение шума. В случае, когда требуемое снижение превышает максимально возможную эффективность ШЗК (области 2, 4, 6), решение задачи сводится к нахождению высоты, близкой к максимальной, обеспечивающей требуемое снижение в наборе с минимально необходимым оптимальным сочетанием дополнительных мер. Здесь становится актуальным исследование о целесообразности применения лесополосы разных широт, позволяющей получить более широкий диапазон снижения шума для оптимального использования высоты ШЭ.

### **Выводы по главе**

1. Обоснован выбор показателя экономической эффективности шумозащитных мероприятий – чистая приведённая стоимость (ЧПС). ЧПС учитывает как стоимость строительства, так и затраты на протяжении всего жизненного цикла дороги, а также долговечность конструкций, эффекты использования и временную стоимость денег. Каждый элемент затрат формируется на основе смет, элементы которых можно выразить через конструкционные параметры ШЗК. Оптимальным по экономическому критерию является шумозащитный комплекс, имеющий минимальное значение ЧПС. Уменьшение ЧПС возможно за счёт увеличения срока службы конструкции (что актуально для экранов) или получения дополнительных эффектов (например, предотвращенного экологического ущерба).

2. Разработана методика формирования функции экономической эффективности шумозащитных конструкций в зависимости от их основных конструктивных параметров. На основе реальных смет показано формирование функций сметных стоимостей строительства насыпей, выемок, экранов в зависимости от высот конструкций, шумозащитных насаждений в зависимости от ширины и остекления в зависимости от высоты застройки. Приведены основания для формирования затрат на проектирование, ликвидацию, эксплуатацию и



реконструкцию шумозащитных мероприятий по сметам.

3. Предложен модифицированный показатель ЧПС, основанный на расчёте сметной стоимости строительства шумозащитного комплекса (К), затраты на эксплуатацию и реконструкцию конструкций которого выражены через К с использованием коэффициентов эксплуатации и замены. Основываясь на опыте использования и экспертных оценках обоснованы значения указанных показателей, а также долговечность (срок службы) мероприятий.

4. Отмечены технологические и эксплуатационные параметры ШЗК, определяющих выбор шумозащиты. Выделены те из них, которые налагают ограничения на вид модели оптимизации, и те, что могут быть оценены по бально-рейтинговой системе. В зависимости от области принятия решения, определяемой удалением и высотой защищаемой застройки, а также величиной требуемого снижения шума, разработаны рекомендации по выбору средств защиты с учётом их эффективности и технологий возведения.

5. Разработана модель и сформулирована задача оптимизации шумозащитного комплекса по стоимостному критерию с учётом технологических и эксплуатационных показателей. Используются методы динамического программирования, целочисленного программирования, уравнение Бэллмана. Оптимизация начинается с решения методом динамического программирования серии задач на определение оптимальных по чистой приведённой стоимости дополнительных мер защиты или их сочетания (от максимального значения эффективности к минимальному). Далее к каждому эффективному сочетанию дополнительных мер подбирается необходимая минимальная высота ШЗК, обеспечивающая требуемое снижение шума. Для поиска оптимального сочетания мер с применением комбинаций ШЗК (ШН-ШЭ, ШВ-ШЭ) решается серия задач: перебирая возможные значения высоты экрана определённого вида, подбирается высота ИЗС определённого вида, которые вместе с рассматриваемым сочетанием дополнительных мер обеспечивают заданную эффективность. Формируются таблицы результатов (матрица решений). Выбирается оптимальный по стоимости вариант.

## ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА И ОПТИМИЗАЦИИ ШУМОЗАЩИТНОГО КОМПЛЕКСА. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1. Методика выбора и оптимизации шумозащитного комплекса

Предлагаемая методика включает четыре этапа.

Первый этап (предварительный) начинается со сбора данных, включённых в блок «окружение» (раздел 3.2.5), на основании которых:

1. определяется требуемое снижение шума ( $\Delta L_{\text{тр}}$ ),
2. определяются область принятия решения и перечень возможных средств защиты согласно табл. 3.16.
3. выбираются инструменты решения задачи.

Для областей 1-4 уточняется условие высадки ШЗН на ширину не менее половины СЗЗ от железнодорожных путей, что при необходимости наложит ограничение по минимальной ширине посадки на втором этапе.

На втором этапе на основе технологических карт строительства, требований к ШЗК и условий их эксплуатации определяются возможные конструктивные параметры конструкций, их диапазоны и шаг, допустимые к использованию материалы. Для каждого типа ШЗК формируется функция акустической эффективности. Обосновывается эффективность снижения шума в ИШ и РТ ( $\Delta L^{\text{ИШ}}$ ,  $\Delta L^{\text{РТ}}$ ). Параметры функции акустической эффективности ШЗК по областям принятия решения перечислены в табл. 4.1.

На основе анализа смет ШЗК формируются функции стоимости каждого типа ШЗК. Их число может увеличиться на количество материалов ШЭ, имеющего одинаковый  $K_M$  и разную стоимость. Приводится стоимость средств защиты в ИШ и шумозащитного остекления (ШО). Помимо этого, планируется дисконт ( $E$ , % или доли единицы) и задаётся период ЖЦ (лет). Получаются данные для расчёта ЧПС шумозащитных мероприятий:  $t_d$ ,  $k_3$ ,  $k_9$ .

Таблица 4.1 – Параметры ШЗК по областям принятия решения (ОПР)

Область решения задачи защиты от шума	
МЭЗ (1,2)	СЭЗ (3,4)
$\Delta L^p = f(H/h; K_M; K_\phi; K_D)$	
$\Delta L^H = f(H_{min} \cdot H_{max} / h; y; e; K_M; K_D)$ $\Delta L^B = f(H_{min} \cdot H_{max} / h; y; K_M; K_D)$	$\Delta L^H = f(H_{min} \cdot H_{max} / h; K_M; y; K_D)$ $\Delta L^{H^9} = f(H^H_{min} \cdot H^H_{max} / h; H^9_{min} \cdot H^9_{max} / h; K_M; y; K_D)$ $\Delta L^{B^9} = f(H^6_{min} \cdot H^6_{max} / h; H^9_{min} \cdot H^9_{max} / h; K_M; y; K_D)$
$\Delta L^{шзк} = f(b_{шзк min} \cdot b_{шзк max} / s; K_M; K_D)$	

Итогом второго этапа являются функции акустической и экономической эффективности, а также технологические и эксплуатационные ограничения по параметрам ШЗК, определяющие модель оптимизации.

На третьем этапе решается задача оптимизации шумозащитного комплекса по стоимостному критерию по алгоритму [173]:

1. методом динамического программирования оптимизируются по ЧПС дополнительные меры защиты или их сочетания (от максимального значения эффективности к минимальному),
2. оптимизируются однотипные шумозащитные конструкции (например, определяется оптимальный по ЧПС материал ШЭ, площадка ШН), выбирается тип ШЗК для использования в комплексе шумозащиты,
3. к каждому эффективному сочетанию дополнительных мер (ДМ) подбирается необходимая минимальная высота ШЗК, обеспечивающая требуемое снижение шума,
4. для поиска оптимального сочетания мер с применением комбинаций ШЗК (ИЗС-ШЭ, области 3,4) решается серия задач: перебирая возможные значения высоты экрана определённого вида, подбирается высота насыпи (выемки) определённого вида, которые вместе с рассматриваемым сочетанием дополнительных мер обеспечивают заданную эффективность.
5. варианты сочетаний шумозащитных мер проходят экономическую оценку, формируются таблицы результатов (матрица).

Итогом третьего этапа является матрица возможных решений (вариантов шумозащитных комплексов) с указанием мер шумозащиты, характеристик (конструктивных параметров) ШЗК, входящих в его состав, стоимости каждого комплекса (К и ЧПС).

Четвёртый этап – принятие решения. Из вариантов с близкой к минимальной ЧПС с учётом технологических и эксплуатационных характеристик ШЗК, не затронутых ранее, осуществляется выбор шумозащитного комплекса.

Блок схема методики приведена на рисунке 4.1.

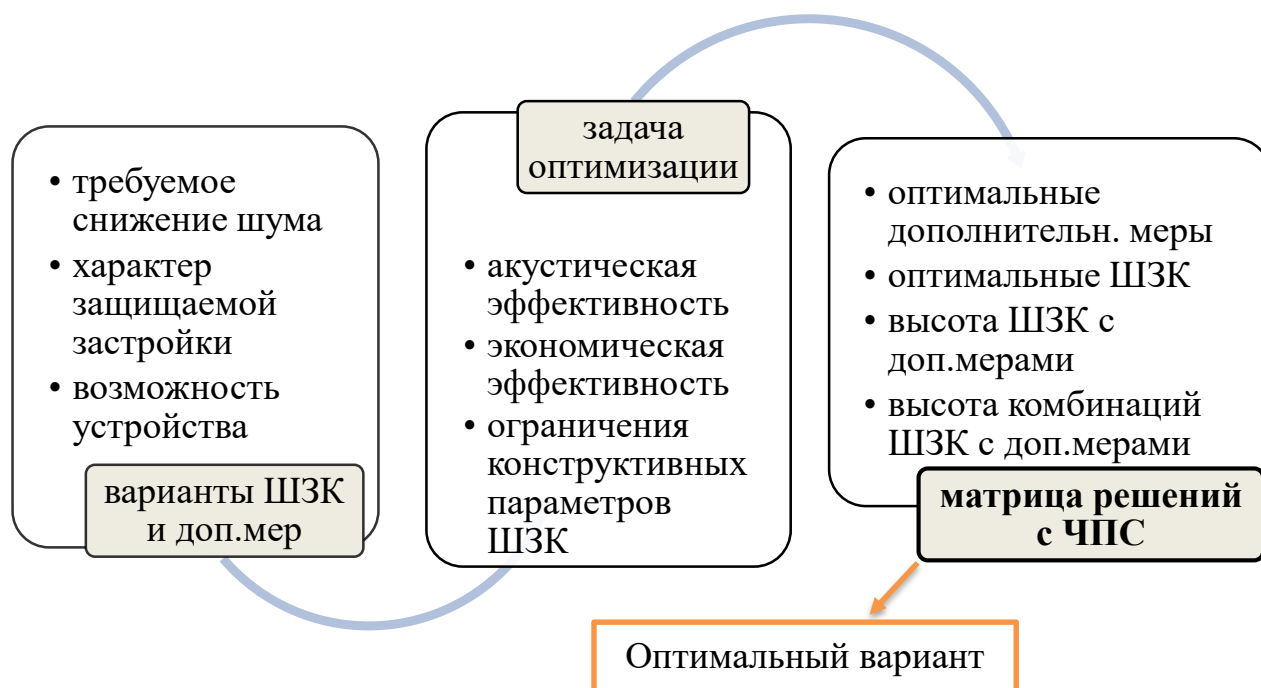


Рисунок 4.1 – Основные этапы выбора шумозащитного комплекса, оптимального по стоимостному критерию

#### 4.1.1. Пример выбора оптимального варианта шумозащитного комплекса

1 этап

ИШ: частота 1000 Гц, высота  $h_{\text{иш}} = 0,5$  м,  $r_1 = 4$  м; РТ:  $R_3 = 60$  м,  $h_{\text{рт}} = 15$  м,  $\Delta L_{\text{тр}} = 24$  дБА, ОПР - 4, методика – (раздел 2.6).

Варианты: ШЗН (при требовании) + ШЗК (ШЭ, ШН, ИЗС+Э) +ВДН+ШО

2 этап

$$r_2 = 4 \text{ м}, r_3 = 1 \text{ м},$$

$$\Delta L^{\text{ШЭ}} = f(H = 3..9, h = 0,5; K_M = 0/3; K_\phi = 0/1,5; K_d = 0),$$

$$\Delta L^{\text{ШН}} = f(H = 3..9, h = 0,1; K_M = 1,5; y = 0,5/1; e = 2; K_d = 0),$$

$$\Delta L^{\text{Н+Э}} = f(H^H = 1,8..6, h = 0,1; H^Э = 2..5, h = 0,5; K_M = 0; K_\phi = 1/1,5; y = 0,5/1; e = 2; K_d = 0),$$

$$\Delta L^{\text{В+Э}} = f(H^B = 1,7..9, h = 0,1; H^Э = 2..7, h = 0,5; K_M = 0; K_\phi = 1/1,5; y = 1/1,5; K_d = 0),$$

$$\Delta L_{\text{max}} = 20 + K_\phi.$$

Параметрические функции эффективности ШЗК:

Эффективность шумозащитных экранов (ШЭ) дБА:

1) Экран прямой поглощающий, ШЭпп

$$\Delta L_{\text{пп}}^Э = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right),$$

Возможный диапазон высот 3..8 м.

2) Экран прямой отражающий, ШЭпо

$$\Delta L_{\text{по}}^Э = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right) - 3,$$

Возможный диапазон высот 3,5..9 м.

3) Экран Г-образный поглощающий, ШЭфп

$$\Delta L_{\text{фп}}^Э = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right) + 1,5,$$

Возможный диапазон высот 3..8 м.

4) Экран Г-образный отражающий, ШЭфо

$$\Delta L_{\text{фо}}^Э = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right) - 1,5,$$

Возможный диапазон высот 3..9 м

Эффективность шумозащитных насыпей (ШН):

5) ШН (0,5;2) с дополнительным укреплением

$$\Delta L_{0,5}^H = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(8 + 0,5 \cdot H)^2 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{(56 - 0,5 \cdot H)^2 + (15 - H)^2} - 65,6) \right) - 1,5,$$

6) ШН (1;2)

$$\Delta L_1^H = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(8+H)^2 + (H-0,5)^2} + \sqrt{(56-H)^2 + (15-H)^2} - 65,6) \right) - 1,5,$$

Эффективность комбинированных ШЗК:

7) ШН(1;2)-ШЭпп

$$\Delta L^{H+Э} = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9+H^H)^2 + (H^H+H^Э-0,5)^2} + \sqrt{(55-H^H)^2 + (15-(H^H+H^Э))^2} - 65,6) \right),$$

8) ШН(1;2)-ШЭфп

$$\Delta L^{H+Э''} = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9+H^H)^2 + (H^H+H^Э-0,5)^2} + \sqrt{(55-H^H)^2 + (15-(H^H+H^Э))^2} - 65,6) \right) + 1,5,$$

9) ШН(0,5;2) с дополнительным укреплением - ШЭпп

$$\Delta L^{H+Э} = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9+0,5 \cdot H^H)^2 + (H^H+H^Э-0,5)^2} + \sqrt{(55-0,5 \cdot H^H)^2 + (15-(H^H+H^Э))^2} - 65,6) \right),$$

10) ШН(0,5;2) с дополнительным укреплением - ШЭфп

$$\Delta L^{H+Э''} = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9+0,5 \cdot H^H)^2 + (H^H+H^Э-0,5)^2} + \sqrt{(55-0,5 \cdot H^H)^2 + (15-(H^H+H^Э))^2} - 65,6) \right) + 1,5,$$

11) ШВ(1,5;17)-ШЭпп

$$\Delta L^{B+Э} = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9+1,5 \cdot H^B)^2 + (H^B+H^Э-0,5)^2} + \sqrt{(55-1,5 \cdot H^B)^2 + (15-H^Э)^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2}) \right),$$

12) ШВ(1,5;15)-ШЭфп

$$\Delta L^{B+Э''} = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9+1,5 \cdot H^B)^2 + (H^B+H^Э-0,5)^2} + \sqrt{(55-1,5 \cdot H^B)^2 + (15-H^Э)^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2}) \right) + 1,5,$$

13) ШВ(1;17) с дополнительным укреплением - ШЭпп

$$\Delta L^{B+Э} = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9+H^B)^2 + (H^B+H^Э-0,5)^2} + \sqrt{(55-H^B)^2 + (15-H^Э)^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2}) \right),$$

14) ШВ(1;15) с дополнительным укреплением - ШЭфп

$$\Delta L^{B+\varepsilon} = 10 \cdot \lg \left( 3 + 58,8 \cdot \left( \sqrt{(9 + H^B)^2 + (H^B + H^\varepsilon - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - H^B)^2 + (15 - H^\varepsilon)^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2} \right) \right) + 1,5.$$

Параметрические функции стоимости ШЗК:

Сметы на строительство ШЗК приведены в Приложениях А и Б, для ИЗС дополненные транспортными расходами (формула 3.12), для ЛП и ШЗ – в таблице 3.5, ВДН, ШО – разделе 3.1.6. ЧПС рассчитывается с использованием коэффициентов (раздел 3.1.5, 3.1.6).

Стоимость ШН (1;2):

$$K_1^{\text{ШН}} = 85,5 \cdot (H^2 + 2 \cdot H) + 31,1 \cdot (2 \cdot \sqrt{2 \cdot H^2} + 2),$$

Стоимость ШН (0,5;2):

$$K_{0,5}^{\text{ШН}} = 85,5 \cdot (0,5 \cdot H^2 + 2 \cdot H) + 31,1 \cdot (2 \cdot \sqrt{H^2 + (0,5 \cdot H)^2} + 2) + K_{\text{п}},$$

(с принятыми в разделе 3.1.2 допущениями  $K_{0,5}^{\text{ШН}} = K_1^{\text{ШН}}$ )

Стоимость ШВ (1,5;15)

$$K_{1,5}^{\text{ШВ}} = 8,3 \cdot (1,5 \cdot H^2 + 15 \cdot H) + 31,9 \cdot (2 \cdot \sqrt{2,5 \cdot H^2} + 17),$$

Стоимость ШВ (1;15)

$$K_1^{\text{ШВ}} = 8,3 \cdot (H^2 + 15 \cdot H) + 31,9 \cdot (2 \cdot \sqrt{2 \cdot H^2} + 17) + K_{\text{п}},$$

(с принятыми в разделе 3.1.2 допущениями  $K_1^{\text{ШВ}} = K_{1,5}^{\text{ШВ}}$ )

Стоимость поглощающих ШЭ:

ШЭ из оцинкованной стали:

$$K_{\text{оц,с}} = \begin{cases} 1490,39 + 1549,23 \cdot H & \text{для } H = 3..5 \text{ м} \\ 1251,41 + 1746,57 \cdot H & \text{для } H = 5,5..7 \text{ м} \\ 4611,06 + 1773,27 \cdot H & \text{для } H = 7,5..9 \text{ м} \\ 4611,06 + 1549,23 \cdot H & \text{для } H = 2..5 \text{ м на ШН} \\ 4611,06 + 1746,57 \cdot H & \text{для } H = 5,5..7 \text{ м на ШН} \end{cases},$$

ШЭ, нержавеющая сталь (стойки и фундамент те же):

$$K_{\text{нс}} = \begin{cases} 1490,39 + 2477,48 \cdot H \text{ для } H = 3,5 \text{ м} \\ 1251,41 + 2674,82 \cdot H \text{ для } H = 5,5 \text{ м} \\ 4611,06 + 2701,52 \cdot H \text{ для } H = 7,5 \text{ м} \\ 4611,06 + 2477,48 \cdot H \text{ для } H = 2,5 \text{ м на ШН} \\ 4611,06 + 2674,82 \cdot H \text{ для } H = 5,5 \text{ м на ШН} \end{cases},$$

ШЭ, импрегнированная древесина со звукопоглощением (стойки и фундамент те же):

$$K_{\text{д}} = \begin{cases} 1490,39 + 1151,41 \cdot H \text{ для } H = 3,5 \text{ м} \\ 1251,41 + 1348,75 \cdot H \text{ для } H = 5,5 \text{ м} \\ 4611,06 + 1375,45 \cdot H \text{ для } H = 7,5 \text{ м} \\ 4611,06 + 1151,41 \cdot H \text{ для } H = 2,5 \text{ м на ШН} \\ 4611,06 + 1348,75 \cdot H \text{ для } H = 5,5 \text{ м на ШН} \end{cases},$$

Стоимость отражающих ШЭ:

ШЭ, прозрачный ПММА, монолитный поликарбонат (стойки и фундамент те же):

$$K_{\text{п}} = \begin{cases} 1490,39 + 2212,26 \cdot H \text{ для } H = 3,5 \text{ м} \\ 1251,41 + 2409,60 \cdot H \text{ для } H = 5,5 \text{ м} \\ 4611,06 + 2436,3 \cdot H \text{ для } H = 7,5 \text{ м} \\ 4611,06 + 2212,26 \cdot H \text{ для } H = 2,5 \text{ м на ШН} \\ 4611,06 + 2409,60 \cdot H \text{ для } H = 5,5 \text{ м на ШН} \end{cases},$$

ШЭ, бетонный (не устанавливается на насыпи):

$$K_{\text{б}} = \begin{cases} 1251,41 + 1018,8 \cdot H \text{ для } H = 3,5 \text{ м} \\ 1251,41 + 1216,14 \cdot H \text{ для } H = 5,5 \text{ м}, \\ 4611,06 + 1242,84 \cdot H \text{ для } H = 7,5 \text{ м} \end{cases}$$

Для определения стоимости ШЭ с козырьком увеличиваем стоимость шумозащитного полотна (включающего стойки и панели на 10%), например, для Г-образного ШЭ из оцинкованной стали:

$$K_{\text{оц.с}} = \begin{cases} 1490,39 + 1549,23 \cdot H \cdot 1,1 \text{ для } H = 3,5 \text{ м} \\ 1251,41 + 1746,57 \cdot H \cdot 1,1 \text{ для } H = 5,5 \text{ м} \\ 4611,06 + 1773,27 \cdot H \cdot 1,1 \text{ для } H = 7,5 \text{ м} \\ 4611,06 + 1549,23 \cdot H \cdot 1,1 \text{ для } H = 2,5 \text{ м на ШН} \\ 4611,06 + 1746,57 \cdot H \cdot 1,1 \text{ для } H = 5,5 \text{ м на ШН} \end{cases},$$

И так для остальных (за исключением бетонного).

Данные для расчёта ЧПС в таблице 4.2. E=2%, период 30 лет.



Таблица 4.2 – Данные для расчёта ЧПС ШЗК

ШЗК	Долговечность, $t_d$ , лет	Коэффициент замены, $k_3$	Коэффициент эксплуатации, $k_9$	$K_{чпс}$
ШЭ, оцинков.сталь	10	0,8	0,018	3,94
ШЭ, нержав.сталь	30	0,1	0,012	1,47
ШЭ, деревянный	20	0,8	0,019	2,76
ШЭ, бетонный	30	0,1	0,007	1,31
ШЭ, прозрачный	15	0,5	0,02	2,6
ШЭ, г-образный	та же	тот же	$\times 1,1$	-
Насыпь	30	0	0,007	1,21
Насыпь (укрепен)	15 (стенка)	1 (0,4)	0,009	
Выемка	30	0	0,008	1,24
Выемка (укрепен)	15 (стенка)	1 (0,6)	0,009	

Эффективность и стоимость дополнительных средств защиты:

Эффективность и стоимость ШЗН:

Рассмотрим два варианта: обязательное и возможное размещение ШЗН на 50% ширины  $R_3$ . ШЗН размещаются перед застройкой.

$$\Delta L^{\text{ШЗН}} = f(b_{\text{лн}} = 30; K_{\text{м}} = 5; K_{\text{д}} = 0)$$

$$\Delta L^{\text{ЛП}} = 0,06 \cdot 30 = 1,8 \text{ (дБА)}, K^{\text{ЛП}} = 75,8 \cdot 30 = 2274 \text{ (у.е.)},$$

$$\Delta L^{\text{ШЗ}} = 0,06 \cdot 30 + 5 = 6,8 \text{ (дБА)}, K^{\text{ШЗ}} = 75,8 \cdot 30 + 3617,2 = 5891,2 \text{ (у.е.)}$$

Эффективность и стоимость шумозащитного остекления:

$$\Delta L^{\text{ШО}} = 10 \text{ дБА}, K^{\text{ШО}} = 533,33 \cdot 15 = 8000 \text{ (у.е.)},$$

вибродемпфирующих накладок:  $\Delta L^{\text{ВДН}}=2 \text{ дБА}, K^{\text{ВДН}} = 2500 \text{ (у.е.)}$

Данные для расчёта ЧПС – в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Эффективность и стоимость дополнительных мер (ДМ)

ДМ	$\Delta L$ , дБА	$K$ , у.е.	$k_9$	$k_3$	$t_d$ , лет	ЧПС, у.е.
ЛП	1,8	2274	0,05	0,05	10	4990,3
ШЗ	6,8	5891,2	0,08	0,1	10	17316,8
ШО	10	8000	0,005	0,5	20	11587,4
ВДН	2	2500	0,06	1	15	9500

3 этап.

