

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



На правах рукописи

КОНДРАТЬЕВ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**РАСЧЕТ И СНИЖЕНИЕ ШУМА ЭКРАНАМИ
В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ С РАЗЛИЧНЫМИ
АКУСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

1.3.7 – Акустика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Тюрина Наталья Васильевна

Санкт-Петербург
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	13
1.1 Краткое описание объектов исследования	13
1.2 Нормы шума на рабочих местах.....	14
1.3 Характеристики шума в производственных помещениях	17
1.4 Средства и методы снижения шума на рабочих местах в производственных помещениях	18
1.5 Акустика помещений	21
1.6 Теория и расчёт акустической эффективности АЭ	24
1.7 Проектирование АЭ	30
1.8 Основные задачи исследования.....	34
ГЛАВА II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМА И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ	36
2.1. Краткое описание объектов исследования	36
2.2. Методики измерений	36
2.2.1. Измерительная аппаратура и оборудование.....	36
2.2.2. Методика измерения шума на рабочих местах и в рабочих зонах	38
2.2.3. Методика измерения времени реверберации в помещениях	39
2.3. Шум на рабочих местах и в рабочих зонах предприятий	40
2.3.1. Фабрика в г. Санкт-Петербурге.....	40
2.3.2 Фабрика №1 в г. Москве.....	42
2.3.3 Фабрика №2 в г. Москве.....	45
2.3.4 Фабрика в г. Пермь	46
2.4 Анализ акустических свойств производственных помещений	50
2.4.1 Общие сведения.....	50
2.4.2 Измерения и расчеты акустических параметров производственных помещений.....	52

2.4.3 Анализ акустических свойств производственных помещений.....	59
2.5 Классификация производственных помещений	63
Выводы по главе	64
Глава III. РАСЧЕТ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭ	66
3.1. Расчёт снижения шума АЭ по ГОСТ 31287.....	66
3.2. Основные допущения. Границы расчетов	69
3.3. Расчёт эффективности АЭ в помещении в зоне действия прямого и отраженного звука.....	74
3.4 Расчет эффективности АЭ в помещении в зоне действия отраженного звука	78
Выводы по главе:	81
Глава IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ	83
4.1 Краткое описание опытного стенда	83
4.2 Методика проведения испытаний АЭ в свободном звуковом поле	85
4.2.1 Опытные акустические экраны	85
4.2.2 Методика измерений	89
4.3 Анализ результатов измерений АЭ в свободном звуковом поле	90
4.3.1 Зависимость эффективности АЭ от размеров.....	90
4.3.2 Зависимость эффективности акустического экрана от формы	92
4.3.3 Влияние звукопоглощения на эффективность акустического экрана	94
4.4 Экспериментальные исследования АЭ в помещении	96
4.5 Значения экспериментальных поправок в расчёты АЭ в помещениях	102
4.6 Рекомендации по проектированию и установке АЭ в производственных помещениях	103
4.8 Апробация предложенных решений на практике	105
Выводы по главе	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	117
Приложение А. Данные испытаний опытных АЭ в свободном звуковом поле	129
Приложение Б. Данные испытаний АЭ в опытном помещении	148
Приложение В. Акты внедрения	159

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭ — акустический экран

ГОСТ — государственный стандарт

ИШ — источник шума

ЗПМ — звукопоглощающий материал

НТД — нормативно-техническая документация

РТ — расчетная точка

РВ — точка измерения времени реверберации

СанПиН — санитарные правила и нормы

СП — свод правил

ТИ — точка измерения

УЗД — уровни звукового давления

УЗ — уровни звука

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Шум является одним из наиболее распространенных опасных и вредных производственных факторов в замкнутых объемах производственных помещений. Производственные помещения характеризуются наличием сложных звуковых полей, формируемых прямым шумом оборудования, станков и промышленных установок, а также наличием множественных отражений в помещении, что приводит к несоблюдению требований норм по шуму на рабочих местах и в рабочих зонах. Согласно современным исследованиям, число работающих, подвергающихся воздействию повышенного шума, на отдельных производствах может достигать 2/3 от общего числа. Таким образом, обеспечение нормативного уровня звука на рабочих местах в помещениях является важной социально-экономической задачей.

Благодаря усилиям отечественных и зарубежных ученых и инженеров, наука и практика накопили солидный арсенал средств и методов шумозащиты на производстве: звукоизолирующие кабины, звукоизолирующие капоты и кожухи, звукопоглощающие панели и облицовки, виброизолирующие системы, вибродемпфирующие покрытия и другие. Среди шумозащитных средств особое место занимают акустические экраны, преимуществами которых являются эффективность снижения шума, а также простота конструкции. Учитывая, что во многих производственных помещениях, например, в цехах металлообработки, печатных и ткацких цехах наиболее высокие превышения по шуму отмечаются, как правило, в средне- и высокочастотном диапазонах, акустические экраны могли бы быть в них использованы для снижения шума. Несмотря на указанные возможности, применение АЭ для защиты от шума в помещениях промышленных предприятий носит эпизодический характер. Несколько более широко применяются АЭ для защиты от шума в офисах, но масштабы этого использования ни в какое сравнение не идут с масштабами применения АЭ для снижения акустического загрязнения окружающей среды, например, для борьбы с транспортным шумом. Одной из причин ограниченного применения экранов для

снижения шума в производственных помещениях является значительное влияние на эффективность АЭ отраженного звука. Для решения данной проблемы необходимо проведение дополнительных исследований.

Вопросами снижения шума, в том числе, в замкнутых объемах и в производственных помещениях, а также исследованиями эффективности акустических экранов занимались известные отечественные учёные А. И. Антонов, И. И. Боголепов, Л. А. Борисов, М. В. Буторина, В. П. Гусев, Н. И. Иванов, В. И. Зaborов, А. Е. Жданов, О. А. Жоголева, В. Ю. Кирпичников, И. И. Клюкин, С. Д. Ковригин, С. И. Крышов, Д. А. Куклин, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, Г. Л. Осипов, М. В. Сергеев, А. П. Тюрин, Н. В. Тюрина, И. Е. Цукерников, А. Е. Шашурин, И. Л. Шубин, Е. Я. Юдин и др., а за рубежом Л. Беранек, М. Крокер, Г. Куттруф, Д. Маекава, У. Курце, Дж. Аренас, С. Редферн, М. Чехович, Дж. Чатилон, Р. Чеверт и другие. Выполненные ими работы представляют немалую научную ценность, однако имеется ряд вопросов, которые являются не до конца изученными и требуют специальных исследований, включая влияние акустических свойств помещений, а также формы и конструктивных параметров АЭ на акустическую эффективность АЭ. Кроме того, актуальной задачей является разработка методов расчета АЭ в помещениях и их верификация путем экспериментальных исследований.

Целью работы является исследование эффективности акустических экранов в замкнутых объемах с различными акустическими свойствами для научного обоснования и разработки метода расчета эффективности АЭ и создания рекомендаций по проектированию АЭ в помещениях.

Научно-техническая гипотеза: эффективность АЭ в помещениях зависит от акустических свойств и характеристик помещения, а также от формы, конструктивных параметров, акустических свойств и расположения АЭ относительно источника шума и защищаемого объекта.

Объекты исследования: акустические экраны, замкнутые объемы на примере производственных помещений.

Предмет исследования: закономерности формирования звуковых полей в производственных помещениях с различными акустическими свойствами и снижение шума в них акустическими экранами.

Задачи исследования:

- выполнение экспериментальных исследований характеристик шума на рабочих местах и в рабочих зонах производственных помещений и определение требований к его снижению;
- изучение механизмов формирования звуковых полей в производственных помещениях с целью разработки классификации производственных помещений в зависимости от их акустических свойств;
- анализ методики расчета эффективности акустического экрана в рабочих помещениях, основанной на оптико-дифракционной теории, с целью оценки ее пригодности для определения акустической эффективности экранов в производственных помещениях;
- разработка метода расчета эффективности акустического экрана при расположении защищаемого объекта в области прямого и отраженного звука в помещении;
- разработка методики испытаний АЭ и опытного стенда и выполнение экспериментальных исследований эффективности АЭ в свободном звуковом поле и в помещении с целью установления влияния формы и основных конструктивных параметров АЭ, а также акустических свойств помещений на эффективность акустического экрана;
- определение экспериментальных поправок, учитывающих влияние акустических свойств помещения и формы АЭ на эффективность АЭ;
- разработка рекомендаций по проектированию АЭ для снижения шума в производственных помещениях;

- выполнение аprobации разработанных решений в условиях производства.

Научная новизна:

1. Предложена классификация производственных помещений в зависимости от их акустических качеств, определяемых выбранным критерием - значением среднего коэффициента звукопоглощения ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$).

2. Разработана методика расчёта эффективности акустических экранов, расположенных в производственных помещениях, включающая расчёт в области прямого и отраженного звука с полученными экспериментальными поправками на влияние акустических свойств помещения и форму АЭ, а также расчёт в области отраженного звука, где влияние акустических свойств помещения учитывается теоретически.

3. Исследована зависимость эффективности АЭ от акустических характеристик помещения, а также от формы, размеров, акустических характеристик материала АЭ и особенностей установки АЭ в помещении.

4. Определена взаимосвязь эффективности АЭ в помещениях с акустическими свойствами последних, определяемых выбранным критерием, согласно предложенной классификации.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Получены характеристики шума на рабочих местах и в рабочих зонах в производственных помещениях бумагопечатных и чеканных предприятий, определены требования по снижению шума.

2. Изучены акустические свойства производственных помещений, показаны пределы улучшения акустических характеристик, влияющих на эффективность АЭ, установленных в помещениях.

3. Предложена классификация производственных помещений в зависимости от их акустических качеств, определяемых выбранным критерием - значением среднего коэффициента звукопоглощения ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$).

4. Получены данные о влиянии параметров производственных помещений и АЭ (форма, размеры, наличие звукоглощающего материала) на акустическую эффективность АЭ, что позволяет проектировать АЭ в помещениях с улучшенными характеристиками снижения шума.

5. Разработана методика расчёта эффективности АЭ в помещении, позволяющая оценить уровень снижения шума экраном на стадии проектирования с учётом влияния прямого и отраженного звука.

6. Разработаны рекомендации по проектированию АЭ для снижения шума на рабочих местах и в рабочих зонах в производственных помещениях, выполнена апробация предложенных решений.

Научная задача: научное обоснование и разработка метода расчёта АЭ в замкнутых объемах во взаимосвязи с их акустическими свойствами и параметрами АЭ на примере производственных помещений.