3.1 Решением задачи динамического программирования для дополнительных мер в таблице 4.4 получены сочетания их эффективности ( $\Delta L$ ), капитальных вложений (К) и чистой приведённой стоимости (ЧПС).

Таблица 4.4 – Экономическая и акустическая эффективность дополнительных мер

	Мероприятие ( $x_4-x_5-x_6$ )	$\Delta L$ , дБА	К, у.е.	ЧПС, у.е.
1	ШЗ- ШО - ВДН (2-1-1)	18,8	16391,2	38404,2
2	ШЗ-ШО (2-0-1)	16,8	13891,2	28904,2
3	ЛП-ШО-ВДН (1-1-1)	13,8	12774,0	26077,7
4	ШО-ВДН (0-1-1)	12,0	10500,0	21087,4
5	ШО-ЛП (1-0-1)	11,8	10274,0	16577,7
6	ШО (0-0-1)	10,0	8000,0	11587,4
7	<i>ШЗ-ВДН (2-1-0)</i>	8,8	8391,2	26816,8
8	<i>ШЗ (2-0-0)</i>	6,8	5891,2	17316,8
9	<i>ЛП-ВДН (1-1-0)</i>	3,8	4774,0	14990,3
10	ВДН (0-1-0)	2,0	2500,0	9500,0
11	ЛП (1-0-0)	1,8	2274,0	4990,3

Варианты 10 и 11 можно не рассматривать, т.к. ШЗК могут обеспечить не более 21,5 дБА, а требуемое снижение 24 дБА. Мероприятия 7-9 не являются оптимальными по ЧПС, т.к. для достижения требуемой эффективности существуют более дешёвые (6).

В случаях, когда наличие зелёных насаждений является обязательным требованием, необходимо исключить из рассмотрения варианты мероприятий их не содержащие и найти оптимальные сочетания оставшихся мер.

Сравнив таблицы динамического программирования с оптимизацией по ЧПС случаев с обязательным и не обязательным наличием зелёных насаждений, приходим к выводу: при обязательных насаждениях вместо ШЗ+ВДН (7) и ШЗ (8) используем ШО+ЛП (5), т.к. при большей эффективности этот вариант имеет меньшую ЧПС. При отсутствии требований по насаждениям варианты ШЗ+ВДН

(7), ШЗ (8) и ЛП+ВДН (9) не рассматриваются, т.к. ШО (6) при большей эффективности имеет меньшее значение ЧПС.

3.2 Выбор экономически оптимального ШЭ производится по величине его приведённой стоимости. В рассматриваемом примере минимальная ЧПС у деревянного поглощающего и бетонного отражающего экранов, что можно увидеть по данным таблиц 4.5, 4.6.

Таблица 4.5 – Сравнение К и ЧПС поглощающих экранов

Стоимость ШЭ, у.е.	Высота ШЭ, м					
	3	4	5	6	7	8
К оц.сталь	6138,1	7687,3	9236,5	11730,8	13477,4	18797,2
ЧПС оц.сталь	15945,5	19710,2	23994,5	30474,2	35011,5	48831,2
К нерж.сталь	8922,8	11400,3	13877,8	17300,3	19975,2	26223,2
ЧПС нерж.сталь	11945,6	15262,4	18579,2	23161,2	26742,3	35106,9
К дерев.	4944,6	6096,0	7247,4	9343,9	10692,7	15614,7
ЧПС дерев.	9710,7	11972	14233,2	18350,6	20999,5	30665,9

Таблица 4.6 – Сравнение К и ЧПС отражающих экранов

Стоимость ШЭ, у.е.	Высота ШЭ, м					
	4	5	6	7	8	9
К бетон	5326,6	6345,4	8548,3	9764,4	14553,8	15796,6
ЧПС бетон	6557,5	7811,7	10523,6	12020,7	17916,8	19446,8
К прозрачн.	10339,4	12551,7	15709,0	18118,6	24101,5	26537,8
ЧПС прозрачн.	18811,9	22837	28581,5	32965,6	43851,1	48283,8

Аналогично и для Г-образных экранов из тех же материалов.

Для рассмотрения комбинаций ИЗС-ШЭ отражающий ШЭ исключён.

3.3 Рассмотрев все возможные варианты сочетаний ШЗК с оптимальными по стоимости дополнительными мерами, имеем необходимую высоту отдельной конструкции (ШЭ и ШН), а также полную стоимость шумозащитного комплекса с оптимальной по стоимости ШЗК (в нашем случае по материалу ШЭ), представленные в таблицах 4.7 и 4.8. В верхней строке – высота, м, в средней – капитальные вложения, у.е., в нижней – чистая приведённая стоимость, у.е.

Таблица 4.7 – Стоимость шумозащитного комплекса (К и ЧПС) без обязательного ШЗН, у.е.

Дополнительные мероприятия	Высота ШЗК (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)					
	ШЭпп	ШЭпо	ШЭфп	ШЭфо	ШН(0,5;2)	ШН(1;2)
ШО	5	6	4,5	5,5	6,4	7,9
	15247,4	16548,3	15189,9	26480,1	12440,4	14064,4
	25820,6	22111,0	26013,7	41097,2	<b>18242,6</b>	18602,5
ШО-ЛП	4,5	5,5	4	5	5,6	6,7
	16945,7	18214,2	16830,6	23931,8	13658,0	14840,3
	29680,3	26352,7	29733,3	42039,0	21649,6	21859,9
ШО-ВДН	4,5	5,5	4	5	5,5	6,6
	-	-	-	-	13775,1	14940,4
	-	-	-	-	25996,0	26223,9
ЛП-ШО-ВДН	4	4,5	3,5	4	4,8	5,7
	18870,0	18610,0	18697,3	23998,3	15432,1	16268,5
	38049,7	33262,3	37962,6	47002,4	30061,6	30120,1
ШЗ-ШО	3	4	-	3,5	3,8	4,4
	18835,8	19217,8	-	23898,8	15657,6	16172,1
	38614,9	35461,7	-	47560,7	31551,6	31542,7

Получены 25 комплексов шумозащиты, обеспечивающих требуемое снижение шума. Для комплексов, включающих ШО-ВДН-ШЭ не рассчитаны К и ЧПС, т.к. при одинаковой высоте ШЭ комплексы ШО-ЛП-ШЭ имеют более низкую стоимость дополнительных мер. Из табл. 4.7 видно, что оптимальным является шумозащитный комплекс: ШО-ШН(0,5;2) 5,8 м. Возможен вариант ШО-ШН(1;2) 7 м, с землеотводом 16 м против 10,7м, меньшими эксплуатационными затратами по замене подпорной стенки, но большими сложностями по снегопереносу, возможно дренажу и т.п. При предпочтении в качестве ШЗК иметь ШЭ оптимален вариант: ШО-ШЭпо(бетон) 6 м.

Таблица 4.8 – Стоимость шумозащитного комплекса (К и ЧПС) с обязательным ШЗН, у.е.

Дополнительные мероприятия	Высота ШЗК (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)					
	ШЭпп	ШЭпо	ШЭфп	ШЭфо	ШН(0,5;2)	ШН(1;2)
ЛП-ВДН	-	-	7	-	-	-
	-	-	16410,8	-	-	-
	-	-	37839,1	-	-	-

Продолжение таблицы 4.8

ШЗ	6,5	8	5,5	7	7,4	-
	15909,5	20445,0	15302,5	25696,5	12551,7	-
	36991,8	35233,6	36200,2	54238,4	36129,0	-
ЛП-ШО	4,5	5,5	4	5	5,6	6,7
	16945,7	18214,2	16830,6	23931,8	13658,0	14840,3
	29680,3	26352,7	29733,3	42039,0	<b>21649,6</b>	21859,9
ЛП-ШО-ВДН	4	4,5	3,5	4	4,8	5,7
	18870,0	18610,0	18697,3	23998,3	15432,1	16268,5
	38049,7	33262,3	37962,6	47002,4	30061,6	30120,1
ШЗ-ШО	3	4	-	3,5	3,8	4,4
	18835,8	19217,8	-	23898,8	15657,6	16172,1
	38614,9	35461,7	-	47560,7	31551,6	31542,7

Из 23 вариантов шумозащитных комплексов, в приоритете варианты ЛП-ШО-ШН, ЛП-ШО-ШЭпо. С позиций сокращения количества применяемых мер и эстетики приведён в табл. 4.8 рассмотрен вариант шумозащитного комплекса с ШЗ.

Наглядно увидеть полученные высоты ШЗК можно с помощью рисунка 4.2. От проекции точек пересечения на горизонтальную ось двигаемся влево к ближайшему шагу по высоте ШЗК.

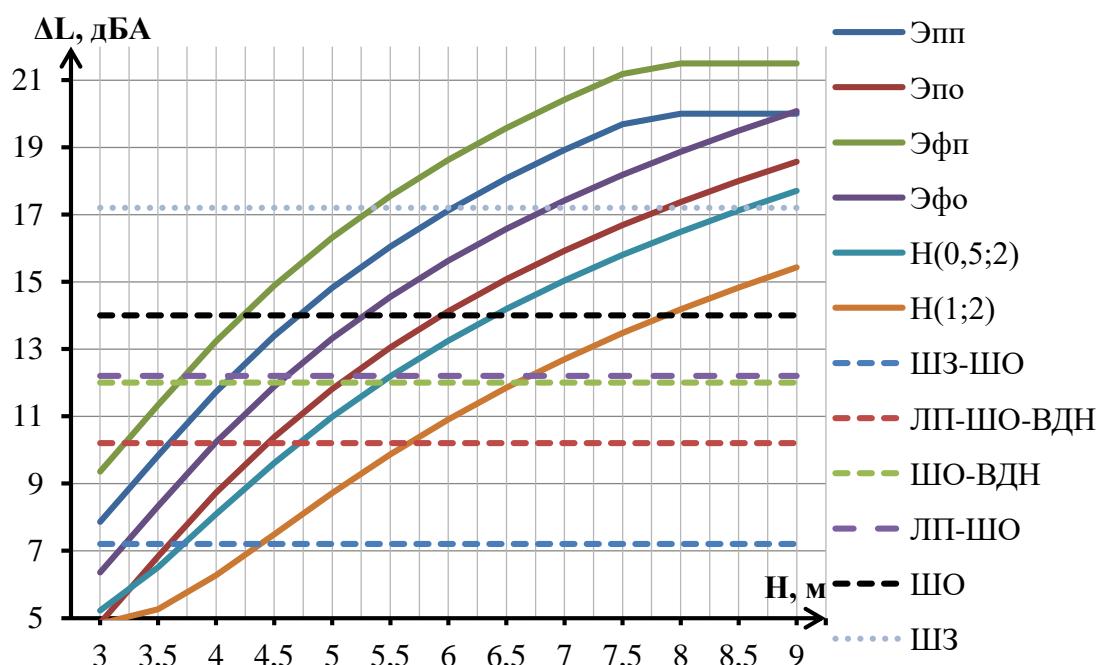


Рисунок 4.2 – Определение высоты ШЗК

3.4 Сочетания комбинаций ШЗК с дополнительными мерами дают представленные в таблицах 4.9-4.12 значения необходимых высот насыпи, выемки

и выбранных типов ШЭ, а также полную стоимость всего комплекса. Высота ШЭ берётся от минимальной до высоты на шаг ниже, полученной на этапе 3.3, выбраны два типа поглощающих экранов: прямой (ШЭпп) и г-образный (ШЭфп).

Таблица 4.9 – Стоимость шумозащитного комплекса (К и ЧПС) без обязательного ШЗН, ШН с ШЭ, у.е.

Доп.мер. и тип ШЭ	Высота ШН и ШЭ (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)							
	ШН(1;2)				ШН(0,5;2)			
<i>ШЭфп</i>	2	2,5	3	3,5	2	2,5	3	3,5
ШО	3,7	3,0	2,2	-	3,0	2,4	1,9	-
	16875,2	16926,2	16996,6	-	16292,9	16493,8	16813,7	-
	25888,7	27119,0	28371,7	-	<b>25765,2</b>	27021,1	28455,4	-
ШО-ЛП	2,9	2,2	-	-	2,4	1,8	-	-
	18490,5	18637,3	-	-	18134,5	22285,6	-	-
	30117,1	31458,1	-	-	30107,5	31455,6	-	-
ШО-ВДН	2,8	2,1	-	-	2,3	-	-	-
	18641,9	18800,6	-	-	17989,6	-	-	-
	34540,4	35895,4	-	-	34518,1	-	-	-
ЛП-ШО-ВДН	2,1	-	-	-	1,8	-	-	-
	20441,4	-	-	-	24152,3	-	-	-
	38981,8	-	-	-	39051,7	-	-	-
<i>ШЭпп</i>	2	2,5	3	3,5	2	2,5	3	3,5
ШО	4,5	3,8	3,0	2,3	3,7	3,1	2,5	1,9
	17412,9	17310,6	17214,0	17291,2	16644,9	16716,4	16849,4	17044,0
	25986,7	26908,8	27837,4	28967,0	<b>25847,6</b>	26798,1	27841,1	28976,2
ШО-ЛП	3,5	2,8	2,1	-	2,9	2,3	-	-
	18744,0	18761,3	18862,5	-	18260,3	18413,8	-	-
	29886,1	31592,5	32104,1	-	29850,8	30924,4	-	-
ШО-ВДН	3,4	2,7	2,0	-	2,8	2,3	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
ЛП-ШО-ВДН	2,6	2	-	-	2,2	-	-	-
	20541,5	20725,8	-	-	20273,8	-	-	-
	38573,6	39827,3	-	-	38621,5	-	-	-

В таблице 4.9 представлен 31 вариант. Чем выше насыпь и ниже экран, тем дешевле конструкция. ЧПС 0,1 м насыпи ниже разницы ЧПС<sub>ВДН</sub>-ЧПС<sub>ЛП</sub>, поэтому ШО-ВДН дороже ШО-ЛП. Оптimalен вариант: ШО-ШН(0,5;2) 3 м-ШЭфп 2 м, допустим вариант ШО-ШН(1;2) 3,7 м-ШЭфп 2 м.

Таблица 4.10 – Стоимость шумозащитного комплекса (К и ЧПС) без обязательного ШЗН, ШВ с ШЭ, у.е.

Доп.мер. и тип ШЭ	Высота ШВ и ШЭ (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)										
	ШВ (1,5;17)						ШВ(1;17)				
<i>ШЭфп</i>	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2	2,5	3,0	3,5	4,0
ШО	-	-	6,3	3,7	1,9	-	5,8	4,6	3,4	2,3	-
	-	-	18496,2	18183,1	18259,7	-	17034,6	9907,5	17451,4	17743,2	-
	-	-	30163,6	30951,4	32199,1	-	<b>27226,2</b>	28400,6	29634,1	30975,4	-
ШО-ЛП	-	5,4	3,3	1,7	-	-	4,4	3,3	2,2	-	-
	-	19790,3	27317,0	19843,6	-	-	18795,5	19059,9	19354,3	-	-
	-	32841,2	33883,8	35218,3	-	-	31371,2	32667,3	34013,1	-	-
ШО-ВДН	-	5,1	3,1	-	-	-	4,2	3,1	2,1	-	-
	-	19905,2	19855,3	-	-	-	18952,2	19222,0	19551,0	-	-
	-	37219,9	38318,2	-	-	-	35766,7	37071,9	38474,5	-	-
ЛП-ШО -ВДН	4,9	3,1	1,7	-	-	-	3,2	2,2	-	-	-
	21473,2	21496,0	21710,3	-	-	-	20894,5	21221,1	-	-	-
	35230,2	41404,6	42814,4	-	-	-	40210,6	41609,2	-	-	-
ШЗ-ШО	2,3	-	-	-	-	-	1,7	-	-	-	-
	21734,5	-	-	-	-	-	21561,0	-	-	-	-
	42037,8	-	-	-	-	-	42294,5	-	-	-	-

Продолжение таблицы 4.10

<i>ШЭпп</i>	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2	2,5	3,0	3,5	4,0
ШО	-	-	-	7,6	4,1	2,0	7,6	6,1	4,8	3,5	2,4
	-	-	-	19262,9	18490,4	18921,8	17535,8	17496,3	17584,3	17714,2	17945,7
				31316,8	31433,5	34137,0	<b>27640,7</b>	28333,8	29236,5	30208,5	31347,8
ШО-ЛП	-	-	5,5	3,3	-	-	5,6	4,3	3,2	2,1	-
	-	-	20115,7	19923,4	-	-	19002,0	19106,1	19315,7	19555,3	-
	-	-	33603,8	34404,6	-	-	31300,4	32229,9	33332,9	34485,6	-
ШО-ВДН	-	-	5,1	3,0	-	-	5,4	4,2	3,0	2	-
	-	-	20193,1	20054,0	-	-	19152,7	19297,6	19478,3	19752,3	-
	-	-	33428,6	38801,8	-	-	35686,0	36682,7	37738,3	38947,5	-
ЛП-ШО -ВДН	7,6	4,7	2,8	-	-	-	4,0	3,0	1,9	-	-
	22309,8	21746,8	21690,0	-	-	-	20927,6	21176,6	21421,7	-	-
	40688,1	41051,8	42012,3	-	-	-	39854,0	41022,3	42184,0	-	-
ШЗ-ШО	3,5	2,0	-	-	-	-	2,4	1,5	-	-	-
	21878,3	21992,0	-	-	-	-	21534,1	-	-	-	-
	41688,5	42850,2	-	-	-	-	41839,2	-	-	-	-

Из 54-х вариантов, в приоритете: ШО - ШВ(1;15) 5,8 м - ШЭфп 2 м.



Таблица 4.11 – Стоимость шумозащитного комплекса (К и ЧПС) с обязательным ШЗН, комбинация ШН с ШЭ, у.е.

Доп.мер. и тип ШЭ	Высота ШН и ШЭ (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)													
	ШН(1;2)							ШН(0,5;2)						
<i>ШЭφп</i>	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
ЛП -ВДН	-	-	-	6	5,3	4,5	3,7	-	6	5,3	4,7	4,1	3,5	2,9
	-	-	-	18052	17828	17584	17449	-	16786	16561	16526	16553	16641	16790
	-	-	-	37399	38311	39200	34301	-	35196	35815	36717	37712	38798	39977
ШЗ	5,6	4,9	5,3	3,4	2,6	1,9	-	4,5	3,9	3,3	2,7	2,1	-	-
	16769	16593	17678	16406	16422	16605	-	-	-	15690	15860	16092	-	-
	33935	34902	37329	37029	38219	39602	-	-	-	35661	36871	38173	-	-
ЛП -ШО	2,9	2,2	-	-	-	-	-	2,4	1,8	-	-	-	-	-
	18491	18637	-	-	-	-	-	18135	18397	-	-	-	-	-
	30117	31458	-	-	-	-	-	<b>30108</b>	31456	-	-	-	-	-
ЛП -ШО -ВДН	2,1	-	-	-	-	-	-	1,8	-	-	-	-	-	-
	20441	-	-	-	-	-	-	20264	-	-	-	-	-	-
	38982	-	-	-	-	-	-	39052	-	-	-	-	-	-
<i>ШЭπп</i>	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
ШЗ	-	-	5,3	4,6	3,8	3,1	2,3	5,4	4,8	4,2	3,6	3,0	2,4	1,8
	-	-	17333	17135	16929	16910	16910	16529	16484	16500	16578	16717	16918	17181
			36144	36955	37757	38776	39815	34219	34908	35690	36564	37530	38588	39738

Продолжение таблицы 4.11

ЛП -ШО	3,5	2,8	2,1	-	-	-	-	2,9	2,3	-	-	-	-	-
	18744	18761	18863	-	-	-	-	18720	18874	-	-	-	-	-
	29886	30947	32104	-	-	-	-	30641	31912	-	-	-	-	-
ЛП -ШО -ВДН	2,6	2	-	-	-	-	-	2,2	-	-	-	-	-	-
	20542	20726	-	-	-	-	-	20734	-	-	-	-	-	-
	38574	39827	-	-	-	-	-	38622	-	-	-	-	-	-

Из 45 вариантов, предпочтительнее ЛП-ШО-ШН(0,5;2) 2,4 м-ШЭФп 2 м.

Таблица 4.12 – Стоимость шумозащитного комплекса (К и ЧПС) с обязательным ШЗН, комбинация ШВ с ШЭ

Доп.м. и тип ШЭ	Высота ШН и ШЭ (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)																		
	ШВ(1,5;17)									ШВ(1;17)									
Эфп	2,0	2,5	3,0	3,5	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
ЛП- ВДН	-	-	-	-	-	-	-	-	5,5	-	-	-	-	-	-	6,8	5,1	3,5	2,1
	-	-	-	-	-	-	-	-	20805	-	-	-	-	-	-	18005	19173	19360	19669
	-	-	-	-	-	-	-	-	50272	-	-	-	-	-	-	40919	45636	47212	48932
ШЗ	-	-	-	-	6,1	3,0	-	-	-	-	8,9	7,1	5,5	4,2	2,9	1,7	-	-	-
	-	-	-	-	18209	17748	-	-	-	-	16869	16713	16712	16877	17084	17361	-	-	-
	-	-	-	-	41512	42126	-	-	-	-	35204	36276	37432	38784	40185	41669	-	-	-
ЛП- ШО	-	5,4	3,3	1,7	-	-	-	-	-	4,4	3,3	2,2	-	-	-	-	-	-	-
	-	19790	19693	19844	-	-	-	-	-	18796	19060	19354	-	-	-	-	-	-	-
	-	<b>32841</b>	33884	35218	-	-	-	-	-	<b>30511</b>	31980	33484	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 4.12

ЛП- ШО- ВДН	4,9	3,1	1,7	-	-	-	5,1	2,0	-	-	-	-	8,5	6,7	5,1	3,6	2,3	-	-
	21473	21496	21710	-	-	-	-	-	-	20895	21221	-	-	-	-	-	-	-	-
	40221	41405	42814	-	-	-	-	-	-	39538	41080	-	-	-	-	-	-	-	-
ШЗ- ШО	2,3	-	-	-	-	-	-	-	-	1,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	21735	-	-	-	-	-	-	-	-	21561	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	42038	-	-	-	-	-	-	-	-	41833	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Эпн</i>	2,0	2,5	3,0	3,5	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
ШЗ	-	-	-	-	-	-	5,1	2,0	-	-	-	-	8,5	6,7	5,1	3,6	2,3	-	-
	-	-	-	-	-	-	19548	19206	-	-	-	-	17550	17354	17311	17365	18620	-	-
	-	-	-	-	-	-	45916	48041	-	-	-	-	39141	39576	40264	41111	45364	-	-
ЛП- ШО	-	-	5,5	3,3	-	-	-	-	-	5,6	4,3	3,2	2,1	-	-	-	-	-	-
	-	-	20116	19923	-	-	-	-	-	19002	19106	19316	19555	-	-	-	-	-	-
	-	-	33604	34405	-	-	-	-	-	31300	32230	33333	34486	-	-	-	-	-	-
ЛП- ШО- ВДН	7,6	4,7	2,8	-	-	-	-	-	-	4,0	3,0	1,9	-	-	-	-	-	-	-
	22310	21747	21690	-	-	-	-	-	-	20928	21177	21422	-	-	-	-	-	-	-
	40688	41052	42012	-	-	-	-	-	-	39854	41022	42184	-	-	-	-	-	-	-
ШЗ- ШО	3,5	2,0	-	-	-	-	-	-	-	2,4	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	21878	21992	-	-	-	-	-	-	-	21534	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	41689	42850	-	-	-	-	-	-	-	41839	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Из 48 вариантов, оптимальный: ЛП-ШО-ШВ(1;17) 4,4 м - ШЭфп 2 м.