На защиту выносятся:

1. Акустические характеристики производственных помещений на предприятиях бумагопечатных и чеканных предприятий и требования к снижению шума на рабочих местах и в рабочих зонах.

2. Классификация производственных помещений в зависимости от их акустических характеристик по выбранному критерию $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$.

3. Методика расчёта эффективности акустических экранов, расположенных в производственных помещениях, включающая расчёт в области прямого и отраженного звука с полученными экспериментальными поправками на влияние акустических свойств помещения и форму АЭ, а также расчёт в области отраженного звука, где влияние акустических свойств помещения учитывается теоретически.

4. Методика экспериментальных исследований эффективности АЭ в зависимости от акустических свойств помещения и АЭ, его формы, размеров и расположения.

5. Установленная связь параметров АЭ (размеры, форма, звукопоглощение) и их расположения относительно источника шума и защищаемого объекта с их акустической эффективностью.

6. Установленные зависимости акустической эффективности АЭ от акустических свойств производственных помещений.

7. Рекомендации по проектированию и применению АЭ в производственных помещениях.

8. Результаты апробации применения акустического экрана для снижения шума в производственном цехе.

Методология и методы исследования

Теоретической и методологической основой диссертационной работы служат фундаментальные понятия и прикладные аспекты акустики помещений с использованием основ статистической и геометрической теории акустики. При проведении исследований использованы современные методы системного анализа, математического моделирования и статистической обработки данных. Экспериментальные исследования выполнены с учетом требований действующих нормативных документов.

Степень достоверности результатов диссертационного исследования подтверждена успешной апробацией и внедрением полученных результатов в практику проектирования шумозащитных мероприятий, а также доказана в ходе натурных экспериментов, выполненных в свободном звуковом поле и в помещении с различными акустическими свойствами с использованием прецизионной акустической аппаратуры, современных методик акустических измерений, методов обработки данных, оценки погрешности измерений. Результаты теоретических и экспериментальных исследований эффективности акустических экранов сопоставимы. Методики проведенных экспериментальных исследований разработаны с учетом действующих нормативных документов.

Апробация результатов исследования

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на X Всероссийской научно-практической конференции с

международным участием «Защита от шума и вибрации», г. Санкт-Петербург, 1-3 октября 2025 г., а также были представлены и обсуждались на заседании кафедры Е5 «Техносферная безопасность и вычислительная механика» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в 2025 году.

Внедрение результатов исследования

Основные результаты исследований, приведенных в диссертационной работе, нашли применение:

- при разработке шумозащитных мероприятий на рабочем месте слесаря механосборочных работ в цехе металлообработки ООО «ОмегаТех», где был установлен П-образный акустический экран, а на потолке размещены штучные (функциональные) звукопоглотители;
- в образовательном процессе ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в учебно-методических материалах курсов лекций и практических работ по дисциплинам «Основы виброакустики» и «Разработка шумовиброзащитных мероприятий» по направлению подготовки бакалавриата 20.03.01 «Техносферная безопасность».

Личный вклад соискателя заключается в том, что автор выполнил в полном объеме обзор литературных источников, научное обоснование и разработку метода расчёта эффективности акустических экранов в помещениях, а также экспериментальные исследования экранов в помещениях с различными акустическими свойствами и в свободном звуковом поле, а также провел обработку результатов экспериментальных исследований и разработал рекомендации, осуществив их проверку на практике. Диссертационная работа в полном объёме является самостоятельным исследованием. В работах, написанных в соавторстве, автор выявил зависимости исследуемых параметров, сформулировал выводы по проведённым исследованиям, описал проводимые эксперименты и их результаты.

Публикации:

Результаты диссертационного исследования опубликованы в научных изданиях и сборнике научных трудов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от шума и вибрации». Всего по тематике диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе, 5 - в рецензируемом журнале, входящем в Перечень ведущих научных журналов, рекомендованный ВАК Минобрнауки РФ (категория К2).

Соответствие научно-квалификационной работы паспорту научной специальности

Тема и содержание диссертации соответствует пункту 6 предметной области научной специальности 1.3.7 «Акустика», отрасль науки – технические науки: «6. Акустика газовых сред, аэроакустика, приём и обработка звуковых сигналов в воздухе, мониторинг источников акустического шума в атмосфере, акустическая экология».

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 108 наименований и трех приложений; изложена на 161 стр. машинописного текста (34 стр. приложений), в том числе, содержит 34 рисунка и 34 таблицы.

Автор выражает благодарность своим коллегам – сотрудникам кафедры «Техносферная безопасность и вычислительная механика» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, научному руководителю – доктору технических наук Тюриной Наталье Васильевне, а также Васильеву Александру Петровичу – старшему преподавателю кафедры «Техносферная безопасность и вычислительная механика» за возможность использования оборудования и неоценимую помощь при проведении испытаний.

ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Краткое описание объектов исследования

Исследования акустических характеристик производственных помещений, а также измерения уровней шума на рабочих местах и в рабочих зонах выполнены на примере четырёх бумагопечатных и чеканных предприятий, расположенных в городах Москва, Санкт-Петербург и Пермь. Экспериментальные исследования осуществлялись внутри производственных помещений указанных предприятий.