Таким образом, полученные следующие результаты (табл. 4.7-4.12).

Без обязательного ШЗН оптимальным является шумозащитный комплекс: ШО-ШН(0,5;2) 5,8 м (18242,6 у.е.) Возможен вариант ШО-ШН(1;2) 7 м (18602,5 у.е.), ШО-ШЭпо(бетон) 6 м (22111,0 у.е.). Т.е. в качестве дополнительного шумозащитного мероприятия целесообразно применение ШО. Однако следует учесть, что невозможно полностью оценить эксплуатационные затраты остекления, они переложены на собственников жилья. Его применение с комбинациями ШЗК выше уже указанных. Так, вариант ШО-ШН(0,5;2) 3 м-ШЭфп 2 м обойдётся в 25765,2 у.е., ШО-ШН(1;2) 3,7 м-ШЭфп 2 м в 25888,7 у.е., а ШО - ШВ(1;17) 5,8 м - ШЭфп 2 м составит 27226,2 у.е. Это является следствием выбора фундамента ШЭ. Также отметим, что вариант с выемкой дорожке для защиты застройки, находящейся с одной стороны от дороги (как в рассматриваемом примере).

Оптимальной дополнительной комбинацией с ШЗН является ЛП-ШО. Шумозащитные комплексы с ШН(0,5;2) 4,9 м или ШН(1;2) 5,9 м обойдутся в 21649,6 и 21859,9 у.е. соответственно, с ШЭпо(бетон) 5,5 м - 26352,7 у.е. С комбинациями ШН(0,5;2) 2,4 м - ШЭфп 2 м (30107,5 у.е.) и ШВ(1;17) 4,4 м - ШЭфп 2 м (30511,0 у.е.) дорожке по указанным выше причинам.

В любом случае, только стоимость высоких насыпей 8-10 м сопоставима со стоимостью ШЭ. Поэтому в рассматриваемом примере насыпь будет экономически эффективна. Однако ШН требует косвенных расходов (по доступу к дороге, стоимости земли для землеотвода и др.).

Существенными косвенными расходами при проложении выемки будет, например, строительство моста, стоимость которого стоит соотнести на единицу длины ШВ ( $K_d$ ).

#### **4.1.2. Оптимальные варианты защиты от транспортного шума**

Отличие оптимизации шумозащиты малоэтажной застройки: в числе ШЗК применяется проложение дороги в выемке. Добиться максимальной

эффективности выемки (20 дБА) невозможно: по расчётам ШВ уклоном 1:1,5 высотой 9 м даёт эффективность 15 дБА, ШВ 1 высотой 15 м снижает шум на 19,5 дБА.

Алгоритм и процесс оптимизации аналогичен. На основе исходных данных формируются функции акустической эффективности, для ШН формула  $\delta^H$  включает  $e$  (табл. 2.5),  $\Delta L_{max}^H = 21,5$  дБА. Однако, расчёты показали: добиться максимальной эффективности насыпи (21,5 дБА) можно при сооружении ШН(1;2) высотой 11,6 м (при высоте 9 м эффективность 19,5 дБА) либо сооружении ШН(0,5;2) высотой 10,3 м.

В качестве ШЗК можно применить комбинации ИЗС с ШЭ, только с целью уменьшения землеотвода. С экономической точки зрения это не эффективно (не рассматривая выкуп земли).

Параметрические функции стоимости (К и ЧПС) не отличаются по областям принятия решения.

На этапе оптимизации ШЗК после выбора типа экрана (табл. 4.5, 4.6) возможно его сравнение с остальными рассматриваемыми конструкциями (кроме комбинаций). Сравним наиболее распространённые ШЗК: ШН(1;2), ШВ (1,5;15) и ШЭпп (импрегн.дерево), ШЭпо(бетон) – табл. 4.13, 4.14, рис. 4.3.

Таблица 4.13 – Стоимость снижения шума ШЗК для МЭЗ ( $h_{рт} = 3$  м)

ШЗК		Стоимость (у.е.) снижения шума (дБА)								
		12	13	14	15	16	17	18	19	20
ШН	Н, м	4	4,4	4,8	5,4	6	6,7	7,6	8,5	9,6
	К	2466	2857	3275	3954	4694	5635	6969	8441	10428
	ЧПС	2853	3305	3789	4574	5430	6518	8062	9764	12063
ШВ	Н, м	5,7	6,6	7,6	9	10,9	14			
	К	2312	2665	3082	3706	4632	6336			
	ЧПС	2726	3143	3634	4370	5462	7550			
ШЭ пп	Н, м	3,0	3,5	4,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
	К	4945	5520	6096	6096	6672	7247	8670	9344	10018
	ЧПС	9711	10841	11972	11972	13103	14233	17026	18351	19675
ШЭ по	Н, м	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0
	К	5327	5836	6345	7940	8548	9156	9764	14554	15797
	ЧПС	6558	7185	7812	9775	10524	11272	12021	17917	19447

Таблица 4.14 – Стоимость снижения шума ШЗК для СЭЗ ( $h_{рт} = 15$  м)

ШЗК		Стоимость (у.е.) снижения шума (дБА)						
		11	12	13	14	15	16	17
ШН	Н, м	6,2	6,7	7,3	8,0	8,7	9,5	10,5
	К	4954	5635	6509	7606	8787	10239	12208
	ЧПС	5731	6519	7529	8798	10164	11844	14122
ШЭ пп	Н, м	4,5	4,5	5	5	5,5	6	6,5
	К	6672	6672	7247	7247	8670	9344	10018
	ЧПС	13103	13103	14233	14233	17026	18351	19675
ШЭ по	Н, м	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
	К	6345	7940	8548	9156	9764	13932	14554
	ЧПС	7812	9775	10524	11272	12021	17152	17917

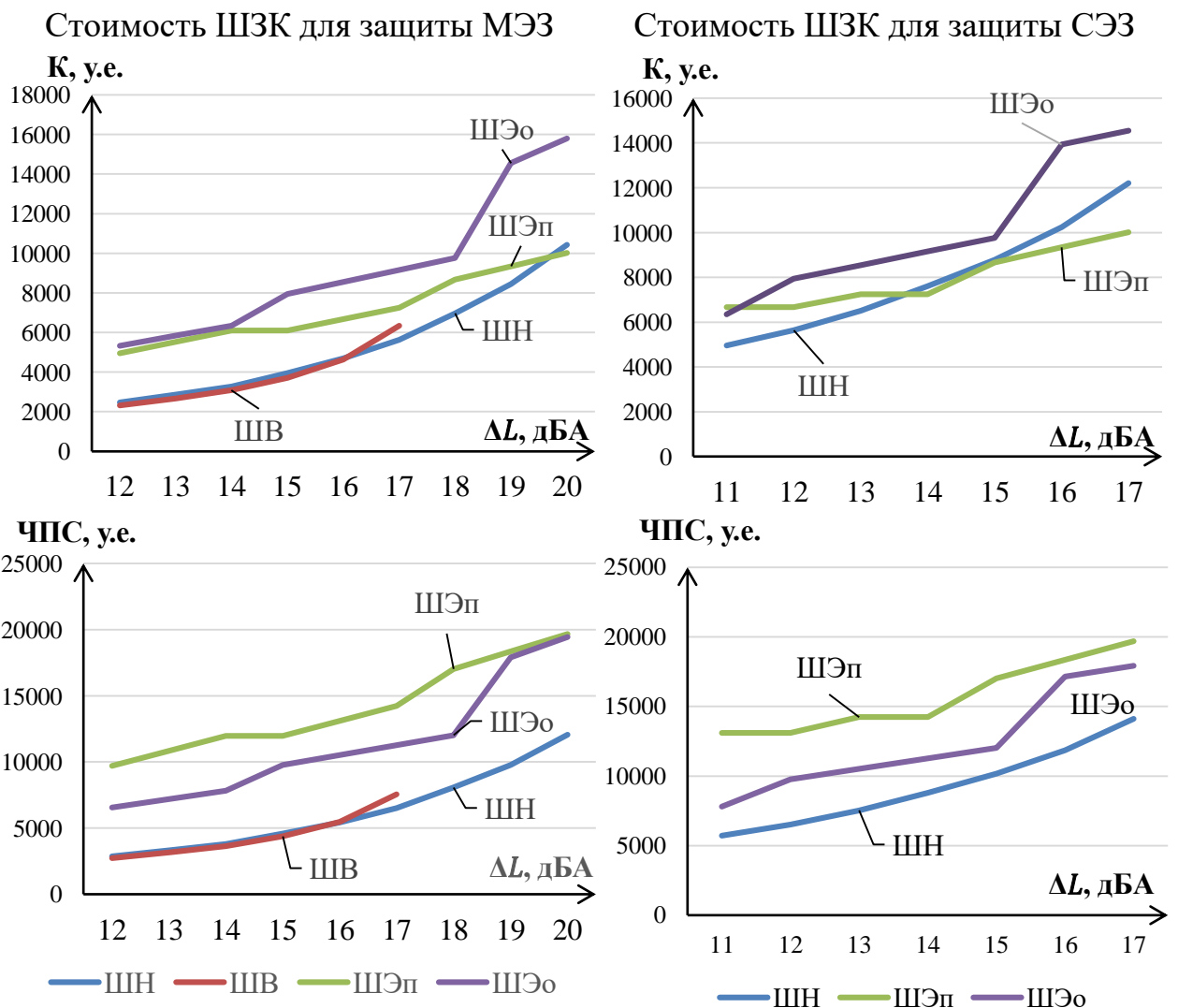


Рисунок 4.3 – Выбор ШЗК при оптимизации шумозащитного комплекса в зависимости от высоты защищаемого объекта

Как видно из рис. 4.3 оптимальными являются ИЗС.

При оптимизации дополнительных мер защиты малоэтажной застройки (МЭЗ) очевидно преимущество шумозащитного остекления (ШО):  $K^{ШО}=1600$  у.е., ЧПС=4586,4 у.е. (табл. 4.4). При этом эффективность более выгодных для среднеэтажной застройки защитных насаждений вызывает сомнение (нужны дополнительные исследования в т.ч. в отношении высоты ШЗН).

Таким образом, для требуемого снижения 20-25 дБА оптимальным составом шумозащитного комплекса МЭЗ будет ИЗС и ШО, 25-30 дБА – ШН-ШО. В случае применения комбинации ШЗК дешевле вариант с более высоким ИЗС. Отказ от насыпи или её максимальная высота (а, значит, и основание) будет диктоваться стоимостью земли для отвода дороги.

В случае защиты территории отдыха, а также когда ШО не достаточно для снижения шума до требуемого значения, рассмотрим снижение в ИШ и посадку зелёных насаждений. Допустим при этом, что эффективность ШЗН и ШЗК суммируется. Согласно формулам (1.18) и (1.19) и разделу 3.2.4 на втором этапе оптимизации задаются ограничения на ширину посадки, в т.ч. при совместном использовании с ИЗС:

$$\Delta L^{ШЗН} = f(b_{лп\min} \cdot b_{лп\max} / s; K_M; K_D).$$

При шаге по ширине лесопосадке ( $s$ ) 5 м, матрица вариантов дополнительных мероприятий существенно расширяется (табл. 4.15).

Таблица 4.15 – Экономическая и акустическая эффективность дополнительных мер защиты

Дополнительные меры		$\Delta L$ , дБА, К и ЧПС, у.е., при ширине ЛП $b_{лп}$ , м								
		0	25	30	35	40	45	50	55	60
Без шумозащитного остекления										
ШЗ-ИШ	$\Delta L$	-	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10	10,3	10,6
	К	-	8012	8391	8770	9149	9528	9907	10286	10665
	ЧПС	-	22514	23346	24177	25009	25841	26673	27504	28336
ШЗ	$\Delta L$	-	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	8	8,3	8,6
	К	-	5512	5891	6270	6649	7028	7407	7786	8165
	ЧПС	-	14797	15629	16460	17292	18124	18956	19787	20619

Продолжение таблицы 4.15

ИШ	ΔL	2	3,5	3,8	4,1	4,4	4,7	5	5,3	5,6
	К	2500	4395	4774	5153	5532	5911	6290	6669	7048
	ЧПС	7717	11876	12707	13539	14371	15202	16034	16866	17698
ЛП	ΔL	-	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3	3,6
	К	-	1895	2274	2653	3032	3411	3790	4169	4548
	ЧПС	-	4159	4990	5822	6654	7485	8317	9149	9981
С шумозащитным остеклением										
ШЗ- ШО- ИШ	ΔL	-	18,5	18,8	19,1	19,4	19,7	20	20,3	20,6
	К	-	9612	9991	10370	10749	11128	11507	11886	12265
	ЧПС	-	27100	27932	28764	29596	30427	31259	32091	32922
ШЗ- ШО	ΔL	-	16,5	16,8	17,1	17,4	17,7	18	18,3	18,6
	К	-	7112	7491	7870	8249	8628	9007	9386	9765
	ЧПС	-	19383	20215	21047	21879	22710	23542	24374	25205
ШО- ИШ	ΔL	12	13,5	13,8	14,1	14,4	14,7	15	15,3	15,6
	К	4100	5995	6374	6753	7132	7511	7890	8269	8648
	ЧПС	1230 3	16462	17294	18125	18957	19789	20621	21452	22284
ШО	ΔL	10	11,5	11,8	12,1	12,4	12,7	13	13,3	13,6
	К	1600	3495	3874	4253	4632	5011	5390	5769	6148
	ЧПС	4586	5759	6590	7422	8254	9085	9917	10749	11581

Без ШО дополнительные 1,5-3,6 дБА эффективнее снизить ЛП (25-60 м); 3,8-4,4 дБА – комбинацией ЛП (30-40 м)-ИШ; с 4,5 дБА сразу перейти на более выгодное снижение в 6,5 дБА за счёт ШЗ и так до 8,6 дБА; 8,8-10,6 дБА – ШЗ-ИШ. Так получается 26 вариантов дополнительных мер (1,5-10,6 дБА), под каждое из которых подбирается оптимальная высота ШЗК.

С учётом ШО целесообразно сразу применить ШО (10-13,6 дБА) с низкими ШЗК, ШО-ИШ (13,8-14,4 дБА), ШЗ-ШО (16,5-18,6 дБА), ШЗ-ШО-ИШ (18,8-20,6 дБА). Всего 27 вариантов.

Более точная поправка на отражающе-поглощающие свойства материала ШЭ также увеличит количество вариантов ШЗК.

Причём для разного диапазона требуемого снижения получится разная комбинация.



На рисунке 4.4 приведены варианты шумозащиты для малоэтажной (МЭЗ) и среднеэтажной застройки (СЭЗ) в зависимости от требуемого снижения шума (эффективности мер) в комбинации оптимальных ШЗК с ШО. На кривых ЧПС подписаны высоты ШЗК.

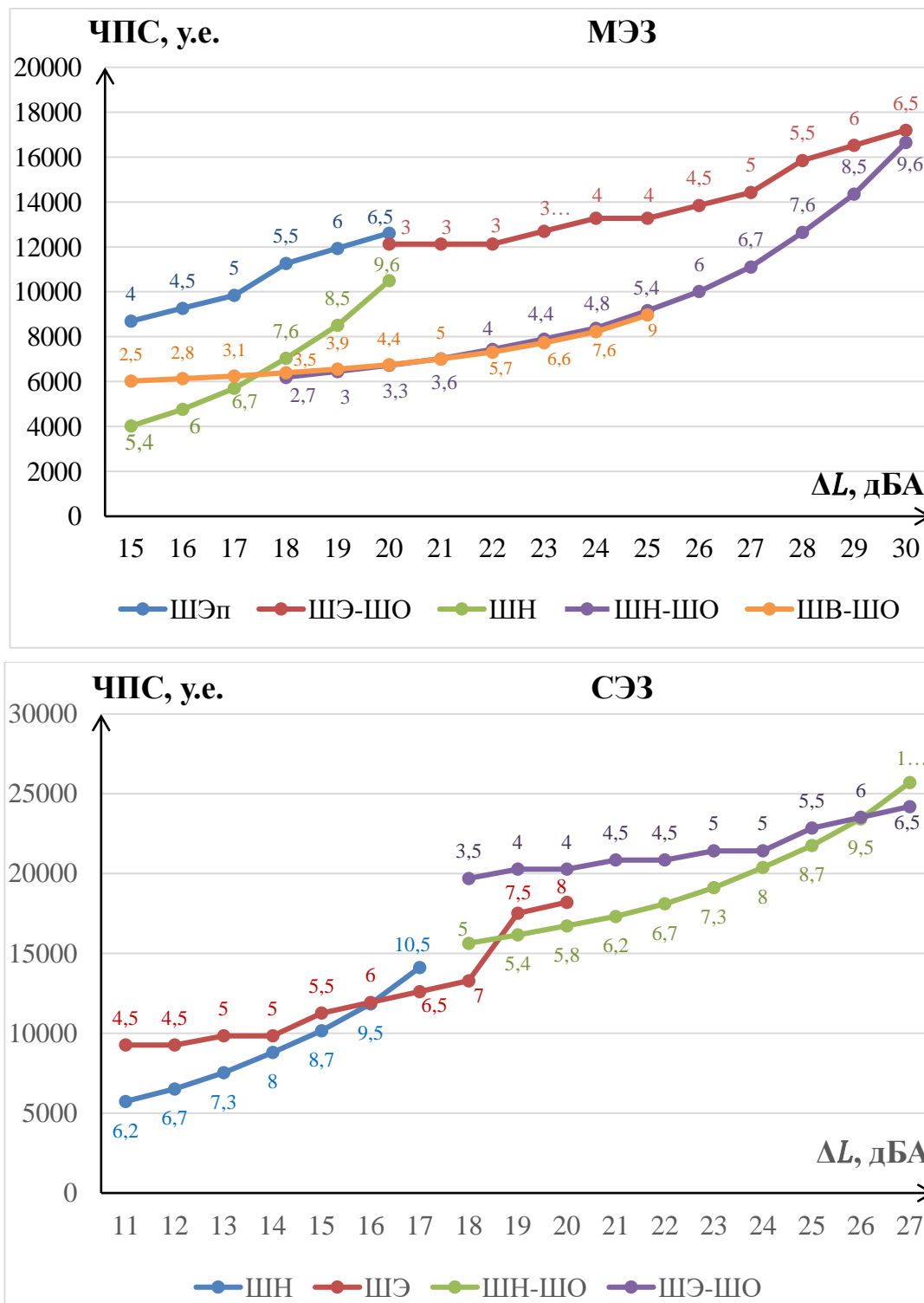


Рисунок 4.4 – Выбор шумозащитного комплекса в зависимости от требуемого снижения шума и высоты защищаемого объекта

В таблице 4.16 приведены оптимальные варианты шумозащитных мер в зависимости от требуемого снижения шума (долговечность ШЭ не превышает ЖЦ).

Таблица 4.16 – Оптимальные варианты защиты от транспортного шума

Область принятия решения		Оптимальный вариант	
1	МЭЗ ( $R_3 = 50-100$ м)	$\Delta L_{\text{тр}} = 12..15$ дБА	ШВ для застройки с обеих сторон дороги, ШВ или ШН – с одной
		$\Delta L_{\text{тр}} = 15..17$ дБА	ШН
		$\Delta L_{\text{тр}} = 17,5..25$ дБА	ШН-ШО, ШВ-ШО
2	МЭЗ ( $R_3 = 50-100$ м)	$\Delta L_{\text{тр}} = 25..30$ дБА	ШН-ШО
		$\Delta L_{\text{тр}} = 30$ дБА	ШН-ШО, ШЭ-ШО
3	СЭЗ ( $R_3 = 50-100$ м)	$\Delta L_{\text{тр}} = 11..14$ дБА	ШН
		$\Delta L_{\text{тр}} = 14..16$ дБА	ШН, ШЭ
		$\Delta L_{\text{тр}} = 16..18$ дБА	ШЭ
		$\Delta L_{\text{тр}} = 18,5..20$ дБА	ШН-ШО
4	СЭЗ ( $R_3 = 50-100$ м)	$\Delta L_{\text{тр}} = 20..24$ дБА	ШН-ШО
		$\Delta L_{\text{тр}} = 24..26$ дБА	ШН-ШО, ШЭ-ШО
		$\Delta L_{\text{тр}} = 26..28$ дБА	ШЭ-ШО

Если для МЭЗ снижение высоты ШЗК за счёт применения ШО может оказаться выгоднее, то для ВЭЗ из-за большей площади остекления дешевле увеличить высоту ШЗК. Выемка при совместном применении с ШО (дающие снижение до 25 дБА) – самый эффективный способ защиты МЭЗ, находящейся с двух сторон от дороги.

#### **4.2. Методика выбора варианта решения проблемы повышенного уровня шума на территории окружающей застройки различных категорий населенных пунктов (сельские, городские), а также в зоне ведения садоводства, прилегающих к объектам транспорта**

Шумозащитные мероприятия предусматриваются при наличии на городских и сельских территориях, а также на территориях садоводств,

прилегающих к объектам железнодорожного транспорта, превышений над допустимыми уровнями шума, установленными СанПиН 1.2.3685-21 [43].

Применяемые для защиты от шума железнодорожного транспорта мероприятия и их эффективность (с учётом различных конструктивных и технологических изменений) приведены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Оценочная эффективность мероприятий по защите от шума железнодорожного транспорта

№ п/п	Наименование мероприятия	Оценочная эффективность шумозащитного мероприятия
1	Устройство шумозащитных экранов (ШЭ) (при обеспечении требуемой высоты и протяженности)	до 19 дБА
2	Шумозащитное остекление (ШО)	до 10 дБА (на нормируемой территории) и до нормативных значений (внутри нормируемых помещений)
3	Устройство земляных (грунтовых) валов (ШН) или устройство шумозащитных выемок (ШВ) (при обеспечении требуемой протяженности)	до 5 дБА (при высоте конструкции до 2 м над головкой рельса) и до 15 дБА (при высоте конструкции до 5 м над головкой рельса)
4	Размещение протяженных зданий и сооружений, входящих в инфраструктуру железной дороги, на пути распространения шума вдоль железной дороги (ПЗ)	до 25 дБА
5	Ограничение скорости движения железнодорожного транспорта при прохождении жилой застройки (ОС)	до 3 дБА
6	Устройство шумозащитных зелёных насаждений (при обеспечении требуемой протяженности) (ШЗН)	до 5 дБА
7	Устройство шумозащитных галерей (ШГ) (при обеспечении требуемой протяженности)	до 30 дБА
8	Устройство накладок на шейку рельса (ВДН)	до 3 дБА
9	Малые шумозащитные экраны (МШЭ)	до 5 дБА

Продолжение таблицы 4.17

10	Подбалластные маты (ПМ)	до 2дБА
11	Бесстыковый путь (БП)	до 2дБА
12	Шлифование рельсов (ШР)	до 2 дБА
13	Трассирование железной дороги на удалении от нормируемых объектов (защита расстоянием, ЗР)	до 3 дБА при каждом удвоении расстояния (от 3 дБА при расстоянии до 25 метров до 15 дБА при расстоянии 400 метров)

Требования к шумозащитным мероприятиям, предусматриваемым на железных дорогах, представлены в [24, 27, 32, 33, 181] и других документах, которые регламентируют, в том числе, следующие параметры шумозащитных конструкций:

- уровень снижения железнодорожного шума, проникающего на нормируемую территорию;
- механическую прочность и устойчивость шумозащитных конструкций в условиях эксплуатации;
- конфигурацию шумозащитных конструкций с учетом ограничений, связанных с параметрами полосы отвода железной дороги;
- мероприятия по обеспечению пожаробезопасности;
- бесперебойную работу системы водоотвода с железной дороги с учётом обеспечения акустической эффективности шумозащитного сооружения;
- обеспечение безопасности движения при размещении шумозащитных сооружений вдоль железнодорожных путей и, при необходимости, обеспечение беспрепятственного доступа для оказания помощи и эвакуации при происшествиях;
- обеспечение долговечности с учётом агрессивности среды эксплуатации;
- способность шумозащитных конструкций препятствовать снегозаносимости железнодорожных путей;

- транспортабельность, простоту при их возведении, монтаже и эксплуатации, удобство в обслуживании, ремонтпригодность и быструю замену повреждённых в ходе эксплуатации элементов;

- архитектурное решение, эстетически благоприятный вид, удачное сочетание с ландшафтом.

#### **4.2.1. Алгоритм выбора различных вариантов шумозащиты**

Рекомендуемый алгоритм выбора оптимальной шумозащитной конструкции выглядит следующим образом [185]:

- на основании акустических расчётов определяется требуемый уровень снижения шума (необходимая акустическая эффективность) шумозащитных мероприятий и производится выбор типа и параметров мероприятий. На предпроектной стадии допускается производить выбор шумозащитных мероприятий без детальных расчётов, опираясь на оценочную эффективность, представленную в таблице 4.17;

- на этапе разработки проектной документации на основании результатов инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий, а также анализа данных о строении и конструктивных параметрах элементов железнодорожного пути выполняется обоснование возможности устройства выбранных шумозащитных конструкций и детальный расчет параметров шумозащитных мероприятий;

- выбранные конструкции рекомендуется оценить в соответствии с критериями, представленными в разделе 4.2.2, для обоснования оптимальных шумозащитных свойств (экологических показателей), обеспечивающих нормируемые уровни шума в расчётных точках, и экономических показателей.

При расчёте шумозащитных мероприятий рекомендуется делать упор на выбор той шумозащитной конструкции, которая самостоятельно способна обеспечить необходимый уровень шума; при отсутствии возможности добиться необходимых норм с применением одной конструкции

рекомендуется рассматривать варианты комплексного решения для совокупности нескольких шумозащитных конструкций.

На стадии проектирования новой железной дороги рекомендуется разрабатывать комплекс шумозащитных мероприятий, предусматривая, в первую очередь, снижение шума в источнике, далее – снижение шума на пути распространения, и, наконец, снижение шума в защищаемом объекте.

Если в соответствии с акустическими расчётами предполагается устройство шумозащитной галереи (эффективность мероприятий должна быть более 25 дБА), то в таком случае рекомендуется сначала рассчитать комплексное решение шумозащитных конструкций (например, устройство шумозащитного экрана и шумозащитного остекления). Если для достижения санитарных норм расчётом предусматривается устройство в комплексе более трёх различных шумозащитных конструкций, в таком случае применение шумозащитной галереи неизбежно.

При выборе определённой шумозащитной конструкции оценивают:

- необходимое значение акустической эффективности рассматриваемого шумозащитного сооружения конструкции с учётом всех учтённых пассивных мероприятий;

- принципиальную возможность устройства той или иной конструкции в имеющихся условиях;

- оптимальность устройства по заданным критериям оценки.

Выбор варианта решения проблемы повышенного уровня шума на прилегающих к железнодорожным путям территориях необходимо осуществлять с учётом рекомендаций, представленных в таблице 4.18 [185].

Таблица 4.18 – Мероприятия, обеспечивающие требуемое снижение шума

№	Область принятия решения	Рекомендуемые мероприятия								
		ШЗН	ЗГВ	ШВ	ШЭ	ШГ	ШО	НШР	МШЭ	ОС
1	Малоэтажная городская застройка	+	+	+	+	-	+	+	+	+

Продолжение таблицы 4.18

2	Садоводческие товарищества, малые жилые массивы (менее 10 защищаемых объектов)	+	+	+	+	-	-	-	+	+
3	Среднеэтажная застройка	+	+	-	+	+	+	+	±	+
5	Близко расположенная застройка (до 50м)	-	+	+	+	+	+	+	±	+

В таблице 4.18 не рассматриваются конструкции, требующие капитального ремонта пути, например, подбалластные маты, применение бесстыкового пути и устройство путей с различным основанием (бетонные шпалы, деревянные шпалы, железобетонные плиты).

Аналогично приводятся рекомендации выбора мероприятий на вновь строящихся объектах, реконструируемых или подлежащих капремонту.

#### 4.2.2. Критерии выбора различных вариантов шумозащиты

Критерии оценки для выбора различных шумозащитных конструкций приведены в таблице 4.19. Они основаны на оценке возможности выполнения шумозащитными конструкциями предъявляемых к ним требований. В зависимости от значения критерия каждой шумозащитной конструкции рекомендуется присваивать определённое количество баллов от 1 до 5. Для определения оптимальности устройства каждой шумозащитной конструкции баллы суммируются, оптимальной рекомендуется считать ту конструкция, которая имеет наибольшее число баллов [185].

Таблица 4.19 – Матрица выбора различных шумозащитных конструкций

Критерий (требование)	ШЗК и количество баллов по шкале оптимальности								
	ШЗН	ШН	ШВ	ШЭ	ШГ	ШО	ВДН	МШЭ	ОС
Максимальная акустическая эффективность, дБА	< 5	< 15	< 15	< 19	> 30	< 10 (+30 в помещении)	< 4	< 5	< 5
	1	2	2	3	4	5	1	1	5
Конструктивная ширина видимой части, влияющая на ширину полосы отвода	>10 м	>5 м	<0,5 м	<1 м	>12 м	н.п.	н.п.	<1 м	-
	2	3	5	4	1	0	0	4	5
Обеспечение снегопереноса или отсутствие снегоотложений	+	-	-	-	+	н.п.	н.п.	-	-
	5	1	1	1	5	0	0	1	0
Отсутствие влияния на безопасность движения	+	+	+	+	±	+	+	±	±
	5	5	5	5	3	5	4	3	4
Отсутствие необходимости устройства дополнительных элементов водоотведения	+	-	+	-	-	+	+	-	-
	5	1	5	1	1	5	5	1	5
Удобство обслуживания и эксплуатации	+	±	±	±	±	+	±	±	+
	5	3	3	3	3	5	2	2	5
Возможность обеспечения конструктивной прочности на весь период службы	±	+	+	+	+	+	±	+	+
	3	5	5	5	5	5	3	5	3
Простота конструкции	±	±	-	±	-	+	±	±	+
	3	3	1	3	1	5	2	3	5
Доступность и стоимость	±	+	+	+	±	+	±	+	+
	3	5	5	5	3	5	3	5	5



Критерий (требование)	ШЗК и количество баллов по шкале оптимальности								
	ШЗН	ШН	ШВ	ШЭ	ШГ	ШО	ВДН	МШЭ	ОС
Возможность выполнения конструктивных мер для обеспечения обслуживания и эксплуатации элементов и сооружений пути	+	±	+	+	±	н.п.	±	±	+
	5	3	5	5	3	0	3	3	5
Способность противостоять агрессивности среды эксплуатации	±	+	+	+	+	+	+	+	+
	3	5	5	5	5	5	5	5	5
Выполнение требований пожарной безопасности конструкции	-	+	+	+	±	+	+	+	+
	1	5	5	5	3	5	5	5	5
Транспортабельность, ремонтпригодность и удобство монтажа	-	-	-	+	±	+	±	±	+
	1	1	1	5	3	5	3	4	3
Эстетичный вид готовой конструкции	+	+	±	+	+	+	+	+	+
	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Шкала оптимальности (общее количество баллов)	47	47	53	55	45	55	44	47	5

Примечание – Критерии назначения максимального и минимального балла по шкале оптимальности

0 – конструкция по данному критерию не характеризуется (н.п. – не применяется);

1 – конструкция заданному критерию полностью не соответствует;

2 – конструкция заданному критерию соответствует в малой степени;

3 – конструкция заданному критерию частично не соответствует;

4 – конструкция заданному критерию соответствует не в полной мере;

5 – конструкция заданному критерию полностью соответствует.

Критерий оценки шумозащитных конструкций по экономическому показателю – чистая приведённая стоимость, её составляющие подробно рассмотрены в разделах 3.1.

При этом отдельным этапом осуществляется выбор шумозащитного экрана, как мероприятия, обладающего широким перечнем разновидностей и предъявляемых требований. Выбор материала экрана по стоимостному критерию возможен согласно таблицам 3.3 и 3.4. На основе данных таблиц можно делать выборку по применяемости материалов с отношением цены и срока службы. Дальнейший выбор ШЭ может быть осуществлен при помощи матрицы его характеристик, приведенной в таблице 4.20. Предпочтение следует отдавать тем типам экранов, у которых выше итоговый индекс по результатам анализа.

Как и при оптимизации шумозащитного комплекса (раздел 4.1) оптимальными оказались ШЭ, ШВ, ШН и ШО. При этом первая методика более конкретна в отношении диапазонов снижения шума.

### **4.3. Апробация результатов исследований**

Результаты, полученные при разработке данной диссертации, послужили базой для научно-исследовательской работы «Разработка «Методических указаний по выбору шумозащитных мероприятий при выявлении сверхнормативного акустического воздействия от объектов железнодорожного транспорта» по заказу ОАО «РЖД».

Методика выбора шумозащитного комплекса по стоимостному критерию использована в ООО «ТранспроектИнжиниринг» для выполнения акустических расчётов при проектировании объектов транспортной инфраструктуры.

На основе разработанной методики реализован выбор шумозащитного комплекса и установлены оптимальные средства защиты в зависимости от высоты застройки и требуемого снижения шума.

Таблица 4.20 – Матрица выбора типа ШЭ по результатам анализа выгод и затрат в течение жизненного цикла

Характеристики	Тип шумозащитного экрана									
	Деревянные многослойные	Композитные на основе бетона	Полимерные композиционные	Прозрачные (ПММА, поликарбонат)	Многослойные из конструкционной стали	Многослойные из нержавеющей	Многослойные из алюминия	Сплавов	Комбинированные	Бетонные
Индекс звукоизоляции, дБ	Указывается соответствие требованиям ГОСТ 33329: соответствует 1 балл, не соответствует 0 баллов									
Коэффициент звукопоглощения	Указывается соответствие требованиям ГОСТ 33329: соответствует 1 балл, не соответствует 0 баллов									
Толщина стенок панели, мм	Указывается численное значение согласно СТУ									
Толщина покрытия оцинковки, мм	Указывается численное значение согласно СТУ									
Горючесть	Указывается соответствие требованиям ГОСТ 33329: соответствует 1 балл, не соответствует 0 баллов									
Прочность	Указывается соответствие требованиям ГОСТ 33329: соответствует 1 балл, не соответствует 0 баллов									
Наличие удерживающих элементов	Наличие страховочных тросиков: да – 1 балл, нет – 0 баллов									
Обеспечение жесткости конструкции	Наличие элементов жесткости в конструкции: да – 1 балл, нет – 0 баллов									
Область применения	Наличие сертификата соответствия ГОСТ 33328 и ГОСТ 33329: да 1 балл, нет 0									
Жизненный цикл, лет	Указывается срок службы до замены (допускается использовать сведения табл. 3.17)									
Технология установки	Ручная – 10 баллов, с применением спецтехники – 0 баллов									
Стоимость за м <sup>2</sup> , тыс.руб.	Указывается стоимость со знаком минус (допускается согласно таблице 3.3)									
Затраты при эксплуатации	Указывается % замены за срок замены согласно таблице 3.4 со знаком минус									
Итоговый индекс	Приводится итоговый индекс, рассчитанный суммированием значений пп. 1-13									

Методы и методики, разработанные в диссертации, используются в качестве методических материалов по дисциплинам «Разработка шумовиброзащитных мероприятий», «Основы виброакустики», «Экологическая экспертиза» и «Экономика и менеджмент безопасности», реализуемых на кафедре «Экология и производственная безопасность» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова по направлениям 20.03.01 и 20.04.01 «Техносферная безопасность».

### **Выводы по главе**

1. Разработана методика выбора шумозащитного комплекса, оптимального по экономическому критерию. Представлен алгоритм, позволяющий проектировщику выбрать оптимальный вариант шумозащиты. На первом этапе определяются возможные варианты шумозащиты. На втором формируются функции акустической и экономической 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: сначала оптимизируются дополнительные меры защиты и ШЗК одного вида, затем формируется матрица шумозащитных комплексов (каждое эффективное сочетание дополнительных мер с необходимой минимальной высотой ШЗК или их комбинаций) с чистой приведённой стоимостью (ЧПС) полученных комплексов. На четвёртом этапе выбирается оптимальный вариант. Дан пример расчётов по представленной методике.

2. Реализован выбор и оптимизация шумозащитного комплекса. Для застройки на удалении 50-100 м от дороги установлены оптимальные средства защиты в зависимости от высоты строений 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. При этом высота экрана в случаях альтернативных насыпи окажется ниже.

3. Разработана методика выбора варианта решения проблемы повышенного уровня шума на территории окружающей застройки различных категорий населенных пунктов (сельские, городские), а также в зоне ведения садоводства, прилегающих к объектам транспорта. Она основана на бальной оценке шумозащитных мероприятий по широкому перечню параметров, представлен алгоритм выбора оптимального. Отдельно промежуточным этапом осуществляется выбор ШЭ по более высокому итоговому индексу, суммирующему критерии, являющиеся в т.ч. результатом анализа выгод и затрат в течение жизненного цикла. Дан пример выбора шумозащитного мероприятия по методике.

4. Сравнение результатов, полученных по обеим методикам, показало, что оптимальным является комплекс, содержащий в своём составе шумозащитные конструкции и шумозащитное остекление защищаемых домов. При этом методика на основе оптимизации более конкретна и решает задачу выбора оптимальной шумозащитной конструкции в составе шумозащитного комплекса в зависимости от удаления и высоты защищаемой застройки, по диапазонам требуемого снижения, с нахождением параметров ШЗК (главным из которых является высота), определением капитальных вложений в её сооружение и стоимости в течение жизненного цикла дороги.

5. По результатам выполненных исследований разработаны Методические указания по выбору шумозащитных мероприятий при выявлении сверхнормативного акустического воздействия от объектов железнодорожного транспорта (по заказу ОАО «РЖД»), а также выполнены акустические расчёты при проектировании объектов транспортной инфраструктуры ООО «ТранспроектИнжиниринг». Результаты работы использованы в материалах ряда дисциплин по направлениям 20.03.01 и 20.04.01 «Техносферная безопасность».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании и реконструкции автомобильных и железных дорог необходимо соблюдать 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): выемки, насыпи 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 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 натуральных 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 автодороги (25 м от 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 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  $\pm 3$  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. 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 минимальная 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 эффективность. Рассчитывается ЧПС и формируются таблицы результатов (матрица решений). Выбирается оптимальный по стоимости вариант. Используются методы динамического программирования, целочисленного программирования, уравнение Беллмана.

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 N 2638/р), а также выполнены акустические расчёты при проектировании объектов транспортной инфраструктуры ООО «ТранспроектИнжиниринг». Результаты работы использованы в материалах ряда дисциплин по направлениям 20.03.01 и 20.04.01 «Техносферная безопасность».

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- а/д – автомобильная дорога  
БП - бесстыковой путь  
ВДН - вибродемпфирующая накладка на шейку рельса  
ГДП – главная древесная порода  
ДМ – дифракционный метод (оптико-дифракционный)  
ж/д – железная дорога  
ЗП - земляное полотно (ж/д)  
ИЗС – искусственное земляное сооружение  
ИШ – источник шума  
ЛП – лесопосадка  
МПЗП – метод преобразования звуковых полей  
МЭЗ – малоэтажная застройка  
НТД – нормативно-техническая документация (документ)  
ОДМ – отраслевой дорожный документ  
ПМ - подбалластные маты  
ПЧ – проезжая часть (а/д)  
РТ – расчетная точка  
СДП – сопутствующая древесная порода  
СП – свод правил  
СЭЗ – среднеэтажная застройка  
ШВ – шумозащитная выемка  
ШЗК - шумозащитная конструкция  
ШЗН – шумозащитные зелёные насаждения  
ШЗ – шумозащитное озеленение  
ШН – шумозащитная насыпь  
ШР – шлифование поверхности рельса  
ШЭ – шумозащитный экран  
УЗД – уровень звукового давления  
УЗ – уровень звука

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. МР 2.1.10.0059-12. Методические рекомендации. Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума : утвержден Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации и введен 23.03.2011. – Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 40 с.
2. Медведева, Я. В. Транспортные шумы, их негативное воздействие на человека / Я. В. Медведева, А. В. Морина, О. В. Медведева // Новая экономика - новое общество. – 2010. – № 5. – С. 185-191.
3. Васильев, А. В. Шум как фактор экологического риска в условиях урбанизированных территорий / А. В. Васильев // Noise Theory and Practice. – 2015. – Т. 1, № 2(2). – С. 27-40.
4. Lercher, P. Environmental noise and health: an integrated research perspective / P. Lercher // Environment International. – 1996. – Vol. 22, No. 1. – P. 117-129.
5. Impact of Noise Exposure on Risk of Developing Stress-Related Metabolic Effects: A Systematic Review and Meta-Analysis / D. Michaud, K. Sivakumaran, J. Ritonja [et al.] // Noise and Health. – 2022. – Vol. 24, No. 115. – P. 215. – DOI 10.4103/nah.nah\_21\_22.
6. Environmental noise exposure and health outcomes: an umbrella review of systematic reviews and meta-analysis / X. Chen, M. Liu, L. Zuo [et al.] // European Journal of Public Health. – 2023. – Vol. 33, No. 4. – P. 725-731. – DOI 10.1093/eurpub/ckad044.
7. Burden of disease due to traffic noise in Germany / M. Tobollik, D. Plass, M. Hintzsche [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2019. – Vol. 16, No. 13. – P. 2304. – DOI 10.3390/ijerph16132304.
8. Васильев, А. В. Акустическая экология города : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 280200 - "Защита окружающей среды" (специальность 28020265 - "Инженерная защита окружающей среды") / А. В. Васильев ; Федеральное агентство по образованию,

Тольяттинский государственный университет. – Тольятти : Тольяттинский государственный университет, 2007. – 159 с. – ISBN 5-8259-0334-8.

9. Терентьева, Л. С. Геоэкологическая оценка акустического загрязнения примагистральных территорий (на примере г. Воронежа) : специальность 25.00.36 "Геоэкология (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук / Терентьева Любовь Сергеевна. – Воронеж, 2008. – 152 с.

10. Васильева, В. В. Оценка воздействия автотранспортных потоков на акустическую среду городской территории : специальность 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Васильева Виктория Владимировна. – Орел, 2008. – 141 с.

11. Аистов, В. В. Оценка влияния шума железнодорожных поездов на жилые 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.

12. Иванов, Н.И. Защита от шума и вибрации : учебное пособие по направлению "Техносферная безопасность" / Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин. – Санкт-Петербург : Печатный цех, 2019. — 282 с.

13. Карагодина, Инна Львовна. Борьба с шумом в городах / И. Л. Карагодина, Г. Л. Осипов, И. А. Шишкин. — Москва : Медицина, 1972. — 159 с.

14. 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.

15. Pignier, N. The impact of traffic noise on economy and environment: a short literature study. – Stockholm : TRITA-AVE, 2015. – 16 с. – ISBN 978-91-7595-615-2.

16. Борцова, С. С. Стоимостная оценка шумозащитной конструкции / С. С. Борцова // Noise Theory and Practice. – 2022. – Т. 8, № 1(28). – С. 61-71.

17. Assessment of the External Cost (Damage Cost) of Traffic Noise / К. К. Kang, J.

W. Kim, K. M. Kim, Y. M. Park // Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. – 2022. – Vol. 32, No. 1. – P. 74-88. – DOI 10.5050/ksnve.2022.32.1.074.

18. Минаина, Н. Н. Проблема снижения акустического воздействия на жилую застройку при проектировании, строительстве и функционировании транспортных сооружений : специальность 01.04.06 "Акустика" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Минаина Наталия Николаевна. – Санкт-Петербург, 2012. – 350 с.

19. Шашурин, А. Е. Новые технические и технологические решения для снижения акустического загрязнения шумозащитными экранами / А. Е. Шашурин ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Балтийский государственный технический университет «Военмех». – Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2018. – 134 с. – ISBN 978-5-907054-27-1.

20. Шашурин, А. Е. Научное обоснование и применение новых технических и технологических решений для снижения акустического загрязнения основными типами шумозащитных экранов : специальность 01.04.06 "Акустика" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шашурин Александр Евгеньевич, 2018. – 420 с.

21. Тюрина, Н. В. Решение проблемы снижения шума на селитебных территориях и рабочих местах в помещениях акустическими экранами : специальность 01.04.06 "Акустика" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Тюрина Наталья Васильевна, 2015. – 321 с.

22. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : Учебник / Н. И. Иванов. – Москва : Логос, 2016. – 432 с. – ISBN 978-5-98704-659-3.

23. Иванов, Н. И. Основы виброакустики : учебник для вузов / Н. И. Иванов, А. С. Никифоров. – Санкт-Петербург : Издательство "Политехника", 2000. – 482 с. – ISBN 5-7325-0599-7.

24. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996). Межгосударственный стандарт.

Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета. – Москва : Стандартинформ, 2006. - 19 с.

25. ГОСТ 33325-2015 Шум. Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом (с Поправкой, с Изменением N1) : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 18 июня 2015 г. N 47 : введен 01.03.2016. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124230> (дата обращения: 25.06.2024).

26. ГОСТ 33328-2015 Экраны акустические для железнодорожного транспорта. Методы контроля. – Москва : Стандартинформ, 2019. - 12 с.

27. ГОСТ 33329-2015 Экраны акустические для железнодорожного транспорта. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2016. - 15 с.

28. СП 338.1325800.2018. Свод правил. Защита от шума для высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 5 февраля 2018 г. № 69/пр и введен 6 августа 2018 г. – Текст : электронный. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/557350548> (дата обращения 25.06.2024)

29. СП 441.1325800.2019. Свод правил. Защита зданий от вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом. Правила проектирования : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 22 января 2019 г. № 23/пр и введен 23 июля 2019 г. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/554818817> (дата обращения 25.06.2024)

30. ГОСТ Р 53187-2008 Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий. – Москва : Стандартинформ, 2012. - 15 с.

31. ГОСТ 51943-2003 Экраны акустические для защиты от шума транспорта. Методы экспериментальной оценки эффективности. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2019. - 12 с.

32. СП 51.13330.2011. Свод правил. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. – Москва : Минрегион России, 2011. – 41 с.