Помимо перечисленных предприятий, объектами исследования являлись акустические экраны (АЭ) различного конструктивного исполнения, которые испытывались как в свободном звуковом поле (Рисунок 1.1), так и в замкнутом объеме (Рисунок 1.2). В качестве замкнутого объема использовалось опытное испытательное помещение, в котором на первом этапе отсутствовало какое-либо звукопоглощение (помещение характеризовалось высокой реверберацией), а затем помещение поэтапно оборудовалось звукопоглощающим материалом (ЗПМ) для того, чтобы последовательно изменять и исследовать его акустические свойства и их влияние на эффективность АЭ.



Рисунок 1.1 — Вид испытываемого АЭ в свободном звуковом поле



Рисунок 1.2 — Вид испытываемого плоского вертикального АЭ в помещении

1.2 Нормы шума на рабочих местах

Нормативные требования к шуму на рабочих местах определены [1, 2].

Согласно [1] гигиеническими нормативами, используемыми для оценки уровней воздействия шума на рабочих местах, являются:

- эквивалентный уровень звука, дБА, как уровень, действующий на работающего за рабочую смену (измеренный или рассчитанный относительно 8 ч рабочей смены);

- максимальные уровни звука А, измеренные с временными коррекциями S и I, дБА, как наибольшая величина уровня звука, измеренная на заданном интервале времени со стандартной временной коррекцией;

- пиковый корректированный по С уровень звука, дБС.

Нормативным эквивалентным уровнем звука на рабочих местах, согласно [1], является 80 дБА. Максимальными уровнями звука А, измеренными с временными коррекциями S и I, являются 110 дБА и 125 дБА, соответственно. Пиковым корректированным по С уровнем звука является 137 дБС.

Согласно [2] шум нормируется в зависимости от назначения производственного помещения (Таблица 1.1), при этом нормируемыми параметрами на рабочих местах являются:

- уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со средними геометрическими частотами 31, 63,...8000 Гц и корректированные по А уровни звука, дБ, для постоянного шума;
- корректированные по А эквивалентные и максимальные уровни звука, дБ, для непостоянного шума.

Таблица 1.1 — Нормируемые параметры шума в зависимости от назначения производственного помещения

Назначение помещений	Для источников постоянного шума										Для источников непостоянного шума	
	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц										Уровень звука, кор.по А, дБ	Эквив. кор. по А уровень звука, дБ
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000			
Рабочие помещения административно-управленческого персонала производственных предприятий	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65	65	80
Рабочие помещения диспетчерских служб, кабины наблюдения и дистанционного управления с речевой связью по телефону, участки точной сборки, телефонные и телеграфные станции	100	87	79	72	68	65	63	61	59	70	70	85

Продолжение таблицы 1.1

Назначение помещений	Для источников постоянного шума										Для источников непостоянного шума	
	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц										Уровень звука, кор-ный по А, дБ	Эквив. кор. по А уровень звука, дБ
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000			
Помещение лабораторий для проведения экспериментальных работ, измерительных и аналитических работ, кабины наблюдения и дистанционного управления без речевой связи по телефону	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75	75	90
Помещения с постоянными рабочими местами производственных предприятий, территории предприятий с постоянными рабочими местами	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80	80	95

Продолжение таблицы 1.1

Назначение помещений	Для источников постоянного шума										Для источников непостоянного шума		
	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц										Уровень звука, кор. по А, дБ	Эквив. кор. по А уровень звука, дБ	Макс. кор. по А уровень звука, дБ
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000				
Помещения офисов, рабочие помещения и кабинеты административных зданий, конструкторских, проектных и научно-исследовательских организаций	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50	50	65	

1.3 Характеристики шума в производственных помещениях

Вопрос о характере шума в производственных помещениях и о характеристиках шума на рабочих местах изучен достаточно подробно [3-23, 32-33, 39]. В литературе описаны как источники шума и их акустические характеристики, так и характеристики шума в производственных помещениях. Этим вопросам посвящены работы Г. Л. Осипова [32, 33], Н. И. Иванова [3, 5, 6], А. И. Антонова [7], В. И. Леденева [8], И. Л. Шубина [13], М. В. Буториной [3], А. В. Васильева [17], Б. Ч. Месхи [16], А. Н. Чукарина [21], И. Е. Цукерникова [23], А. Е. Шашурина [6, 39] и других авторов, где описаны параметры шума на рабочих местах, а также требования к его снижению и рекомендуемые мероприятия. На основании анализа рассмотренных источников можно сделать следующие выводы.

1. На всех производствах шум превышает действующие нормы, но превышения имеют место не для всех рабочих мест. По официальной отечественной статистике более чем на 27% рабочих мест на различных

производствах зарегистрированы превышения шума [4]. Болезни, вызванные повышенным шумом и вибрацией, составляют 30-35% от общего числа профессиональных заболеваний. Наиболее шумные отрасли: металлургия, производство строительных материалов, лёгкая промышленность. Величина превышения шума составляет, в среднем, от 5 до 15 дБА, но на некоторых производствах, например, в производстве строительных материалов (обработка, дробление камня) имеют место превышения шума на рабочих местах более чем на 30 дБА. На наш взгляд, вряд ли можно найти производства, на всех рабочих местах которых шум находится в норме.