33. СП 276.1325800.2016. Свод правил. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков. – Москва : Минстрой России, 2016. – 146 с.
34. ГОСТ 32957-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Экраны акустические. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2016. - 12 с.
35. ГОСТ 32958-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Экраны акустические. Методы контроля. – Москва : Стандартинформ, 2016. - 12 с.
36. СТО АВТОДОР 2.09.2014. Стандарт организации. Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации акустических экранов на автомобильных дорогах Государственной компании АВТОДОР : введён 16.10.2020. – Москва: АВТОДОР, 2014. – 81с.
37. ОДМ 218.2.013-2011. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам. – Москва : - Информавтодор, 2011. – 123 с.
38. ОДМ 218.8.011-2018. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по определению характеристик и выбору шумозащитных конструкций автомобильных дорог. – Москва : РОСАВТОДОР, 2020. – 83 с.
39. ОДМ. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке необходимого снижения звука у населенных пунктов и определению требуемой акустической эффективности экранов с учетом звукопоглощения : утверждено распоряжением Минтранса России № ОС-362-р от 21.04.2003 г. – Москва : - ГП «Информавтодор», 2003. – 95 с.
40. ОДМ 218.011-98 Методические рекомендаций по озеленению автомобильных дорог : утверждено приказом Федеральной дорожной службы Российской Федерации от 05.11.1998 № 421. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006888> (дата обращения 25.06.2024)
41. Буторина, М. В. Разработка научных и методических основ картирования шума транспорта на территории городской застройки : специальность 01.04.06

"Акустика" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Буторина Марина Вадимовна, 2021. – 431 с.

42. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. Санитарные правила и нормы : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.21 № 3 : введены в действие 01.03.21. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573536177> (дата обращения: 25.06.2024).

43. СанПиН 1.2.3685-21. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Санитарные правила и нормы : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.21 № 2 : введены в действие 01.03.21. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 25.06.2024).

44. Балишанская, Л. Г. Техническая акустика транспортных машин : справочник / Л. Г. Балишанская, Л. Ф. Дроздова, Н. И. Иванов ; Под ред. Н. И. Иванова. – Санкт-Петербург : Издательство "Политехника", 1992. – 365 с. – ISBN 5-7325-0090-1.

45. Пospelов, П. И. Прогнозирование и расчет транспортного шума и средств защиты при проектировании автомобильных дорог : специальность 05.23.11 "Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пospelов Павел Иванович. – Москва, 2003. – 392 с.

46. Васильев, В. А. Шум автомобильного транспорта / В. А. Васильев, В. К. Ксенофонтова // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6, № 1(19). – С. 66-76.

47. Классификация автомобильных дорог по уровням шума / М. В. Буторина, Н. В. Тюрина, Н. И. Иванов, В. А. Санников // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6,



№ 4(22). – С. 22-32.

48. Вклад структурного шума при оценке шумовых характеристик автотранспортных магистралей / И. К. Пименов, А. Д. Кузнецова, С. Б. Марков, Н. А. Дементьев // Защита от повышенного шума и вибрации : Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19–21 марта 2019 года / Под ред. Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью "Институт акустических конструкций", 2019. – С. 552-562.

49. Градостроительные меры борьбы с шумом / Г. Л. Осипов, Б. Г. Прутков, И. А. Шишкин, И. Л. Карагодина. - Москва : Стройиздат, 1975. - 215 с.

50. Прутков, Борис Георгиевич. Методы и пути снижения городского шума : (Обзор). - Москва : ЦНТИ по гражд. стр-ву и архитектуре, 1974. - 40 с.

51. Городецкая, Н. Н. Защита от шума в градостроительстве / Н. Н. Городецкая, Л. Н. Першинова ; ФГБОУ ВПО Уральский государственный архитектурно-художественный университет. – 2-е издание. – Екатеринбург : Архитектон, 2014. – 79 с. – ISBN 978-5-7408-0195-7.

52. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Г. Л. Осипов, Е. Я. Юдин, Г. Хюбнер и др. ; под ред. Г. Л. Осипова, Е. Я. Юдина. - Москва : Стройиздат, 1987. - 557 с.

53. Хасс, Р. Р. Метод расчета шума от потоков железнодорожного транспорта : специальность 01.04.06 "Акустика" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хасс Регина Робертовна. – Москва, 2013. – 23 с.

54. Куклин, Д. А. Проблема снижения внешнего шума поездов в источнике и на пути распространения : специальность 01.04.06 "Акустика" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Куклин Денис Александрович, 2016. – 434 с.

55. Буторина, М. В. Классификация железнодорожных линии по уровням шума и шумозащитные мероприятия / М. В. Буторина, Д. А. Куклин // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 9. – С. 26-29.

56. Кудяев, А. В. Анализ уровней звука и звукового давления от моторвагонного железнодорожного подвижного состава / А. В. Кудяев, Д. А. Куклин, П. В. Матвеев // *Noise Theory and Practice*. – 2017. – Т. 3, № 1(7). – С. 9-15.
57. High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment : Guidance Manual / C. Hanson, J. Ross, D. Towers ; U.S. Department of Transportation. – Washington : ANSI Std., 2012. – 248 с. – Текст : электронный. – URL: <https://railroads.dot.gov/elibrary/high-speed-ground-transportation-noise-and-vibration-impact-assessment> (дата обращения: 25.06.2024).
58. Смоляр, Н. И. Исследование эффективности снижения шумового загрязнения городской среды транспортными потоками : специальность 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Смоляр Николай Иванович. – Москва, 1982. – 164 с.
59. Васильев, А. В. Исследование уровня акустического излучения системы "шины автотранспортного средства - дорожное покрытие" / А. В. Васильев, Е. А. Комлик // *Noise Theory and Practice*. – 2016. – Т. 2, № 3(5). – С. 38-44.
60. Васильев, А. В. Методика расчета и экспериментальное исследование шума системы "шины автотранспортного средства – дорожное покрытие" / А. В. Васильев, Е. А. Комлик // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2012. – Т. 14, № 1-3. – С. 849-851.
61. Свалова, К. В. Анализ научных исследований в области шумопоглощающих дорожных покрытий в России и за рубежом / К. В. Свалова // *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов : XXI Международная научно-практическая конференция*. В 3 ч., Чита, 29 ноября – 03 2021 года. Том Ч. 1. – Чита: Забайкальский государственный университет, 2021.
62. Гайлитис, Д. И. Шумопоглощающие дорожные покрытия / Д. И. Гайлитис, В. З. Рузиев, А. А. Гончаров // *Инновации в строительстве : Материалы международной научно-практической конференции (к 90-летию БГИТУ)*, Брянск, 05–07 декабря 2019 года / Редколлегия: И.Н. Серпик [и др.]. – Брянск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

"Брянский государственный инженерно-технологический университет", 2019. – С. 267-270.

63. Socio-economical impact of noise mitigation through rubber modified porous asphalt surfacing / Ja. Mikolaj, M. Decky, L. Remek, L. Pepucha // 14th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014 : Conference Proceedings, Albena, 17–26 июня 2014 года. Vol. 3. – Sofia: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2014. – P. 358-392. – DOI 10.5593/SGEM2014/B53/S21.051.

64. Muirhead, M. Costing the benefit of low noise surfacing / M. Muirhead // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 265, No. 2. – P. 5007-5012. – DOI 10.3397/in\_2022\_0724.

65. Исследование процессов шумообразования при движении высокоскоростных поездов / Ю. С. Бойко, А. Е. Шашурин, J. Cardona, M. Albaladejo // Noise Theory and Practice. – 2015. – Т. 1, № 2(2). – С. 84-89.

66. Бойко, Ю. С. Расчет и снижение шума высокоскоростных поездов на селитебной территории : специальность 01.04.06 "Акустика" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бойко Юлия Сергеевна, 2017. – 210 с.

67. Матвеев, П. В. Расчет и снижение шума качения поездов : специальность 01.04.06 "Акустика" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Матвеев Петр Владимирович, 2015. – 174 с.

68. Бельков, В. М. Демпфирование горизонтальных, поперечных колебаний пути / В. М. Бельков // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2019. – Т. 78, № 6. – С. 372-382. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-6-372-382.

69. Подуст, С. Ф. Моделирование виброакустической динамики рельса на шпалах / С. Ф. Подуст, Д. А. Куклин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2013. – Т. 13, № 1-2(70-71). – С. 106-111.

70. Снижение шума и вибрации железнодорожных магистралей / Н. И. Иванов, М. В. Буторина, Д. А. Куклин [и др.] // 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. 235-240.

71. Снижение шума подвижного состава железнодорожного транспорта в источнике образования и на пути распространения / Н. И. Иванов, Д. А. Куклин, П. В. Матвеев, А. Ю. Олейников // Защита от повышенного шума и вибрации : Сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 18–20 марта 2015 года / под редакцией Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью "Айсинг", 2015. – С. 125-144.

72. Буторина, М. В. Снижение виброакустического воздействия высокоскоростных поездов / М. В. Буторина, П. В. Иванов, А. В. Петряев // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 7. – С. 15-19.

73. Савин, А. В. Ресурсные испытания безбалластных конструкций пути / А. В. Савин // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 7. – С. 49-52.

74. 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. – EDN GFUHIZ.

75. Maekawa, Z. Environmental and Architectural Acoustics / Z. Maekawa, J. Rindel, P. Lord. – New York : Spon Press, 2011. – 360 p. – ISBN 13:978-0-415-44900-7.

76. Шубин, И. Л. Акустический расчет и проектирование конструкций шумозащитных экранов : специальность 05.23.01 "Строительные конструкции, здания и сооружения" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шубин Игорь Любимович. – Москва, 2011. – 331 с.

77. Семенов, Н. Г. Снижение шума в жилой застройке акустическими экранами : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Семенов Николай Геннадьевич, 2013. – 201 с.

78. Иванов, Н. И. Расчет акустической эффективности экранов для снижения шума в жилой застройке / Н. И. Иванов, Н. Г. Семенов, Н. В. Тюрина // Защита от

повышенного шума и вибрации : Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 26–28 марта 2013 года / Под редакцией Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2013. – С. 366-371.

79. Иванов, Н. И. Влияние материала на акустическую эффективность шумозащитных экранов / Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин, Ю. С. Бойко // *Noise Theory and Practice*. – 2016. – Т. 2, № 4(6). – С. 24-28.

80. Герасимов, А. И. Потери акустической энергии при прохождении звуковой волны через пористо-волоконный материал / А. И. Герасимов, М. Д. Васильев, А. М. Светлоруссова // *Noise Theory and Practice*. – 2019. – Т. 5, № 4(18). – С. 46-52.

81. Sound shielding efficiency of a noise barrier with soft surface and soft round obstacle at the edge / К. Fujiwara, Т. Ohkubo // *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway, 26-30 June 1995*. - Vol.2. - P. 97-100.

82. Шумозащитные экраны в окружающей среде. Руководство по акустическому и архитектурному проектированию / В. Kotzen, С. English. – Лондон и Нью-Йорк : Издательство Ратледжа, 1998. - 186 с.

83. Шашурин, А. Е. Определение эффективной высоты и акустических характеристик шумозащитного экрана / А. Е. Шашурин // *Noise Theory and Practice*. – 2018. – Т. 4, № 2(12). – С. 5-10.

84. Иванов, Н. И. Проблемы конструирования акустических экранов и их применение для снижения шума железнодорожного и автомобильного транспорта / Н. И. Иванов, Н. Г. Семенов, Н. В. Тюрина // *Защита от повышенного шума и вибрации : Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 26–28 марта 2013 года / Под редакцией Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2013. – С. 52-88.*

85. Аистов, В. А. Исследования влияния формы шумозащитного экрана на его акустическую эффективность / В. А. Аистов, И. Л. Шубин // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2009. – № 5. – С. 200-208.

86. Калиниченко, М. В. О возможности применения акустических экранов-

- резонаторов для снижения шума в зоне перед экраном / М. В. Калиниченко, В. В. Булкин, А. А. Балашова // *Noise Theory and Practice*. – 2016. – Т. 2, № 3(5). – С. 16-22.
87. 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.
88. 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.
89. Эффективность малых акустических экранов для защиты от шума железнодорожного транспорта / А. Васильев, Ю. Ли-Ко-шин, А. В. Кудаев [и др.] // *Noise Theory and Practice*. – 2016. – Т. 2, № 3(5). – С. 45-49.
90. Рощина, Н. В. Нормативные требования к шумозащитным акустическим экранам / Н. В. Рощина // *Noise Theory and Practice*. – 2017. – Т. 3, № 3(9). – С. 46-49.
91. Маслова, С. С. Предложения по расчету акустической долговечности шумозащитных экранов / С. С. Маслова, Н. И. Иванов, Ю. С. Рассошенко // *Noise Theory and Practice*. – 2018. – Т. 4, № 2(12). – С. 40-49.
92. Использование метода преобразования звуковых полей для расчёта эффективности шумозащитных конструкций / Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина, А. Е. Шашурин, П. С. Курченко // *Noise Theory and Practice*. – 2020. – Т. 6, № 4(22). – С. 128-134.
93. Элькин, Ю. И. Возможные Применение резиновой крошки в качестве шумопоглощающего материала для шумозащитных СООРУЖЕНИЙ / Ю. И. Элькин, Р. А. Виноградов // *Научный вестник автомобильного транспорта*. – 2023. – № 4. – С. 47-51.
94. Опыт проектирования шумозащитных мероприятий при строительстве железных дорог в России и Италии / Н. И. Иванов, Ю. С. Бойко, С. Луцци, Э. Карлетти // *Noise Theory and Practice*. – 2017. – Т. 3, № 3(9). – С. 50-60.

95. Иванов, Н. И. Проблема шума железнодорожного транспорта и пути ее решения / Н. И. Иванов, Д. А. Куклин // Защита населения от повышенного шумового воздействия : Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 22–24 марта 2011 года / Под редакцией Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: ИННОВА, 2011. – С. 108-123.
96. Снижение шума железнодорожного транспорта / Н. И. Иванов, Д. А. Куклин, П. В. Матвеев, М. В. Буторина // Безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № S12. – С. 1-24.
97. Куклин, Д. А. Расчётные схемы определения шума от железнодорожного транспорта / Д. А. Куклин, П. В. Матвеев // Noise Theory and Practice. – 2016. – Т. 2, № 1(3). – С. 24-33.
98. Минина, Н. Н. Расчет акустической эффективности искусственных сооружений / Н. Н. Минина, Н. И. Иванов, В. А. Корнилов // Жилищное строительство. – 2012. – № 6. – С. 47-49.
99. 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.
100. K.R. Fyfe, C.C. Harrison, L. Cremers. Performance of barriers and berms for road noise attenuation. 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway 26 – 30, June 1995.
101. 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.
102. 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. – EDN GQSFLP.
103. Галяутдинов, И. Н. Исследование акустической эффективности проложения автомобильной дороги в выемке / И. Н. Галяутдинов, И. И. Шарафуллин // Техника и технология транспорта. – 2022. – № 1(24). – EDN HWUDZE.
104. 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. – EDN BXEIRB.

105. Самойлюк, Евгений Павлович. Борьба с шумом в градостроительстве. – Киев : Будівельник, 1975. - 125 с.

106. Болховитина, М.М. Применение зеленых насаждений для снижения шума в крупных городах. – Москва : ГОСИНТИ, 1979. — 28 с.

107. Костюнина, А. А. Шумозащитная роль городских насаждений / А. А. Костюнина, Н. В. Иванисова, Л. В. Куринская // Научная жизнь. – 2019. – № 2. – С. 57-64.

108. Берфина, Г. П. Шумозащитные свойства зеленых насаждений и их эффективное использование в конструкциях примагистральных посадок в городах Нечерноземной зоны : автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук : 06.03.01 / Брянский технол. ин-т. - Брянск, 1986. - 14 с.

109. Винников, Ю. А. Разработка шумозащитных методов с применением зеленых насаждений при развитии селитебных территорий городской застройки : специальность 05.23.22 "Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Винников Юрий Анатольевич. – Москва, 2010. – 226 с.

110. Городков, А. В. Ландшафтно-средозащитное озеленение и его влияние на экологическое состояние крупных городов Центральной России : специальность 03.00.16 : диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Городков Александр Васильевич. – Санкт-Петербург, 2000. – 443 с.

111. Аксянова, Т. Ю. Аналитический обзор влияния пространственной структуры зеленых насаждений на их ветро и шумозащитные свойства / Т. Ю. Аксянова, О. М. Ступакова // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 5(80). – С. 119-122.

112. Сергеева, Н. Д. Новые подходы к организации строительства объектов шумозащитного примагистрального озеленения / Н. Д. Сергеева, В. В. Цыганков, С. А. Абраменков // Вестник Московского гуманитарно-экономического института. – 2018. – № 2. – С. 65-74.

113. Саулова, Т. А. Эстетический и экономический аспекты проектирования



шумозащитных сооружений с использованием озеленения / Т. А. Саулова // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : Сборник материалов по итогам Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 29 октября 2021 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022.

114. Zulfacar, A. Attenuation of highway generated noise by vegetative barriers of various depths and densities / A. Zulfacar, 1975. – 1 p.

115. Дроздова, Л. Ф. Оценка снижения уровней шума зданиями различной формы / Л. Ф. Дроздова, М. В. Буторина, Д. А. Куклин // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6, № 4(22). – С. 95-103.

116. Способ расчета звукоизоляции шумозащитных окон с однокамерным стеклопакетом / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. Л. Щеголев [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2011. – № 4(20). – С. 40-45.

117. Васильев, В. А. Выбор шумозащитного остекления при проектировании линейных объектов в условиях многоэтажной жилой застройки / В. А. Васильев, В. В. Светлов // Noise Theory and Practice. – 2016. – Т. 2, № 4(6). – С. 29-34.

118. Афанасьева, Т. А. Обоснование комплекса мероприятий для обеспечения комфортной и безопасной для человека среды обитания в условиях функционирования транспортных систем : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Афанасьева Татьяна Анатольевна, 2023. – 132 с.

119. Salomons, E. M. Health burden of road traffic noise in the EU in 2020–2035 / E. M. Salomons, M. Dittrich // Noise Control Engineering Journal. – 2022. – Vol. 70, No. 5. – P. 446-455. – DOI 10.3397/1/377038. – EDN DWCICN.

120. Costs and benefits of noise abatement measures / Nijland, H. A. and Van Kempen, E. E. M. M. and Van Wee, G. P. and Jabben, J. // Transport Policy. – 2003. – Vol. 10, No. 2. – P. 131-140.

121. Jagdhuber, R. Implications on Feature Detection When Using the Benefit–Cost Ratio / R. Jagdhuber, J. Rahnenführer // SN Computer Science. – 2021. – Vol. 2, No. 4.

– P. 1-10. – DOI 10.1007/s42979-021-00705-6.

122. Wayson, R. Highway Noise Abatement - Not Just Barriers / R. Wayson, Ch. Porter, A. Varela-Margolles // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 266, No. 1. – P. 1259-1270. – DOI 10.3397/nc\_2023\_0171.

123. Choi, K. Economic feasibility analysis of roadway capacity expansion with accounting traffic noise barrier cost / K. Choi, J. H. Kim, K. Shin // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2004. – Vol. 8, No. 1. – P. 117-127. – DOI 10.1007/bf02829087.

124. Becker, N. The benefits and costs of noise reduction / N. Becker, D. Lavee // Journal of Environmental Planning & Management. – 2003. – Vol. 46, No. 1. – P. 97.

125. Novel cost benefit analysis method performed in Highway Development and Management software for economic impact evaluation of a Motorway noise barrier / L. Remek, P. Danisovic, L. Pepucha, S. Sedivy // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016 : Conference Proceedings, Albena, Bulgaria, 30 июня – 06 2016 года. Vol. 3. – Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2016. – P. 413-420. – DOI 10.5593/SGEM2016/B53/S21.053. – EDN OGWNOF.

126. Kazaku, E. Socio-Economic and Ecological Effects in Probabilistic Appraisal of Railway Project / E. Kazaku, E. Zvereva, Yu. Panova // Technology, People, and Innovation in Supply Chain : Proceedings of the 10th International Conference on Operations and Supply Chain Management, Wellington, New Zealand, 14–15 декабря 2020 года. – Wellington, New Zealand: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2020. – P. 256-263.

127. Борцова, С. С. Экономическая эффективность шумозащитных конструкций / С. С. Борцова // Noise Theory and Practice. – 2022. – Т. 8, № 2(29). – С. 45-55.

128. Cavallaro, F. Are transport policies and economic appraisal aligned in evaluating road externalities? / F. Cavallaro, S. Nocera // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2022. – Vol. 106. – P. 103266. – DOI 10.1016/j.trd.2022.103266.

129. Бандуров, В. В. Организационно-экономические механизмы управления природоохранной деятельностью промышленно-транспортных комплексов : специальность 08.00.05 "Экономика и управление народным хозяйством" :

диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Бандуров Владислав Вячеславович. – Москва, 2003. – 159 с.

130. Кузина, Е. Л. Управление развитием системы природопользования на железнодорожном транспорте для обеспечения эколого-экономической безопасности урбанизированных территорий : специальность 08.00.05 "Экономика и управление народным хозяйством" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора экономических наук / Кузина Елена Леонидовна. – Ростов-на-Дону, 2012. – 46 с.

131. Экономика и управление природопользованием. Ресурсосбережение : учебник и практикум для вузов / А. Л. Новоселов, И. Ю. Новоселова, И. М. Потравный, Е. С. Мелехин. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 390 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-12355-5. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/536514> (дата обращения: 14.09.2024).

132. From the costs of noise to the value of soundscape? / L. Jiang, A. Bristow, J. Kang [et al.] // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. — 2023. — Vol. 265, No. 6. — P. 1224-1230. — DOI 10.3397/in\_2022\_0168.

133. Wilhelmsson, M. The impact of traffic noise on the values of single-family houses / M. Wilhelmsson // Journal of Environmental Planning & Management. — 2000. — Vol. 43, No. 6. — P. 799.

134. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая ред.) : утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ № ВК 477 от 21.06.1999 г. — Москва : офиц. изд., 2000. — 421 с.

135. ОДМ 218.11.006-2021 Руководство по оценке экономической эффективности использования в дорожном хозяйстве инноваций и достижений научно-технического прогресса. — Москва : РОСАВТОДОР, 2020. — 47 с.

136. Руководство по технико-экономической оценке шумозащитных мероприятий, осуществляемых строительными акустическими методами / НИИСФ. — Москва : Стройиздат, 1981 — 30 с.

137. Перцев, В. П. Экономическая оценка и выбор решений в инвестиционном

дорожно-строительном проекте : специальность 08.00.05 "Экономика и управление народным хозяйством" : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Перцев Виктор Петрович. – Новосибирск, 2002. – 163 с.

138. Михайлов, П. Б. Экономическая эффективность использования инвестиций природоохранного назначения : специальность 08.00.05 "Экономика и управление народным хозяйством" : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Михайлов Павел Борисович. – Санкт-Петербург, 2005. – 159 с.

139. Демаков, И. В. Совершенствование показателя приведенных затрат для экономической оценки инвестиционного проекта / И. В. Демаков, М. В. Новиков, И. А. Павлова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 472.

140. Майский, Р. А. Экономическая эффективность проектов по охране окружающей среды и природоохранных мероприятий / Р. А. Майский, Ю. А. Павлова, В. С. Проскура // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. – 2017. – № 4(22). – С. 40-47.

141. Петрова, Е. Е. Направления анализа эффективности инвестиционных проектов с учетом влияния экологических факторов / Е. Е. Петрова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. – 2012. – № 2. – С. 108-114.

142. Воздействие городского автотранспортного шума с оценкой риска здоровью населения / И. Б. Ушаков, О. В. Клепиков, В. И. Попов, Н. Ю. Самодурова // Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96, № 9. – С. 904-908. – DOI 10.18821/0016-9900-2017-96-9-904-909.

143. Баскакова, А. Г. Оценка риска для здоровья населения от воздействия транспортного шума / А. Г. Баскакова, С. А. Куролап // Актуальные вопросы современной науки : Сборник статей по материалам XIII международной научно-практической конференции. В 3-х частях, Томск, 19 июня 2018 года. Том Часть 3. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью Дендра, 2018. – С. 189-193.

144. 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.

145. Борцова, С. С. К оценке ущерба от транспортного шума / С. С. Борцова // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 3(25). – С. 42-49.

146. Estimating health related costs and savings from balcony acoustic design for road traffic noise / D. Naish, A. Tan, N. Demirbilek [et al.] // Applied Acoustics. – 2012. – Vol. 73, No. 5. – P. 497-507. – DOI 10.1016/j.apacoust.2011.12.005

147. Об утверждении Методологии расчета экономических потерь от смертности, заболеваемости и инвалидизации населения : Приказ Минэкономразвития России № 192, Минздравсоцразвития России № 323н, Минфина России № 45н, Росстата № 113 от 10.04.2012. – Текст : электронный. – URL: <https://base.garant.ru/70170542> (дата обращения: 25.06.2024).

148. Голиков, И. В. Оценка снижения ущерба от транспортного шума в городе Ростове-на-Дону / И. В. Голиков, Е. Е. Шаталова // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 5(14). – С. 19-24.

149. Синявский, В. Д. Прогнозирование экономического ущерба от шума дорожного движения / В. Д. Синявский, Е. В. Синявская // Сборник научных трудов / СОЧИНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РАН, ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЮЖНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИГОН ; Под редакцией М.М. Амирханова. – Сочи : РИО СНИЦ РАН, 2011. – С. 104-111.

150. Шеломенцев, А. Г. Подходы к экономической оценке потерь здоровья населения / А. Г. Шеломенцев, Е. С. Малинина // Азимут научных исследований: экономика и управление. – 2019. – Т. 8, № 2(27). – С. 241-246. – DOI 10.26140/anie-2019-0802-0059.

151. Ягудина, Р. И. Анализ "стоимости болезни": Виды, методология, особенности проведения в Российской Федерации / Р. И. Ягудина, И. Ю. Зинчук,

М. М. Литвиненко // Фармакоэкономика. Современная фармакоэкономика и фармакоэпидемиология. – 2012. – Т. 5, № 1. – С. 4-9.

152. Ягудина, Р. И. Методология проведения анализа "затрат" при проведении фармакоэкономических исследований / Р. И. Ягудина, А. Ю. Куликов, И. А. Комаров // Фармакоэкономика. Современная фармакоэкономика и фармакоэпидемиология. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 3-6.

153. Кривко, Е. В. Экономическая оценка мероприятий по защите населенных пунктов от транспортного шума / Е. В. Кривко, В. А. Тимофеева // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства : Международная научно-практическая конференция, Красноярск, 07–08 апреля 2016 года. Том Часть 1. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. – С. 49-57.

154. Иванова, М. Д. Бухгалтерский учет затрат на природоохранную деятельность : специальность 08.00.12 "Бухгалтерский учет, статистика" : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Иванова Маргарита Дашицыреновна. – Нижний Новгород, 2005. – 240 с.

155. Экономические аспекты создания лесных защитных полос / М. Г. Ежова, И. А. Иматова, А. В. Капрало, Н. А. Иматова // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2008. – № 3. – С. 122-125.

156. Пospelов, П. И. Техничко-экономические показатели конструкций шумозащитных экранов на Московской кольцевой автомобильной дороге / П. И. Пospelов, Д. М. Строков // Проектирование автомобильных дорог : сб. науч. тр. МАДИ (ГТУ). – М. : МАДИ, 2002.

157. Антонян, О. Н. Сметное дело и ценообразование в строительстве / О. Н. Антонян, А. С. Соловьева. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2019. – 49 с. – ISBN 978-5-9948-3351-3.

158. Павлов, А. С. Экономика строительства : учебник и практикум для среднего профессионального образования / А. С. Павлов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 752 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-18313-9. — Текст : электронный //

Образовательная платформа Юрайт [сайт]. —

URL: <https://urait.ru/bcode/534768> (дата обращения: 14.09.2024).

159. Об утверждении Методики определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации : Приказ Министра России от 04.08.2020 № 421/пр. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/565649004> (дата обращения: 25.06.2024).

160. Об утверждении Методики по разработке и применению нормативов сметной прибыли при определении сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства : Приказ Министра России от 11.12.2020 г. № 774/пр. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573598898> (дата обращения: 25.06.2024).

161. Об утверждении Методики по разработке и применению нормативов накладных расходов при определении сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства : Приказ Министра России от 21.12.2020 № 812/пр. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573956584> (дата обращения: 25.06.2024).

162. Веселова, Е. Д. Применение укрупненных показателей сметной стоимости строительства / Е. Д. Веселова, Е. И. Рычкова, С. В. Коланьков // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : Сборник трудов LXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 21–25 апреля 2014 года. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2014. – С. 204-207.

163. Клипина, Н. А. Сметная стоимость как основа ценообразования в строительстве / Н. А. Клипина, А. Ф. Буравлева, Р. Г. Абакумов // Инновационная наука. – 2017. – Т. 1, № 4. – С. 103-106.

164. 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. – EDN NZNFQJ.
165. 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. – EDN FVIYRQ.
166. Parker, G. Health and whole life cost benefits of highways noise barriers / G. Parker // *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. – 2023. – Vol. 265, No. 1. – P. 6560-6565. – DOI 10.3397/in\_2022\_0988.
167. Life-cycle performance of noise barriers focusing on installation conditions of fasteners / M. Granzner, A. Strauss, M. Reiterer, H. Kari // *Ce/Papers*. – 2023. – Vol. 6, No. 5. – P. 1137-1143. – DOI 10.1002/cepa.2080.
168. Методы оптимизации: теория и алгоритмы [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / А. А. Черняк, Ж. А. Черняк, Ю. М. Метельский, С. А. Богданович. - 2-е изд., испр. и доп. - Электрон. текстовые дан. - Москва : Юрайт, 2020. - 357 с. - (ЭБС Юрайт) (Высшее образование). - Загл. с титул. экрана. - Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.urait.ru/bcode/453567> (дата обращения: 19.10.2020). - ISBN 978-5-534-04103-3
169. Иванушкин, К. Л. Разработка экономико-математической модели оптимизации выбора шумозащитного мероприятия / К. Л. Иванушкин // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2012. – Т. 26, № 10(139). – С. 74-79.
170. 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.
171. 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.

172. 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. – EDN TSBOSJ.

173. 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. – EDN TWVGSZ.

174. 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. – EDN TSBORP.

175. Кривко, Е. В. Методические основы проектирования оптимального мероприятия по защите населенного пункта от транспортного шума / Е. В. Кривко // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 32.

176. ГОСТ 23337-2014. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий : издание официальное. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 20 с.

177. ГОСТ 20444-2014. Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики : издание официальное. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 18 с.

178. CEN/TS 1793-4:2003. Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. Part 4: Intrinsic characteristics. In situ values of sound diffraction. – Brussels: Comité Européen de Normalisation, 2003. – 16 с.

179. ГОСТ 17187-2010 Шумомеры. Часть 1. Технические требования. – Москва:

Стандартинформ, 2010. - 55 с.

180. ГОСТ 17168-82 (СТ СЭВ 1807-79). Фильтры электронные октавные и третьоктавные. Общие технические требования и методы испытаний. – Москва: Издательство стандартов, 1982, – 19 с.

181. СП 119.13330.2017. Свод правил. Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95 (с Изменением N 1) : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 12 декабря 2017 г. № 1648/пр : введен 13 июня 2018 г. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/550965737> (дата обращения 25.06.2024)

182. ГОСТ 33475-2015. Дороги автомобильные общего пользования ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 15 с.

183. 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. – EDN DIIYXW.

184. Об утверждении Правил установления санитарно-защитных зон и использования земельных участков, расположенных в границах санитарно-защитных зон : Постановление Правительства Российской Федерации от 3.03.2018 г. № 222. – Текст : электронный – URL: <https://docs.cntd.ru/document/556716724> (дата обращения: 25.06.2024).

185. 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.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. Сметы шумозащитных экранов

Таблица А.1 – Локальный сметный расчёт (Смета). Акустические экраны (на фундаменте) высотой 4 м

№ п/п	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость в базисном уровне цен (в текущем уровне цен (гр. 8) для ресурсов, отсутствующих в СНБ), руб.			Индексы	Сметная стоимость в текущем уровне цен, руб.
				на единицу	коэффициенты	всего с учетом коэффициентов	на единицу	коэффициенты	всего		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Раздел 1. Земляные работы</b>											
<b>1</b>	<b>ФЕР01-01-022-14</b>	<b>Разработка грунта с погрузкой на автосамосвалы в траншеях экскаватором «обратная лопата» с ковшем вместимостью 0,5 (0,5-0,63) м3, группа грунтов: 2</b>	<b>1000 м<sup>3</sup></b>			<b>0,243</b>					
		Объем=(90% от 270) / 1000									
	2	ЭМ					3 150,00		765,45		
	3	в т.ч. ОТм					425,25		103,34		
		ЗТм	чел.-ч	31,5		7,6545					
		Итого по расценке					3 150,00		765,45		
		ФОТ							103,34		
	Приказ Министра России № 812/пр от 21.12.20 Прил. п.1.1	НР Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	92		92			95,07		
	Приказ Министра России № 774/пр от 11.12.20 Прил. п.1.1	СП Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	46		46			47,54		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>908,06</b>		
<b>2</b>	<b>ФЕР01-02-057-02</b>	<b>Разработка грунта вручную в траншеях глубиной до 2 м без креплений с откосами, группа грунтов: 2</b>	<b>100 м<sup>3</sup></b>			<b>0,27</b>					
		Объем=(10% от 270) / 100									
	Прил.1.12 п.3.187	Доработка вручную, зачистка дна и стенок с выкидкой грунта в котлованах и траншеях, разработанных механизированным способом ОЗП=1,2; ТЗ=1,2									
	1	ОТ					1 201,20	1,2	389,19		
		ЗТ	чел.-ч	154	1,2	49,896					
		Итого по расценке					1 201,20		389,19		
		ФОТ							389,19		
	Приказ Министра России № 812/пр от 21.12.20 Прил. п.1.2	НР Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	89		89			346,38		
	Приказ Министра России № 774/пр от 11.12.20 Прил. п.1.2	СП Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	40		40			155,68		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>891,25</b>		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>3</b>	<b>ФЕР01-01-033-04 Засыпка траншей и котлованов с перемещением грунта до 5 м бульдозерами мощностью: 79 кВт (108 л.с.), гр. грунтов 1</b>		<b>1000 м<sup>3</sup></b>			<b>0,13</b>					
		Объем=(80% от 160) / 1000									
	2	ЭМ					251,44		32,69		
	3	в т.ч. ОТм					42,93		5,58		
		ЗТм	чел.-ч	3,18		0,4134					
		Итого по расценке					251,44		32,69		
		ФОТ							5,58		
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.20 Прил. п.1.1	НР Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	92		92			5,13		
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.20 Прил. п.1.1	СП Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	46		46			2,57		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>40,39</b>		
<b>4</b>	<b>ФЕР01-02-005-01 Уплотнение грунта пневматическими трамбовками, группа грунтов: 1-2</b>		<b>100 м<sup>3</sup></b>			<b>1,3</b>					
		Объем=(0,13*1000) / 100									
	1	ОТ					106,88		138,94		
	2	ЭМ					241,58		314,05		
	3	в т.ч. ОТм					26,36		34,27		
		ЗТ	чел.-ч	12,53		16,289					
		ЗТм	чел.-ч	2,62		3,406					
		Итого по расценке					348,46		452,99		
		ФОТ							173,21		
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.20 Прил. п.1.1	НР Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	92		92			159,35		
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.20 Прил. п.1.1	СП Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	46		46			79,68		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>692,02</b>		
<b>5</b>	<b>ФЕР01-02-061-01 Засыпка вручную траншей, пазух котлованов и ям, группа грунтов: 1</b>		<b>100 м<sup>3</sup></b>			<b>0,32</b>					
		Объем=(20% от 160) / 100									
	1	ОТ					663,75		212,40		
		ЗТ	чел.-ч	88,5		28,32					
		Итого по расценке					663,75		212,40		
		ФОТ							212,40		
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.20 Прил. п.1.2	НР Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	89		89			189,04		
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.20 Прил. п.1.2	СП Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	40		40			84,96		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>486,40</b>		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	ФССЦ-02.3.01.02-0033	Песок природный обогащенный для строительных работ средний (Земляные работы, выполняемые ручным способом)	м <sup>3</sup>			176	70,60		12 425,60		
Вывоз лишнего грунта (дальность перевозки 15км)											
7	ФССЦпг-03-21-01-015	Перевозка грузов автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т работающих вне карьера на расстояние: I класс груза до 15 км	1 т груза			472,5	13,38		6 322,05		
Итого по разделу 1 Земляные работы									21 765,77		
<b>Раздел 2. Монолитный ленточный фундамент (фундамент ленточный для устройства в пределах присыпной обочины)</b>											
8	ФЕР06-01-001-01	Устройство бетонной подготовки Объем=16,5 / 100	100 м <sup>3</sup>			0,165					
		1 ОТ					1 053,00		173,75		
		2 ЭМ					1 566,06		258,40		
		3 в т.ч. ОТм					244,39		40,32		
		4 М					909,27		150,03		
		ЗТ	чел.-ч	135		22,275					
		ЗТм	чел.-ч	18,12		2,9898					
		Итого по расценке					3 528,33		582,18		
		ФОТ							214,07		
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.2020 Прил. п.6	НР Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве	%	102		102			218,35		
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.2020 Прил. п.6	СП Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве	%	58		58			124,16		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>924,69</b>		
9	ФССЦ-04.1.02.05-0003	Смеси бетонные тяжелого бетона (БСТ), класс В7,5 (М100)	м <sup>3</sup>			16,83	560,00		9 424,80		
10	ФЕР06-01-001-22	Устройство ленточных фундаментов: железобетонных при ширине по верху до 1000 мм Объем=110 / 100	100 м <sup>3</sup>			1,1					
		1 ОТ					3 189,60		3 508,56		
		2 ЭМ					3 499,23		3 849,15		
		3 в т.ч. ОТм					405,88		446,47		
		4 М					4 013,08		4 414,39		
		ЗТ	чел.-ч	360		396					
		ЗТм	чел.-ч	30,37		33,407					
		Итого по расценке					10 701,91		11 772,10		
10.1	04.1.02.05	Смеси бетонные тяжелого бетона	м <sup>3</sup>	102		112,2	0,00				
		ФОТ							3 955,03		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.2020 Прил. п.6	НР Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве	%	102		102			4 034,13		
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.2020 Прил. п.6	СП Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве	%	58		58			2 293,92		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>18 100,15</b>		
<b>11</b>	<b>ФССЦ-08.4.03.02-0001</b>	<b>Сталь арматурная, горячекатаная, гладкая, класс А-I, диаметр 6 мм (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)</b>	<b>т</b>			<b>0,083</b>	<b>7 418,82</b>		<b>615,76</b>		
<b>12</b>	<b>ФССЦ-08.4.03.03-0030</b>	<b>Сталь арматурная, горячекатаная, периодического профиля, класс А-III, диаметр 8 мм (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)</b>	<b>т</b>			<b>1,586</b>	<b>8 102,64</b>		<b>12 850,79</b>		
<b>13</b>	<b>ФССЦ-04.1.02.05-0007</b>	<b>Смеси бетонные тяжелого бетона (БСТ), класс В20 (М250) (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)</b>	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>112,2</b>	<b>665,00</b>		<b>74 613,00</b>		
<b>14</b>	<b>ОП ФССЦ Прилож.15 п.4 к ФССЦ-04.1.02.05-0007</b>	<b>Надбавка к бетону (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)</b>	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>110</b>	<b>586,25</b>	<b>0,01</b>	<b>644,88</b>		
	ОП ФССЦ Прилож.15 п.4 -1%	Надбавка по морозостойкости МАТ=0,01 к расч.									
<b>Деформационные швы</b>											
<b>15</b>	<b>ФЕР07-05-039-05</b>	<b>Устройство герметизации стеновых панелей: пенополистиролом, стык вертикальный</b>	<b>100 м</b>			<b>0,0675</b>					
		Объем=6,75 / 100									
	1	ОТ					75,15		5,07		
	2	ЭМ					237,64		16,04		
	3	в т.ч. ОТм					4,29		0,29		
	4	М					1 064,01		71,82		
		ЗТ	чел.-ч	8,81		0,594675					
		ЗТм	чел.-ч	0,37		0,024975					
		Итого по расценке					1 376,80		92,93		
		ФОТ							5,36		
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.20 Прил. п.7.1	НР Бетонные и железобетонные сборные конструкции жилых, общественных и административно-бытовых зданий	%	116		116			6,22		
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.20 Прил. п.7.1	СП Бетонные и железобетонные сборные конструкции жилых, ... зданий промышленных предприятий	%	80		80			4,29		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>103,44</b>		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
16	ФССЦ-12.2.05.06-0002	Плиты пенополистирольные теплоизоляционные ППС40 (Бетонные и железобетонные сборные конструкции и работы в строительстве)	м <sup>3</sup>			-0,072225	994,40				-71,82
17	ФССЦ-12.2.05.09-0043	Плиты теплоизоляционные из экструзионного вспененного полистирола ПЕНОПЛЭКС-35 (Бетонные и железобетонные сборные конструкции и работы в строительстве) Объем=5,48*0,05	м <sup>3</sup>			0,274	1 208,43				331,11
18	ФЕР07-01-037-04	Герметизация мастикой швов: вертикальных Объем=21,25 / 100	100 м			0,213					
		1 ОТ					176,51				37,60
		2 ЭМ					460,59				98,11
		4 М					835,55				177,97
		ЗТ	чел.-ч	19		4,047					
		Итого по расценке					1 472,65				313,68
		ФОТ									37,60
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.2020 Прил. п.7	НР Бетонные и железобетонные сборные конструкции и работы в строительстве	%	110		110					41,36
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.2020 Прил. п.7	СП Бетонные и железобетонные сборные конструкции и работы в строительстве	%	73		73					27,45
		<b>Всего по позиции</b>									<b>382,49</b>
<b>Защита бетонных поверхностей</b>											
19	ФЕР08-01-003-07	Гидроизоляция боковая обмазочная битумная в 2 слоя по выровненной поверхности бутовой кладки, кирпичу, бетону Объем=345 / 100	100 м <sup>2</sup>			3,45					
		1 ОТ					201,61				695,55
		2 ЭМ					71,64				247,16
		3 в т.ч. ОТм					2,32				8,00
		4 М					84,88				292,84
		ЗТ	чел.-ч	21,2		73,14					
		ЗТм	чел.-ч	0,2		0,69					
		Итого по расценке					358,13				1 235,55
		ФОТ									703,55
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.2020 Прил. п.8	НР Конструкции из кирпича и блоков	%	110		110					773,91
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.2020 Прил. п.8	СП Конструкции из кирпича и блоков	%	69		69					485,45
		<b>Всего по позиции</b>									<b>2 494,91</b>

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	ФССЦ-01.2.03.03-0011	Мастика битумная гидроизоляционная МГ-1 (Конструкции из кирпича и блоков)	т			0,828	7 669,69		6 350,50		
21	ФЕР15-07-003-02	Нанесение водно-дисперсионной грунтовки на поверхности: пористые (камень, кирпич, бетон и т.д.) Объем=80 / 100	100 м <sup>2</sup>			0,8					
		1 ОТ					33,87		27,10		
		2 ЭМ					22,14		17,71		
		3 в т.ч. ОТм					0,58		0,46		
		4 М					1,84		1,47		
		ЗТ	чел.-ч	3,69		2,952					
		ЗТм	чел.-ч	0,05		0,04					
		Итого по расценке					57,85		46,28		
		ФОТ							27,56		
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.2020 Прил. п.15	НР Отделочные работы	%	100		100			27,56		
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.2020 Прил. п.15	СП Отделочные работы	%	49		49			13,50		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>87,34</b>		
22	ФССЦ-14.3.02.01-1000	Грунтовка акриловая, универсальная (Отделочные работы) Объем=11,04/1000	т			0,01104	14 101,05		155,68		
23	ФЕР15-07-002-01	Окраска деревянных, каменных или ранее окрашенных поверхностей водно-дисперсионными красками и водно-дисперсионными лаками	100 м <sup>2</sup>			0,8					
		Объем=80 / 100									
		1 ОТ					65,62		52,50		
		2 ЭМ					2,91		2,33		
		3 в т.ч. ОТм					0,58		0,46		
		4 М					1,84		1,47		
		ЗТ	чел.-ч	7,83		6,264					
		ЗТм	чел.-ч	0,05		0,04					
		Итого по расценке					70,37		56,30		
		ФОТ							52,96		
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.2020 Прил. п.15	НР Отделочные работы	%	100		100			52,96		
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.2020 Прил. п.15	СП Отделочные работы	%	49		49			25,95		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>135,21</b>		



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
24	ФССЦ-14.3.02.01-1022	Краска водоэмульсионная, акриловая, для наружной защитно-декоративной отделки бетонных и железобетонных конструкций (Отделочные работы)	л			9,6	13,62		130,75		
Итого по разделу 2 Монолитный ленточный фундамент (фундамент ленточный для устройства в пределах присыпной обочины)									127 273,68		
<b>Раздел 3. Устройство шумозащитного полотна, Sэкp=400 кв.м.</b>											
25	ФЕР27-09-040-01	Устройство шумозащитного экрана из: панелей алюминиевых или стальных оцинкованных со звукопоглощающими вкладышами Объем=400 / 100	100 м <sup>2</sup>			4					
	1	ОТ					911,52		3 646,08		
	2	ЭМ					2 236,51		8 946,04		
	3	в т.ч. ОТм					293,46		1 173,84		
	4	М					132 606,57		530 426,28		
		ЗТ	чел.-ч	105,5		422	225 431,17				
		ЗТм	чел.-ч	25,56		102,24	92 824,60				
		Итого по расценке					135 754,60		543 018,40		
		ФОТ							4 819,92		
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.2020 Прил. п.21	НР Автомобильные дороги	%	126		126			6 073,10		
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.2020 Прил. п.21	СП Автомобильные дороги	%	95		95			4 578,92		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>553 670,42</b>		
26	ФССЦ-01.5.02.01-0131	Стойка для экрана шумозащитного оцинкованная в комплекте с крепежными деталями СШ.1  (Автомобильные дороги)	т			2,578	24 262,83		62 549,58		
27	ФССЦ-01.7.15.03-0043	Болты строительные анкерные с гайками (Автомобильные дороги) Объем=0,034*4	т			0,136	25 542,66		3 473,80		
Итого по разделу 3 Устройство шумозащитного полотна, Sэкp=400 кв.м.									619 693,80		
<b>ВСЕГО по смете</b>									<b>768 733,25</b>		

Таблица А.2 – Локальный сметный расчёт (Смета). Акустические экраны (на фундаменте) высотой 6 м