2. Каждое производство имеет свою специфику шума, характеризующуюся не только величинами превышения норм шума и числом рабочих мест с повышенными уровнями шума, но и особенностями процессов шумообразования, спектральными характеристиками, числом источников шума, процессами образования шума на рабочих местах и даже видом мест нахождения работников на местах с повышенным шумом (постоянные рабочие места, рабочие зоны и прочее). Из сказанного следует вывод о том, что любое производство, характеристики шума которого не были исследованы, требует отдельного изучения. Этот вывод полностью относится к объектам настоящего исследования - бумагопечатным и чеканным производствам, где сотрудники находятся как на постоянных рабочих местах, так и в рабочих зонах. Таким образом, первая задача исследования — измерить шум на рабочих местах и в рабочих зонах основных производств (в цехах и на производственных участках), выполнить анализ полученных характеристик, определить величины превышения, характер превышений шума и величины требуемого снижения шума.

1.4 Средства и методы снижения шума на рабочих местах в производственных помещениях

Литература, посвященная средствам и методам снижения шума, чрезвычайно обширна [3, 5, 6, 9, 11-33, 51, 52]. По данным [3], а также в соответствии с ГОСТ 12.1.029-80 [38], все средства защиты от шума на производстве по отношению к

источнику шума и защищаемому объекту (расчетной точке) в соответствии с рисунком 1.3 подразделяются на:

- снижающие шум в источнике образования;
- снижающие шум на пути распространения от ИШ до рабочего места;
- снижающие шум на рабочем месте.

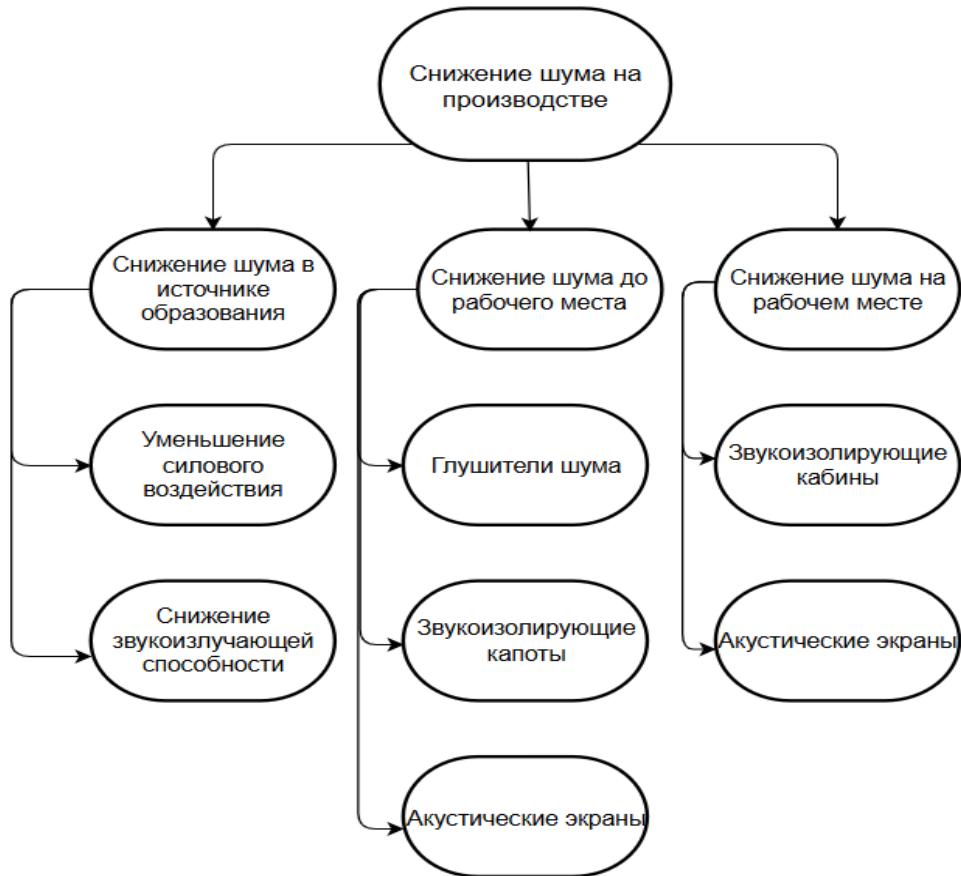


Рисунок 1.3 — Основные средства защиты от шума на производстве

Снижение шума в источнике образования достигается:

- снижением силового воздействия (например, уменьшением частоты вращения механизма или скорости движения);
- уменьшением звукоизлучения ИШ (например, уменьшением площади звукоизлучающих поверхностей, увеличением коэффициента потерь материала излучающей звук поверхности).

Опыт производства, а также данные научной литературы, показывают, что эта снижение шума в источнике образования на производстве чрезвычайно редко используются.

Снижение шума по пути распространения. С этой целью наиболее часто используются глушители шума, звукоизолирующие капоты и кожухи, а также акустические экраны (АЭ), устанавливаемые вблизи ИШ [22-34, 39].

Снижение шума на рабочих местах достигается установкой звукоизолирующих кабин, в которых располагается рабочее место, а также акустических экранов, снижающих воздействия шума на работающих как на рабочем месте, так и в рабочей зоне.