№ п/п	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость в базисном уровне цен (в текущем уровне цен (гр. 8) для ресурсов, отсутствующих в СНБ), руб.			Индексы	Сметная стоимость в текущем уровне цен, руб.
				на единицу	коэффициенты	всего с учетом коэффициентов	на единицу	коэффициенты	всего		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Раздел 1. Земляные работы</b>											
<b>1</b>	<b>ФЕР01-02-057-02</b>	<b>Разработка грунта вручную в траншеях глубиной до 2 м без креплений с откосами, группа грунтов: 2</b> Объем=90 / 100	<b>100 м<sup>3</sup></b>			<b>0,9</b>					
		1 ОТ					1 201,20		1 081,08		
		ЗТ	чел.-ч	154		138,6					
		Итого по расценке					1 201,20		1 081,08		
		ФОТ							1 081,08		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	89		89			962,16		
		СП Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	40		40			432,43		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>2 475,67</b>		
<b>2</b>	<b>ФЕР01-02-061-01</b>	<b>Засыпка вручную траншей, пазух котлованов и ям, группа грунтов: 1</b> Объем=32 / 100	<b>100 м<sup>3</sup></b>			<b>0,32</b>					
		1 ОТ					663,75		212,40		
		ЗТ	чел.-ч	88,5		28,32					
		Итого по расценке					663,75		212,40		
		ФОТ							212,40		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	89		89			189,04		
		СП Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	40		40			84,96		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>486,40</b>		
<b>3</b>	<b>ФССЦ-02.3.01.02-0033</b>	<b>Песок природный обогащенный для строительных работ средний</b> (Земляные работы, выполняемые ручным способом)	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>32,64</b>	<b>70,60</b>		<b>2 304,38</b>		
Вывоз лишнего грунта и шлама (дальность перевозки 15км)											
<b>4</b>	<b>ФССЦпг-01-01-01-039</b>	<b>Погрузо-разгрузочные работы при автомобильных перевозках: Погрузка грунта растительного слоя (земля, перегной)</b>	<b>1 т груза</b>			<b>183,44</b>	<b>3,96</b>		<b>726,42</b>		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	ФССЦпг-03-21-01-015	Перевозка грузов автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т работающих вне карьера на расстояние: I класс груза до 15 км	1 т груза			183,44	13,38		2 454,43		
Итого по разделу 1 Земляные работы :											
Итого по разделу 1 Земляные работы										8 447,30	
<b>Раздел 2. Фундамент свайный с ростверком для устройства на небольших насыпях</b>											
Буронабивные сваи 20 шт.											
6	ФЕР05-01-029-03	Устройство железобетонных буронабивных свай с бурением скважин вращательным (шнековым) способом в грунтах: 2 группы диаметром до 600 мм, длина свай до 12 м	м <sup>3</sup>			13,06					
		1 ОТ					18,21		237,82		
		2 ЭМ					160,11		2 091,04		
		3 в т.ч. ОТм					15,33		200,21		
		4 М					183,78		2 400,17		
		ЗТ	чел.-ч	1,96		25,5976					
		ЗТм	чел.-ч	1,17		15,2802					
Итого по расценке							362,10		4 729,03		
ФОТ									438,03		
Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр 1											
НР Свайные работы							%	117		512,50	
СП Свайные работы							%	70		306,62	
<b>Всего по позиции</b>										<b>5 548,15</b>	
7	ФССЦ-04.1.02.05-0009	Смеси бетонные тяжелого бетона (БСТ), класс В25 (М350) (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	м <sup>3</sup>			13,32	725,69		9 666,19		
8	ОП ФССЦ Прилож.15 п.4 к ФССЦ-04.1.02.05-0009	Надбавка к бетону  (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	м <sup>3</sup>			13,06	645,75	0,06	506,01		
	ОП ФССЦ Прилож.15 п.4 -6%	Надбавка по морозостойкости (300-150=150/50=3*2%=6%) МАТ=0,06 к расх.									
9	ФССЦ-08.4.03.02-0001	Сталь арматурная, горячекатаная, гладкая, класс А-I, диаметр 6 мм (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	т			0,199	7 418,82		1 476,35		
10	ФССЦ-08.4.03.02-0003	Сталь арматурная, горячекатаная, гладкая, класс А-I, диаметр 10 мм (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	т			0,029	6 726,18		195,06		
11	ФССЦ-08.4.03.03-0036	Сталь арматурная, горячекатаная, периодического профиля, класс А-III, диаметр 25-28 мм (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	т			4,019	7 792,12		31 316,53		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	ФССЦ-08.3.07.01-0076 Прокат полосовой, горячекатаный, марка стали Ст3сп, ширина 50-200 мм, толщина 4-5 мм (5x100мм) (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)		т			0,18	5 000,00		900,00		
13	ФЕР05-01-010-02 Вырубка бетона из арматурного каркаса железобетонных: свай площадью сечения свыше 0,1 м2		шт			20					
	1	ОТ					13,50		270,00		
	2	ЭМ					48,46		969,20		
	3	в т.ч. ОТм					5,23		104,60		
	4	М					0,78		15,60		
		ЗТ	чел.-ч	1,42		28,4					
		ЗТм	чел.-ч	0,52		10,4					
		Итого по расценке					62,74		1 254,80		
		ФОТ							374,60		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Свайные работы	%	117		117			438,28		
		СП Свайные работы	%	70		70			262,22		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>1 955,30</b>		
<b>Монолитный железобетонный ростверк</b>											
14	ФЕР08-01-002-02 Устройство основания под фундаменты: щебеночного		м <sup>3</sup>			10					
	1	ОТ					6,75		67,50		
	2	ЭМ					8,29		82,90		
	3	в т.ч. ОТм					0,81		8,10		
	4	М					0,37		3,70		
		ЗТ	чел.-ч	0,85		8,5					
		ЗТм	чел.-ч	0,07		0,7					
		Итого по расценке					15,41		154,10		
		ФОТ							75,60		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Конструкции из кирпича и блоков	%	110		110			83,16		
		СП Конструкции из кирпича и блоков	%	69		69			52,16		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>289,42</b>		
15	ФССЦ-02.2.05.04-1767 Щебень М 400, фракция 20-40 мм, группа 2 (Конструкции из кирпича и блоков)		м <sup>3</sup>			11,5	91,50		1 052,25		
16	ФЕР06-01-001-22 Устройство ленточных фундаментов: железобетонных при ширине по верху до 1000 мм Объем=52,2 / 100		100 м <sup>3</sup>			0,522					
	1	ОТ					3 189,60		1 664,97		
	2	ЭМ					3 499,23		1 826,60		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		3	в т.ч. ОТм				405,88		211,87			
		4	М				4 013,08		2 094,83			
			ЗТ	чел.-ч	360		187,92					
			ЗТм	чел.-ч	30,37		15,85314					
		Итого по расценке										
16.1	04.1.02.05	Смеси бетонные тяжелого бетона	м3		102		53,244	0,00			5 586,40	
		ФОТ									1 876,84	
	Приказ Минстроя России № 812/пр от 21.12.2020 Прил. п.6	НР Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве	%		102		102				1 914,38	
	Приказ Минстроя России № 774/пр от 11.12.2020 Прил. п.6	СП Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве	%		58		58				1 088,57	
		<b>Всего по позиции</b>										<b>8 589,35</b>
<b>17</b>	<b>ФССЦ-08.4.03.03-0033</b>	<b>Сталь арматурная, горячекатаная, периодического профиля, класс А-III, диаметр 14 мм</b>	<b>т</b>				<b>0,726</b>		<b>7 997,23</b>		<b>5 805,99</b>	
		(Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)										
<b>18</b>	<b>ФССЦ-08.4.03.03-0031</b>	<b>Сталь арматурная, горячекатаная, периодического профиля, класс А-III, диаметр 10 мм</b>	<b>т</b>				<b>1,048</b>		<b>8 014,15</b>		<b>8 398,83</b>	
		(Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)										
<b>19</b>	<b>ФССЦ-04.1.02.05-0009</b>	<b>Смеси бетонные тяжелого бетона (БСТ), класс В25 (М350)</b>	<b>м3</b>				<b>53,244</b>		<b>725,69</b>		<b>38 638,64</b>	
		(Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)										
<b>20</b>	<b>ОП ФССЦ Прилож.15 п.4 к ФССЦ-04.1.02.05-0009</b>	<b>Надбавка к бетону</b>	<b>м3</b>				<b>52,2</b>		<b>645,75</b>	<b>0,06</b>	<b>2 022,49</b>	
		(Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)										
	ОП ФССЦ Прилож.15 п.4 -6%	Объем=0,522*100 Надбавка по морозостойкости (300-150=150/50=3*2%=6%) МАТ=0,06 к расх.										
<b>Деформационные швы</b>												
<b>21</b>	<b>ФЕРр52-6-1</b>	<b>Устройство осадочного шва из просмоленных досок для сопряжения существующих и пристраиваемых фундаментов</b>	<b>100 м<sup>2</sup></b>				<b>0,0261</b>					
		Объем=2,61 / 100										
		1	ОТ					1 321,05			34,48	
		2	ЭМ					7,89			0,21	
		3	в т.ч. ОТм					1,39			0,04	
		4	М					2 597,86			67,80	
			ЗТ	чел.-ч	164,72		4,299192					
			ЗТм	чел.-ч	0,12		0,003132					
		Итого по расценке										3 926,80
												102,49

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		ФОТ							34,52		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Фундаменты (ремонтно-строительные)	%	93		93			32,10		
		СП Фундаменты (ремонтно-строительные)	%	55		55			18,99		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>153,58</b>		
<b>22</b>	<b>ФССЦ-01.2.03.03-0011</b>	<b>Мастика битумная гидроизоляционная МГ-1 (Фундаменты (ремонтно-строительные))</b>	<b>т</b>			<b>0,008091</b>		<b>7 669,69</b>	<b>62,06</b>		
<b>23</b>	<b>ФССЦ-11.1.03.06-0090</b>	<b>Доска обрезная, хвойных пород, ширина 75-150 мм, толщина 32-40 мм, длина 4-6,5 м, сорт II (Фундаменты (ремонтно-строительные))</b>	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>0,082215</b>		<b>1 430,00</b>	<b>117,57</b>		
<b>Итого по разделу 2 Фундамент свайный с ростверком для устройства на небольших насыпях</b>									<b>116 693,77</b>		
<b>Раздел 3. Устройство шумозащитного полотна, Sэкp=600 кв.м.</b>											
<b>24</b>	<b>ФЕР27-09-040-01</b>	<b>Устройство шумозащитного экрана из: панелей алюминиевых или стальных оцинкованных со звукопоглощающими вкладышами</b>	<b>100 м<sup>2</sup></b>			<b>6</b>					
		Объем=600 / 100									
	1	ОТ						911,52	5 469,12		
	2	ЭМ						2 236,51	13 419,06		
	3	в т.ч. ОТм						293,46	1 760,76		
	4	М						132 606,57	795 639,42		
		ЗТ	чел.-ч	105,5		633					
		ЗТм	чел.-ч	25,56		153,36					
		<b>Итого по расценке</b>						<b>135 754,60</b>	<b>814 527,60</b>		
		ФОТ							7 229,88		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Автомобильные дороги	%	126		126			9 109,65		
		СП Автомобильные дороги	%	95		95			6 868,39		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>830 505,64</b>		
<b>25</b>	<b>ФССЦ-01.5.02.01-0131</b>	<b>Стойка для экрана шумозащитного оцинкованная в комплекте с крепежными деталями СШ.1 (Автомобильные дороги)</b>	<b>т</b>			<b>8,747</b>		<b>24 262,83</b>	<b>212 226,97</b>		
<b>26</b>	<b>ФССЦ-01.7.15.03-0043</b>	<b>Болты строительные анкерные с гайками (ср.вес на 100м2 -0,034т) (Автомобильные дороги)</b>	<b>т</b>			<b>0,204</b>		<b>25 542,66</b>	<b>5 210,70</b>		
		Объем=0,034*6									
<b>Итого по разделу 3 Устройство шумозащитного полотна, Sэкp=600 кв.м.</b>									<b>1 047 943,31</b>		
<b>ВСЕГО по смете</b>									<b>1 173 084,38</b>		

Таблица А.3 – Локальный сметный расчёт (Смета). Акустические экраны (на фундаменте) высотой 8 м

№ п/п	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость в базисном уровне цен (в текущем уровне цен (гр. 8) для ресурсов, отсутствующих в СНБ), руб.			Индексы	Сметная стоимость в текущем уровне цен, руб.
				на единицу	коэффициенты	всего с учетом коэффициентов	на единицу	коэффициенты	всего		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Раздел 1. Земляные работы</b>											
<b>1</b>	<b>ФЕР01-01-022-15</b>	<b>Разработка грунта с погрузкой на автомобили-самосвалы в траншеях экскаватором «обратная лопата» с ковшем вместимостью 0,5 (0,5-0,63) м3, группа грунтов: 3</b> Объем=157,5 / 1000	<b>1000 м<sup>3</sup></b>			<b>0,1575</b>					
		2 ЭМ					4 100,00		645,75		
		3 в т.ч. ОТм ЗТм	чел.-ч	41		6,4575	553,50		87,18		
		Итого по расценке					4 100,00		645,75		
		ФОТ							87,18		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	92		92			80,21		
		СП Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	46		46			40,10		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>766,06</b>		
<b>2</b>	<b>ФЕР01-02-057-03</b>	<b>Разработка грунта вручную в траншеях глубиной до 2 м без креплений с откосами, группа грунтов: 3</b> Объем=(10% от 157,5) / 100	<b>100 м<sup>3</sup></b>			<b>0,158</b>					
	Прил.1.12 п.3.187	Доработка вручную, зачистка дна и стенок с выкидкой грунта в котлованах и траншеях, разработанных механизированным способом ОЗП=1,2; ТЗ=1,2									
		1 ОТ					1 934,40	1,2	366,76		
		ЗТ	чел.-ч	248	1,2	47,0208					
		Итого по расценке					1 934,40		366,76		
		ФОТ							366,76		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	89		89			326,42		
		СП Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	40		40			146,70		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>839,88</b>		
<b>3</b>	<b>ФЕР01-02-061-01</b>	<b>Засыпка дна траншеи. Засыпка вручную траншей, пазах котлованов и ям, группа грунтов: 1</b> Объем=13,5 / 100	<b>100 м<sup>3</sup></b>			<b>0,135</b>					
		1 ОТ					663,75		89,61		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		ЗТ	чел.-ч	88,5		11,9475					
		Итого по расценке					663,75		89,61		
		ФОТ							89,61		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	89		89			79,75		
		СП Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	40		40			35,84		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>205,20</b>		
<b>4</b>	<b>ФССЦ-02.3.01.02-0033</b>	<b>Песок природный обогащенный для строительных работ средний</b> (Земляные работы, выполняемые ручным способом)	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>14,85</b>	<b>70,60</b>		<b>1 048,41</b>		
<b>5</b>	<b>ФЕР01-01-033-04</b>	<b>Засыпка траншей и котлованов с перемещением грунта до 5 м бульдозерами мощностью: 79 кВт (108 л.с.), гр. грунтов 1</b>	<b>1000 м<sup>3</sup></b>			<b>0,04</b>					
		Объем=(80% от 45) / 1000									
	2	ЭМ					251,44		10,06		
	3	в т.ч. ОТм					42,93		1,72		
		ЗТм	чел.-ч	3,18		0,1272					
		Итого по расценке					251,44		10,06		
		ФОТ							1,72		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	92		92			1,58		
		СП Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	46		46			0,79		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>12,43</b>		
<b>6</b>	<b>ФЕР01-02-005-01</b>	<b>Уплотнение грунта пневматическими трамбовками, группа грунтов: 1-2</b> Объем=(0,04*1000) / 100	<b>100 м<sup>3</sup></b>			<b>0,4</b>					
	1	ОТ					106,88		42,75		
	2	ЭМ					241,58		96,63		
	3	в т.ч. ОТм					26,36		10,54		
		ЗТ	чел.-ч	12,53		5,012					
		ЗТм	чел.-ч	2,62		1,048					
		Итого по расценке					348,46		139,38		
		ФОТ							53,29		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	92		92			49,03		
		СП Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	46		46			24,51		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>212,92</b>		



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	ФЕР01-02-061-01	Засыпка вручную траншей, пазух котлованов и ям, группа грунтов: 1 Объем=(20% от 45) / 100	100 м <sup>3</sup>			0,09					
	1	ОТ					663,75		59,74		
		ЗТ	чел.-ч	88,5		7,965					
		Итого по расценке					663,75		59,74		
		ФОТ							59,74		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр	НР Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	89		89			53,17		
		СП Земляные работы, выполняемые ручным способом	%	40		40			23,90		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>136,81</b>		
8	ФССЦ-02.3.01.02-0033	Песок природный обогащенный для строительных работ средний (Земляные работы, выполняемые ручным способом)	м <sup>3</sup>			49,5	70,60		3 494,70		
Вывоз лишнего грунта и шлама (дальность перевозки 15км)											
9	ФССЦпг-03-21-01-015	Перевозка грузов автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т работающих вне карьера на расстояние: I класс груза до 15 км	1 т груза			196,88	13,38		2 634,25		
		<b>Итого по разделу 1 Земляные работы</b>							<b>9 350,66</b>		
<b>Раздел 2. Фундамент свайный с ростверком для устройства на больших насыпях</b>											
<b>Бурунабивные железобетонные сваи БНС-11-426 40 шт. (бетонирование методом вертикально перемещаемой трубы (ВПТ).</b>											
10	ФЕР05-01-029-0	Устройство железобетонных бурунабивных свай с бурением скважин вращательным (шнековым) способом в грунтах: 3 группы диаметром до 600 мм, длина свай до 12 м	м <sup>3</sup>			62,8					
	1	ОТ					21,55		1 353,34		
	2	ЭМ					203,75		12 795,50		
	3	в т.ч. ОТм					18,03		1 132,28		
	4	М					183,78		11 541,38		
		ЗТ	чел.-ч	2,32		145,696					
		ЗТм	чел.-ч	1,37		86,036					
		Итого по расценке					409,08		25 690,22		
		ФОТ							2 485,62		
	Приказ Минстроя России № 812/пр, №774/пр Прил. п.5.1	НР Свайные работы	%	117		117			2 908,18		
		СП Свайные работы	%	70		70			1 739,93		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>30 338,33</b>		
11	ФССЦ-04.1.02.05-0012	Смеси бетонные тяжелого бетона (БСТ), класс В35 (М450) (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	м <sup>3</sup>			64,06	963,73		61 736,54		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	ОП ФССЦ Прилож.15 п.4 к ФССЦ-04.1.02.05-0012 ОП ФССЦ Прилож.15 п.4 -4%	Надбавка к бетону (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве) Надбавка по морозостойкости (300-200=100/50=2*2%=4%) МАТ=0,04 к расх.	м <sup>3</sup>			62,8	879,12	0,04			2 208,35
13	ФССЦ-08.4.03.02-0001	Сталь арматурная, горячекатаная, гладкая, класс А-I, диаметр 6 мм (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	т			1,174	7 418,82				8 709,69
14	ФССЦ-08.4.03.02-0003	Сталь арматурная, горячекатаная, гладкая, класс А-I, диаметр 10 мм (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	т			0,096	6 726,18				645,71
15	ФССЦ-08.4.03.03-0036	Сталь арматурная, горячекатаная, периодического профиля, класс А-III, диаметр 25-28 (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	т			19,171	7 792,12				149 382,73
16	ФССЦ-08.3.07.01-0076	Прокат полосовой, горячекатаный, марка стали СтЗсп, ширина 50-200 мм, толщина 4-5 мм (5x100мм) (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	т			0,886	5 000,00				4 430,00
17	ФЕР04-02-011-01 (надфильтровых труб) в трубах большего диаметра: при шнековом бурении с соединением муфтовым	Свободный спуск или подъем обсадных труб Объем=48,4 / 10	10 м			4,84					
		1 ОТ					10,97				53,09
		2 ЭМ					29,29				141,76
		3 в т.ч. ОТм					3,71				17,96
		4 М					6,41				31,02
		ЗТ	чел.-ч	1,14		5,5176					
		ЗТм	чел.-ч	0,28		1,3552					
		Итого по расценке					46,67				225,87
		ФОТ									71,05
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр Прил. п.4	НР Скважины	%	106		106					75,31
		СП Скважины	%	45		45					31,97
		<b>Всего по позиции</b>									<b>333,15</b>
18	ФССЦ-23.3.01.04-0078	Трубы бесшовные обсадные из стали группы Д и Б с короткой треугольной резьбой, наружный диаметр 426 мм, толщина стенки 10 мм (Скважины) Объем=4,84*10	м			48,4	1 004,98				48 641,03
19	01.4.03.06-3306	Центраторы пружинные, типа ЦЦ4-324/394 (Скважины)	шт			2	495,46				990,92

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>20</b>	<b>ФЕР05-01-010-02</b>	<b>Вырубка бетона из арматурного каркаса железобетонных свай площадью сечения свыше 0,1 м2</b>	<b>шт</b>			<b>40</b>					
	1	ОТ					13,50		540,00		
	2	ЭМ					48,46		1 938,40		
	3	в т.ч. ОТм					5,23		209,20		
	4	М					0,78		31,20		
		ЗТ	чел.-ч	1,42		56,8					
		ЗТм	чел.-ч	0,52		20,8					
		Итого по расценке					62,74		2 509,60		
		ФОТ							749,20		
	Приказ Минстроя России № 812/пр, №774/пр Прил. п.5.1	НР Свайные работы	%	117		117			876,56		
		СП Свайные работы	%	70		70			524,44		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>3 910,60</b>		
<b>Монолитный железобетонный ростверк</b>											
<b>21</b>	<b>ФЕР08-01-002-02</b>	<b>Устройство основания под фундаменты: щебеночного</b>	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>9</b>					
	1	ОТ					6,75		60,75		
	2	ЭМ					8,29		74,61		
	3	в т.ч. ОТм					0,81		7,29		
	4	М					0,37		3,33		
		ЗТ	чел.-ч	0,85		7,65					
		ЗТм	чел.-ч	0,07		0,63					
		Итого по расценке					15,41		138,69		
		ФОТ							68,04		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр Прил. п.8	НР Конструкции из кирпича и блоков	%	110		110			74,84		
		СП Конструкции из кирпича и блоков	%	69		69			46,95		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>260,48</b>		
<b>22</b>	<b>ФССЦ-02.2.05.04-1767</b>	<b>Щебень М 400, фракция 20-40 мм, группа 2 (Конструкции из кирпича и блоков)</b>	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>10,35</b>	<b>91,50</b>		<b>947,03</b>		
<b>23</b>	<b>ФЕР11-01-011-01 применительно</b>	<b>Проливка цементным молочком. Устройство стяжек: цементных толщиной 20 мм</b>	<b>100 м<sup>2</sup></b>			<b>0,9</b>					
		Объем=(9/0,1) / 100									
	1	ОТ					282,66		254,39		
	2	ЭМ					43,61		39,25		
	3	в т.ч. ОТм					17,15		15,44		
	4	М					8,54		7,69		
		ЗТ	чел.-ч	35,6		32,04					

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		ЗТм	чел.-ч	1,27		1,143					
		Итого по расценке					334,81		301,33		
		ФОТ							269,83		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр Прил. п.11	НР Полю	%	112		112			302,21		
		СП Полю	%	65		65			175,39		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>778,93</b>		
<b>24</b>	<b>ФССЦ-04.3.01.09-0001</b>	<b>Раствор готовый кладочный цементный тяжелый (Полю)</b>	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>1,836</b>	<b>424,88</b>		<b>780,08</b>		
<b>25</b>	<b>ФЕР06-01-001-22</b>	<b>Устройство ленточных фундаментов: железобетонных при ширине по верху до 1000 мм</b> Объем=108 / 100	<b>100 м<sup>3</sup></b>			<b>1,08</b>					
		1 ОТ					3 189,60		3 444,77		
		2 ЭМ					3 499,23		3 779,17		
		3 в т.ч. ОТм					405,88		438,35		
		4 М					4 013,08		4 334,13		
		ЗТ	чел.-ч	360		388,8					
		ЗТм	чел.-ч	30,37		32,7996					
		Итого по расценке					10 701,91		11 558,07		
25.1	04.1.02.05	Смеси бетонные тяжелого бетона	м <sup>3</sup>	102		110,16	0,00				
		ФОТ							3 883,12		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр Прил. п.6	НР Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве	%	102		102			3 960,78		
		СП Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве	%	58		58			2 252,21		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>17 771,06</b>		
<b>26</b>	<b>ФССЦ-08.4.03.03-0005</b>	<b>Горячекатанная арматурная сталь класса А500 С, диаметром: 14 мм</b> (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	<b>т</b>			<b>1,694</b>	<b>5 488,69</b>		<b>9 297,84</b>		
<b>27</b>	<b>ФССЦ-08.4.03.03-0003</b>	<b>Горячекатанная арматурная сталь класса А500 С, диаметром: 10 мм</b> (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	<b>т</b>			<b>4,194</b>	<b>5 802,77</b>		<b>24 336,82</b>		
<b>28</b>	<b>ФССЦ-08.4.02.01-0021</b>	<b>Сетка арматурная сварная</b> (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	<b>т</b>			<b>0,2</b>	<b>7 200,00</b>		<b>1 440,00</b>		
<b>29</b>	<b>ФССЦ-04.1.02.05-0009</b>	<b>Смеси бетонные тяжелого бетона (БСТ), класс В25 (М350)</b> (Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве)	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>110,16</b>	<b>725,69</b>		<b>79 942,01</b>		
<b>30</b>	<b>ОП ФССЦ Прил.15 п.4 к ФССЦ-04.1.02.05-0009</b> ОП ФССЦ Пр.15 п.4 -6%	<b>Надбавка к бетону</b> Объем=1,08*100 Надбавка по морозостойкости (300-150=150/50=3*2%=6%) МАТ=0,06 к расх.	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>108</b>	<b>645,75</b>	<b>0,06</b>	<b>4 184,46</b>		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Деформационные швы</b>											
<b>31</b>	<b>ФЕРр52-6-1</b>	<b>Устройство осадочного шва из просмоленных досок для сопряжения существующих и пристраиваемых фундаментов</b>	<b>100 м<sup>2</sup></b>			<b>0,054</b>					
		Объем=5,4 / 100									
		1 ОТ					1 321,05		71,34		
		2 ЭМ					7,89		0,43		
		3 в т.ч. ОТм					1,39		0,08		
		4 М					2 597,86		140,28		
		ЗТ	чел.-ч	164,72		8,89488					
		ЗТм	чел.-ч	0,12		0,00648					
		Итого по расценке					3 926,80		212,05		
		ФОТ							71,42		
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр Прил. п.86	НР Фундаменты (ремонтно-строительные)	%	93		93			66,42		
		СП Фундаменты (ремонтно-строительные)	%	55		55			39,28		
		<b>Всего по позиции</b>							<b>317,75</b>		
<b>32</b>	<b>ФССЦ-01.2.03.03-0011</b>	<b>Мастика битумная гидроизоляционная МГ-1 (Фундаменты (ремонтно-строительные))</b>	<b>т</b>			<b>0,01674</b>	<b>7 669,69</b>		<b>128,39</b>		
<b>33</b>	<b>ФССЦ-11.1.03.06-0090</b>	<b>Доска обрезная, хвойных пород, ширина 75-150 мм, толщина 32-40 мм, длина 4-6,5 м, сорт II (Фундаменты (ремонтно-строительные))</b>	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>0,1701</b>	<b>1 430,00</b>		<b>243,24</b>		
<b>Защита бетонных поверхностей</b>											
<b>34</b>	<b>ФЕР08-01-003-07</b>	<b>Гидроизоляция боковая обмазочная битумная в 2 слоя по выровненной поверхности бутовой кладки, кирпичу, бетону</b>	<b>100 м<sup>2</sup></b>			<b>0</b>					
		Объем=() / 100									
		ПЗ=0,5 (ОЗП=0,5; ЭМ=0,5 к расх.; ЗПМ=0,5; МАТ=0,5 к расх.; ТЗ=0,5; ТЗМ=0,5)									
		1 ОТ					201,61	0,5	0,00		
		2 ЭМ					71,64	0,5	0,00		
		3 в т.ч. ОТм					2,32	0,5	0,00		
		4 М					84,88	0,5	0,00		
		ЗТ	чел.-ч	21,2	0,5						
		ЗТм	чел.-ч	0,2	0,5						
		Итого по расценке					358,13				
		ФОТ									
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр Прил. п.8	НР Конструкции из кирпича и блоков	%	110		110					
		СП Конструкции из кирпича и блоков	%	69		69					
		<b>Всего по позиции</b>							<b>0,00</b>		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
35	ФССЦ-01.2.03.03-0011	Мастика битумная гидроизоляционная МГ-1 (Конструкции из кирпича и блоков) Итого накладные расходы (справочно) Итого сметная прибыль (справочно)	т			0	7 669,69					8 264,30 4 810,17
<b>Итого по разделу 2 Фундамент свайный с ростверком для устройства на больших насыпях</b>									<b>451 755,14</b>			
<b>Раздел 3. Устройство шумозащитного полотна, S<sub>экр</sub>=800 кв.м.</b>												
36	ФЕР27-09-040-01	Устройство шумозащитного экрана из: панелей алюминиевых или стальных оцинкованных со звуко- поглощающими вкладышами Объем=800 / 100	100 м <sup>2</sup>			8						
	1	ОТ					911,52					7 292,16
	2	ЭМ					2 236,51					17 892,08
	3	в т.ч. ОТм					293,46					2 347,68
	4	М					132 606,57					1 060 852,56
		ЗТ	чел.-ч	105,5		844						
		ЗТм	чел.-ч	25,56		204,48						
		Итого по расценке					135 754,60					1 086 036,80
		ФОТ										9 639,84
	Приказ Минстроя России № 812/пр № 774/пр Прил. п.21	НР Автомобильные дороги	%	126		126						12 146,20
		СП Автомобильные дороги	%	95		95						9 157,85
		<b>Всего по позиции</b>										<b>1 107 340,85</b>
37	ФССЦ-01.5.02.01-0131	Стойка для экрана шумозащитного оцинкованная в комплекте с крепежными детальями СШ.1 (Автомобильные дороги)	т			12,543	24 262,83					304 328,68
38	ФССЦ-01.7.15.03-0043	Болты строительные анкерные с гайками (ср.вес на 100м2 -0,034т) (Автомобильные дороги) Объем=0,034*8	т			0,272	25 542,66					6 947,60
<b>Итого по разделу 3 Устройство шумозащитного полотна, S<sub>экр</sub>=800 кв.м.</b>									<b>1 418 617,13</b>			
<b>ВСЕГО по смете</b>									<b>1 879 722,93</b>			

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Сметы искусственных земляных сооружений

Таблица Б.1 – Локальный сметный расчёт (Смета). Насыпь высотой 4 м

№ п/п	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость в базисном уровне цен (в текущем уровне цен (гр. 8) для ресурсов, отсутствующих в СНБ), руб.		
				на единицу	коэффициенты	всего с учетом коэффициентов	на единицу	коэффициенты	всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Раздел 1. Насыпь высотой 4 м (уклон откосов 1:1, ширина верхней площадки 2,0 м)</b>									
<b>1</b>	<b>ФЕР01-01-044-05</b>	<b>Возведение насыпей из резервов экскаваторами "драг-лайн" с ковшом вместимостью: 0,65 м3, гр. грунтов 1</b> Объем=2400 / 1000	<b>1000 м<sup>3</sup></b>			<b>2,4</b>			
	1	ОТ					25,66		61,58
	2	ЭМ					2 676,27		6 423,05
	3	в т.ч. ОТм					368,55		884,52
		ЗТ	чел.-ч	3,29		7,896			
		ЗТм	чел.-ч	27,3		65,52			
		Итого по расценке					2 701,93		6 484,63
		ФОТ							946,10
Приказ Министра России № 812/пр №774/пр		НР Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	92		92			870,41
		СП Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	46		46			435,21
		<b>Всего по позиции</b>							<b>7 790,25</b>
<b>2</b>	<b>ФССЦ-02.3.01.02-0033</b>	<b>Песок природный обогащенный для строительных работ средний</b>	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>2640</b>	<b>70,60</b>		<b>186 384,00</b>
<b>3</b>	<b>ФЕР01-02-001-01</b>	<b>Уплотнение грунта прицепными катками на пневмоколесном ходу 25 т на первый проход по одному следу при толщине слоя: 25 см</b> Объем=2640 / 1000	<b>1000 м<sup>3</sup></b>			<b>2,64</b>			
	2	ЭМ					1 299,08		3 429,57
	3	в т.ч. ОТм					212,78		561,74
		ЗТм	чел.-ч	15,67		41,3688			
		Итого по расценке					1 299,08		3 429,57
		ФОТ							561,74
Приказ Министра России № 812/пр №774/пр		НР Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	92		92			516,80
		СП Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	46		46			258,40
		<b>Всего по позиции</b>							<b>4 204,77</b>
<b>4</b>	<b>ФЕР01-02-027-11</b>	<b>Планировка откосов и полотна: насыпей механизированным способом, группа грунтов 1</b> Объем=1330 / 1000	<b>1000 м<sup>2</sup></b>			<b>1,33</b>			
	1	ОТ					190,23		253,01
	2	ЭМ					259,04		344,52

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	3	в т.ч. ОТм					30,38		40,41
		ЗТ	чел.-ч	22,7		30,191			
		ЗТм	чел.-ч	2,25		2,9925			
		Итого по расценке					449,27		597,53
		ФОТ							293,42
Приказ Минстроя России № 812/пр №774/пр		НР Земляные работы, выполняемые по другим видам работ	%	89		89			261,14
		СП Земляные работы, выполняемые по другим видам работ	%	41		41			120,30
		<b>Всего по позиции</b>							<b>978,97</b>
<b>5</b>	<b>ФЕР01-02-040-02</b>	<b>Укрепление откосов земляных сооружений посевом многолетних трав: механизированным способом</b>		<b>100 м<sup>2</sup></b>		<b>13,3</b>			
		Объем=1330 / 100							
	2	ЭМ					255,18		3 393,89
	3	в т.ч. ОТм					29,05		386,37
	4	М					5,03		66,90
		ЗТм	чел.-ч	2,16		28,728			
		Итого по расценке					260,21		3 460,79
		ФОТ							386,37
Приказ Минстроя России № 812/пр №774/пр		НР Земляные работы, выполняемые по другим видам работ	%	89		89			343,87
		СП Земляные работы, выполняемые по другим видам работ	%	41		41			158,41
		<b>Всего по позиции</b>							<b>3 963,07</b>
<b>6</b>	<b>ФССЦ-16.2.01.02-0002</b>	<b>Земля растительная механизированной заготовки</b>		<b>м<sup>3</sup></b>		<b>210,14</b>		<b>131,90</b>	<b>27 717,47</b>
<b>7</b>	<b>ФССЦ-16.2.02.07-0161</b>	<b>Семена газонных трав (смесь)</b>		<b>кг</b>		<b>35,91</b>		<b>146,25</b>	<b>5 251,84</b>
<b>8</b>	<b>ФЕР01-02-041-01</b>	<b>Полив посевов трав водой</b>		<b>100 м<sup>2</sup></b>		<b>13,3</b>			
		Объем=1330 / 100							
	1	ОТ					11,43		152,02
	2	ЭМ					189,20		2 516,36
	3	в т.ч. ОТм					19,95		265,34
	4	М					12,44		165,45
		ЗТ	чел.-ч	1,59		21,147			
		ЗТм	чел.-ч	1,72		22,876			
		Итого по расценке					213,07		2 833,83
		ФОТ							417,36
Приказ Минстроя России № 812/пр №774/пр		НР Земляные работы, выполняемые по другим видам работ	%	89		89			371,45
		СП Земляные работы, выполняемые по другим видам работ	%	41		41			171,12
		<b>Всего по позиции</b>							<b>3 376,40</b>
		<b>ВСЕГО по смете</b>							<b>239 666,77</b>

Локальные сметные расчёты (Сметы) насыпей высотой 6 м и 8 м аналогичны смете насыпи 4 м.



Таблица Б.2 – Локальный сметный расчёт (Смета). Выемка высотой 4 м

№ п/п	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость в базисном уровне цен (в текущем уровне цен (гр. 8) для ресурсов, отсутствующих в СНБ), руб.		
				на единицу	коэффициенты	всего с учетом коэффициентов	на единицу	коэффициенты	всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Раздел 1. Выемка высотой 4 м (уклон откосов 1:1,5, ширина земляного полотна 15м – кат. АД II)</b>									
<b>2</b>	<b>ФЕР01-01-042-10</b>	<b>Разработка выемок с отсыпкой грунта в кавальеры экскаваторами "драглайн" с ковшом вместимостью: 0,5 м3 группа грунтов 2</b>	<b>1000 м<sup>3</sup></b>			<b>8,4</b>			
		Объем=8400 / 1000							
		1 ОТ					62,95		528,78
		2 ЭМ					4 443,03		37 321,45
		3 в т.ч. ОТм					633,15		5 318,46
		ЗТ	чел.-ч	8,07		67,788			
		ЗТм	чел.-ч	46,9		393,96			
		Итого по расценке					4 505,98		37 850,23
		ФОТ							5 847,24
Приказ Минстроя России № 812/пр, № 774/пр Прил. п.1.1		НР Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	92		92			5 379,46
		СП Земляные работы, выполняемые механизированным способом	%	46		46			2 689,73
		<b>Всего по позиции</b>							<b>45 919,42</b>
<b>4</b>	<b>ФЕР01-02-027-09</b>	<b>Планировка откосов и полотна: выемок механизированным способом, группа грунтов 2</b>	<b>1000 м<sup>2</sup></b>			<b>1,44</b>			
		Объем=1440 / 1000							
		1 ОТ					556,03		800,68
		2 ЭМ					290,05		417,67
		3 в т.ч. ОТм					35,51		51,13
		ЗТ	чел.-ч	72,4		104,256			
		ЗТм	чел.-ч	2,63		3,7872			
		Итого по расценке					846,08		1 218,35
		ФОТ							851,81
Приказ Минстроя России № 812/пр, № 774/пр Прил. п.1.4		НР Земляные работы, выполняемые по другим видам работ	%	89		89			758,11
		СП Земляные работы, выполняемые по другим видам работ (подготовительным, сопутствующим, укрепительным)	%	41		41			349,24
		<b>Всего по позиции</b>							<b>2 325,70</b>

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>5</b>	<b>ФЕР01-02-040-02</b>	<b>Укрепление откосов земляных сооружений посевом многолетних трав: механизированным способом</b> Объем=1440 / 100	<b>100 м<sup>2</sup></b>			<b>14,4</b>			
	2	ЭМ					255,18		3 674,59
	3	в т.ч. ОТм					29,05		418,32
	4	М					5,03		72,43
		ЗТм	чел.-ч	2,16		31,104			
		Итого по расценке					260,21		3 747,02
		ФОТ							418,32
Приказ Минстроя России № 812/пр, № 774/пр Прил. п.1.4		НР Земляные работы, выполняемые по другим видам работ	%	89		89			372,30
		СП Земляные работы, выполняемые по другим видам работ (подготовительным, сопутствующим, укрепительным)	%	41		41			171,51
		<b>Всего по позиции</b>							<b>4 290,83</b>
<b>6</b>	<b>ФССЦ-16.2.01.02-0002</b>	<b>Земля растительная механизированной заготовки</b> (Земляные работы, выполняемые по другим видам работ (подготовительным, сопутствующим, укрепительным))	<b>м<sup>3</sup></b>			<b>227,52</b>	<b>131,90</b>		<b>30 009,89</b>
<b>7</b>	<b>ФССЦ-16.2.02.07-0161</b>	<b>Семена газонных трав (смесь)</b> (Земляные работы, выполняемые по другим видам работ (подготовительным, сопутствующим, укрепительным))	<b>кг</b>			<b>38,88</b>	<b>146,25</b>		<b>5 686,20</b>
<b>8</b>	<b>ФЕР01-02-041-01</b>	<b>Полив посевов трав водой</b> Объем=1440 / 100	<b>100 м<sup>2</sup></b>			<b>14,4</b>			
	1	ОТ					11,43		164,59
	2	ЭМ					189,20		2 724,48
	3	в т.ч. ОТм					19,95		287,28
	4	М					12,44		179,14
		ЗТ	чел.-ч	1,59		22,896			
		ЗТм	чел.-ч	1,72		24,768			
		Итого по расценке					213,07		3 068,21
		ФОТ							451,87
Приказ Минстроя России № 812/пр, № 774/пр Прил. п.1.4		НР Земляные работы, выполняемые по другим видам работ	%	89		89			402,16
		СП Земляные работы, выполняемые по другим видам работ (подготовительным, сопутствующим, укрепительным)	%	41		41			185,27
		<b>Всего по позиции</b>							<b>3 655,64</b>
		<b>ВСЕГО по смете</b>							<b>91 887,68</b>

Локальные сметные расчёты (Сметы) выемок высотой 6 м и 8 м аналогичны смете выемки 4 м.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В. Смета лесопосадки

Таблица В.1 – Локальный сметный расчёт (Смета). Лесопосадка шириной 50м

№ п/п	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость в базисном уровне цен у.е.		
				на единицу	коэф.	всего с учетом коэффициентов	на единицу	коэф.	всего
Раздел 1. Лесопосадка шириной 50 м									
1	ФЕР47-01-008-01	Подготовка нестандартных посадочных мест для деревьев	10 м3			24			
		1 ОТ					46,25		1 110,00
		2 ЭМ					34,28		822,72
		3 в т.ч. ОТм					5,68		136,32
		ЗТ	чел.-ч	5,93		142,32			
		ЗТм	чел.-ч	0,49		11,76			
		Итого по расценке					80,53		1 932,72
		ФОТ							1 246,32
	Приказ Минстроя России № 812/пр, № 774/пр	НР Озеленение. Защитные лесонасаждения	%	103		103			1 283,71
		СП Озеленение. Защитные лесонасаждения	%	72		72			897,35
		Всего по позиции							4 113,78
2	ФЕР47-01-009-07	Посадка деревьев и кустарников с комом земли размером:	10 шт			40			
		1 ОТ					414,14		16 565,60
		2 ЭМ					362,77		14 510,80
		3 в т.ч. ОТм					40,64		1 625,60
		4 М					415,88		16 635,20
		ЗТ	чел.-ч	43,05		1722			
		ЗТм	чел.-ч	3,21		128,4			
		Итого по расценке					1 192,79		47 711,60
		ФОТ							18 191,20
	Приказ Минстроя России № 812/пр, № 774/пр	НР Озеленение. Защитные лесонасаждения	%	103		103			18 736,94
		СП Озеленение. Защитные лесонасаждения	%	72		72			13 097,66
		Всего по позиции							79 546,20
3	ФССЦ-16.2.02.03-0053	Сосна обыкновенная, высота 1,0-1,5 м (Озеленение. Защитные лесонасаждения)	шт			200	541,88		108 376,00
4	ФССЦ-16.2.02.05-0017	Можжевельник обыкновенный, высота 0,4-0,5 м (Озеленение. Защитные лесонасаждения)	шт			200	30,39		6 078,00
		ВСЕГО по смете							198 113,98

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акты внедрения

**«Утверждаю»:**

Начальник центра  
охраны окружающей среды  
Свердловской железной дороги –  
филиала ОАО «РЖД»



Рябухин Э.А.

2024 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Борцовой С.С.  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 1.3.7 – Акустика

Комиссия в составе заместителя начальника центра Коробициной И.С. и инженера по охране окружающей среды (эколог) 1 категории Лариной Е.А. составила настоящий акт о том, что по результатам диссертационной работы Борцовой Светланы Сергеевны «Методика выбора и оптимизации шумозащитного комплекса при проектировании автомобильных и железных дорог» разработаны «Методические указания по выбору шумозащитных мероприятий при выявлении сверхнормативного акустического воздействия от объектов железнодорожного транспорта», которые применяются в работе Центра охраны окружающей среды Свердловской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Использование разработанной в диссертационной работе методики позволяет более точно определить акустическую эффективность шумозащитного комплекса, в зависимости от параметров конструкций в его составе, и выбрать экономически оптимальный вариант на долгосрочную перспективу, сократив затраты на шумозащитные мероприятия для объектов железнодорожного транспорта.

Заместитель начальника центра

Коробицина И.С.

Инженер по охране окружающей  
среды (эколог) 1 категории

Ларина Е.А.

«УТВЕРЖДАЮ»  
И.о. ректора ФГБОУ ВО  
БГТУ «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова  
д.т.н., профессор



А.Е. Шашурин

2024 г.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Генеральный директор  
ООО «ТранспроектИнжиниринг»  
д.т.н.



Н.Н. Минина

2024 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Комиссия в составе генерального директора, д.т.н. Н.Н. Мининой и заместителя генерального директора – директора по инженерной экологии А.В. Савченко составила настоящий акт о том, что методика оптимизации комплекса мероприятий по снижению транспортного шума, разработанная соискателем учёной степени кандидата технических наук С.С. Борцовой (научная специальность 1.3.7 - Акустика), использована в ООО «ТранспроектИнжиниринг» для выполнения акустических расчетов при проектировании транспортной инфраструктуры.

Использование результатов диссертационной работы С.С. Борцовой позволяет сократить время на выбор эффективного комплекса шумозащитных мероприятий автомобильных дорог и других линейных объектов и точнее спрогнозировать затраты на их реализацию.

От ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова

Старший преподаватель  
кафедры Е5 «Экология и  
производственная безопасность»

 С.С. Борцова

От ООО «ТранспроектИнжиниринг»

Заместитель генерального директора –  
Директор по инженерной экологии  
ООО «ТранспроектИнжиниринг»

 А.В. Савченко





"УТВЕРЖДАЮ"  
И.о. ректора ФГБОУ ВО  
БГТУ «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова  
А.Е. Шашурин  
«6» \_\_\_\_\_ 2024 г.



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

Комиссия в составе начальника учебного управления М.В. Прудниковой, и.о. декана факультета Е "Оружие и системы вооружения" Е.А. Знаменского и и.о. заведующего кафедрой Е5 "Экология и производственная безопасность" А.Ю. Олейникова составила настоящий акт о том, что материалы диссертационного исследования Борцовой Светланы Сергеевны, старшего преподавателя кафедры «Экология и производственная безопасность» ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», внедрены и используются в учебном процессе по направлению подготовки бакалавриата 20.03.01 «Техносферная безопасность» и направлению подготовки магистратуры 20.04.01 «Техносферная безопасность».

Результаты исследований Борцовой С.С. легли в основу ряда разделов лекций и практических работ по дисциплинам "Основы виброакустики" и «Разработка шумовиброзащитных мероприятий».

Начальник учебного управления		М.В. Прудникова
И.о. декана факультета Е "Оружие и системы вооружения"		Е.А. Знаменский
И.о. заведующего кафедрой Е5 "Экология и производственная безопасность"		А.Ю. Олейников
Ст. преподаватель кафедры Е5 "Экология и производственная безопасность"		С.С. Борцова