Данные экспериментов показывают, что установкой, например, звукоизолирующих кабин в производственных помещениях шум может быть снижен до 20-25 дБА [35-36, 40], при этом эффективность акустических экранов не превышает 15 дБА. Следует отметить, что несмотря на меньшую эффективность, АЭ имеет ряд преимуществ, а именно, существенно меньшую стоимость, удобство локализации, возможность использования для защиты персонала, находящегося в рабочей зоне, простота конструкции и другие. Настоящая работа посвящена изучению акустической эффективности АЭ для снижения шума на рабочих местах и в рабочих зонах производственных помещений.

Вопросам снижения шума акустическими экранами посвящены исследования А. И. Антонова [22], Н.В. Тюриной [15, 51-58], И.Л. Шубина [30, 31, 41], Г.Д. Изака [43], Э.А. Гомзикова [29], Л.Н. Пятаковой [44], С.А. Рыбака [45], О.Н. Поболя [46], В.А. Бондаренко [86], А. Е. Шашурина [97, 98] в нашей стране, а также Б. Коэлхо [47], З. Маекавы [48-50], Д. Дюамеля [78], У. Курзе [80] и других за рубежом.

Среди прочих работ отметим исследования Н.В. Тюриной [51-52], которая рассматривала АЭ в помещении, в качестве средства, снижающего прямой звук от ИШ и доказала, что эффективность АЭ существенно зависит от акустических свойств помещений в связи с наличием отраженного звука.

Для повышения точности расчетов эффективности акустических экранов, установленных в производственных помещениях, детальному изучению подлежат

два взаимосвязанных вопроса: как влияет изменение акустических свойств помещения на эффективность АЭ и какими акустическими свойствами характеризуются производственные помещения.

1.5 Акустика помещений

Вопрос акустики помещений достаточно подробно отображен в литературе [59-78]. Опираясь на основные положения, изложенные в монографии Ю. П. Щевьева [68], рассмотрим вкратце особенности звукового поля в помещении. Помещение существенно преобразует звуковое поле ИШ, в первую очередь, из-за большого количества отражений звука от ограждающих и других поверхностей помещения. Сам объем помещения, будучи трёхмерным пространством, обладает набором собственных частот, на которых происходят процессы усиления звука. С увеличением частоты количество собственных частот колебаний увеличивается. Значение собственных частот, Гц, колебаний определяется по формуле:

$$f_{1,2,\dots} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_1}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{l_2}\right)^2 + \left(\frac{n_3}{l_3}\right)^2}, \quad (1.1)$$

где c – скорость звука в воздухе м/с;

n_1, n_2, n_3 – целые числа ($0, 1, 2, 3 \dots$);

l_1, l_2, l_3 – линейные размеры помещения, м.

Воздух в объеме помещения рассматривается как набор резонаторов в форме стоячих волн, которые будут затухать, если действие источника прекращается. Затухание свободных колебаний в помещении называется реверберацией. Стандартное время реверберации, за которое звук в помещении затухает на 60 дБ является важной акустической характеристикой помещения.

Время реверберации помещения — измеряемая характеристика. Хотя в отдельных работах [70-71] встречаются расчётные методы, позволяющие определять время реверберации, примем экспериментальный метод за основу получения исходных акустических характеристик производственных помещений.

Обратим внимание на то, что время реверберации является важной характеристикой театральных, спортивных и других помещений аналогичного назначения [72-75]. Для производственных помещений необходимо использовать более универсальные характеристики, к которым, относится, в первую очередь, значение среднего звукопоглощения в помещении ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}$). Эта характеристика, также, как и время реверберации, имеет частотно-зависимый характер. Таким образом, одной из задач исследования является изучение акустических характеристик производственных помещений с учетом опыта других исследователей [76-77] путём измерений в них времени реверберации с последующим вычислением и анализом среднего коэффициента звукопоглощения.

На рисунке. 1.4 показаны значения времени реверберации помещений различного назначения. Характерен рост времени реверберации с увеличением объема помещения.

Пример собственных частот помещения, согласно [68], представлен в таблице 1.2.

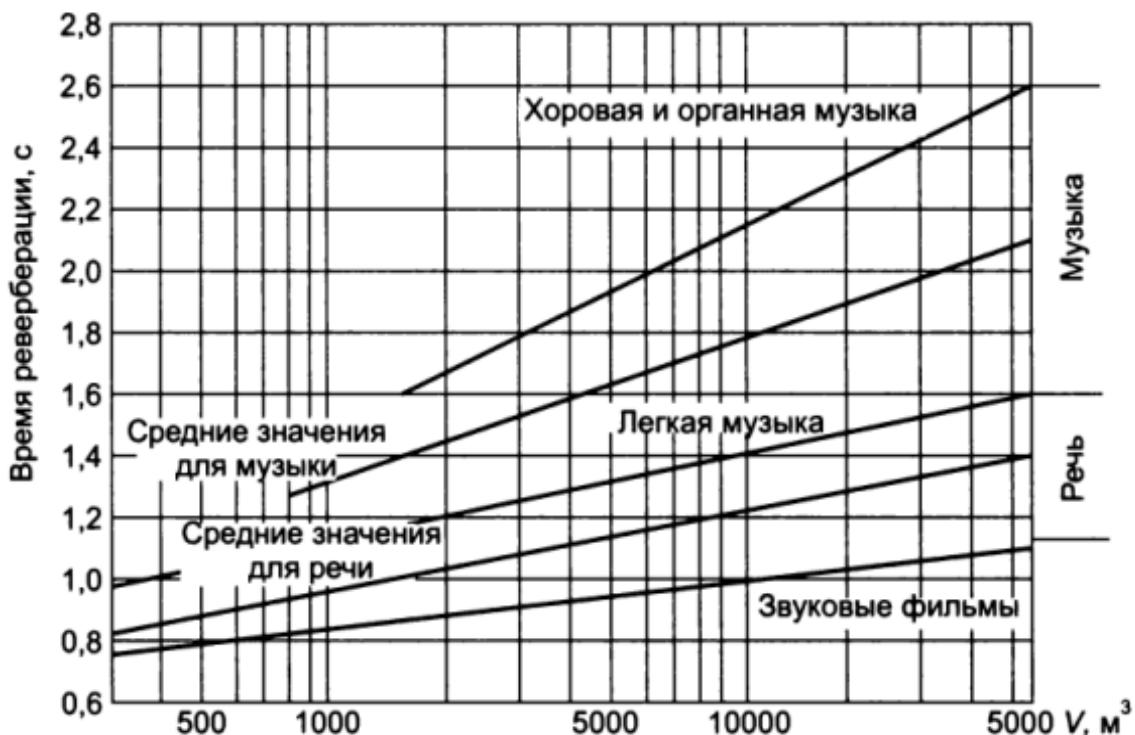


Рисунок 1.4 — Зависимость времени реверберации от объема помещения

Таблица 1.2 — Собственные частоты помещения

n_1	n_2	n_3	$f, \text{Гц}$	n_1	n_2	n_3	$f, \text{Гц}$
1	0	0	21,7	1	1	2	77,0
0	1	0	27,2	2	2	1	77,6
0	0	1	34,3	3	1	1	78,4
1	1	0	34,8	2	0	2	81,2
1	0	1	40,6	0	3	0	81,6
2	0	0	43,3	1	3	0	84,4
0	1	1	43,8	3	2	0	84,7
1	1	1	48,9	2	1	2	85,6
2	1	0	51,1	4	0	0	86,6
0	2	0	54,4	0	2	3	87,6
2	0	1	55,3	0	3	1	88,5
1	2	0	57,6	1	2	2	90,3
2	1	1	61,1	4	1	0	90,8
0	2	1	64,3	1	3	1	91,1
3	0	0	65,0	3	2	1	91,4
1	2	1	64,9	2	3	0	92,4
0	0	2	68,7	4	0	1	93,2
2	2	0	69,5	3	0	2	94,5
3	1	0	70,4	4	1	1	97,1
1	0	2	72,0	2	2	2	97,7
3	0	1	73,5	3	1	2	98,4
0	1	2	73,9	2	3	1	98,6

1.6 Теория и расчёт акустической эффективности АЭ

Основной теорией, применяемой для расчёта АЭ, является оптико-дифракционная теория [3], согласно которой эффективность АЭ зависит от разности хода звуковых лучей, определяемых числом Френеля в соответствии с расчетной схемой, представленной на рисунке 1.5, по следующей формуле:

$$N = \frac{2(a+b-d)}{\lambda}, \quad (1.2)$$

где a — расстояние от источника шума (ИШ) до свободного ребра АЭ, м;
 b — расстояние от свободного ребра АЭ до расчётной точки (РТ), м;
 d — расстояние от ИШ до РТ при отсутствии экрана, м;
 λ — длина звуковой волны, м, вычисляемая следующим образом:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.3)$$

где c — скорость звука в воздухе ($c=340$ м/с);
 f — частота (31,5; 63; 125...8000) Гц.

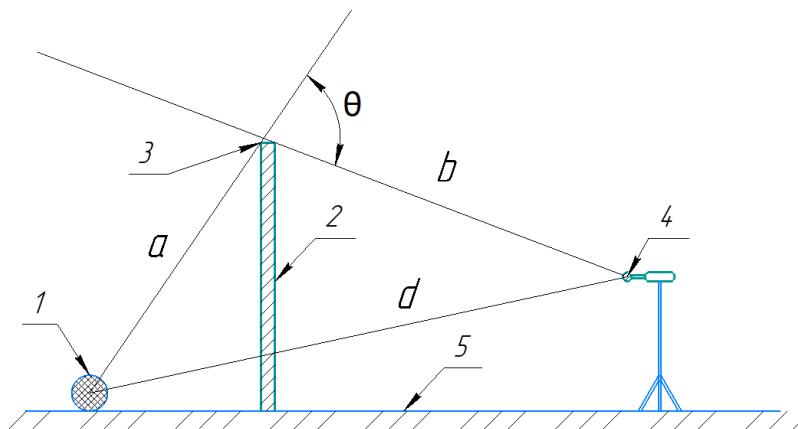


Рисунок 1.5 — Схема расчёта АЭ: 1 — ИШ; 2 — АЭ; 3 — свободное ребро АЭ; 4 — РТ, 5 — опорная поверхность, θ — угол дифракции

Следует отметить, что оптико-дифракционная теория нашла широкое распространение для расчетов эффективности АЭ по результатам работ японского

ученого, З. Маекавы, который на основании анализа многочисленных экспериментальных и аналитических данных, вывел достаточно простую формулу для инженерных расчётов эффективности акустических экранов, установленных в свободном звуковом поле [48-50]:

$$\Delta L_{экр} = 10 \lg 20N, \quad (1.4)$$

Метод, предложенный З. Маекавой, позволяет определять потери звуковой энергии, вносимые акустическими экранами, однако имеет существенное ограничение, состоящее в том, что звуковое давление за пределами экрана должно равномерно убывать, что, как правило, нереализуемо на практике при расположении экрана в помещении в связи с наличием множественных отражений в замкнутом объеме.

Оценивая, в целом, результаты расчетов эффективности АЭ по оптико-дифракционной теории, отметим их недостаточную точность для случая расположения экрана в замкнутом объеме [3], которую можно определить в соответствии с рисунком 1.6, отображающим результаты экспериментальных исследований эффективности АЭ в сравнении с результатами расчетов по формуле З. Маекавы для точечного источника шума.

Недостаточная точность оптико-дифракционной теории для расчета эффективности АЭ в помещениях, например, по формуле Маекавы, объясняется принятыми в расчете допущениями, в том числе тем, что свойства материала акустического экрана в расчете не учитываются, АЭ принят звуконепроницаемым, источник звука - точечным, а влияние помещения не учитывается при расчете эффективности экрана.

Несмотря на указанные погрешности, в научной литературе и в действующих нормативных документах встречается значительное количество методов расчета акустической эффективности экранов, в которых в той или иной мере, используется оптико-дифракционная и геометрическая теория акустики [3, 48-50,

79-84], в том числе, данный подход применяется для расчетов эффективности АЭ, расположенных в замкнутых объемах (производственных помещениях).

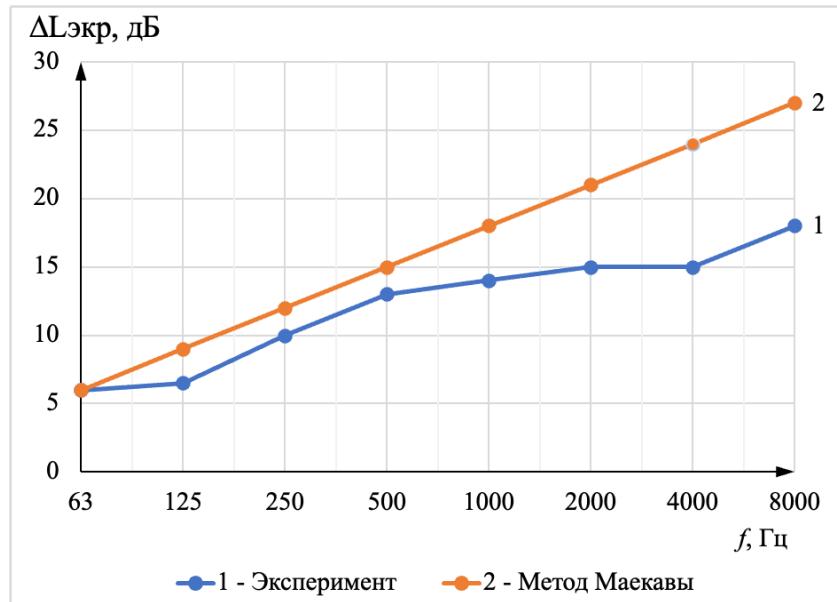


Рисунок 1.6 — Сравнение эффективности экрана, полученной по данным экспериментов (1) и расчетов по методу Маекавы (2) при наличии точечного источника шума

Например, довольно часто, в том числе, в нормативных документах РФ, используется формула У. Курце [80], основу которой составляет рассмотрение разности хода звуковых лучей и числа Френеля:

$$\Delta L_{\text{экр}} = 20 \lg \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{th\sqrt{2\pi|N|}} + 5, \text{ при } N \geq -0,2;$$

$$\Delta L_{\text{экр}} = 0 \text{ при } N < -0,2. \quad (1.5)$$

Еще одним примером использования оптико-дифракционной теории для расчета АЭ является ГОСТ 31287-2005 [87], в котором приведены расчетные формулы для оценки эффективности АЭ в рабочих помещениях. В ГОСТ 31287-2005 рассматриваются два случая расположения РТ за АЭ: в зоне глубокой акустической тени (в этом случае считается, что экран снижает прямой звук, излучаемый источником), а также при расположении расчетной точки в пределах радиуса реверберации с учетом отражения от ближайшей к источнику шума стены

и влияния кромки с наибольшей дифракцией, где звуковое поле формируется отраженным звуком. Расчеты по формуле ГОСТ 31287-2005 [87] в зоне действия отраженного звука дают результаты всего на 3-4 дБ ниже, чем по формуле расчета эффективности АЭ, расположенного в зоне действия прямого звука, что означает, что множественные отражения в помещении не учтены в должной мере в предложенных формулах. На основании анализа полученных данных сделан вывод о том, что главный недостаток ГОСТ 31287-2005 состоит в отсутствии связи эффективности АЭ с акустическими свойствами помещения, что не позволяет проектировать акустические экраны в производственных помещениях с высокой достоверностью прогнозируемых уровней звука при наличии экрана. Для более детального анализа необходимо провести детальные расчеты по формулам, представленным в [87] и верифицировать их специальными экспериментами, проведенными как в помещениях, так и в свободном звуковом поле.

Многих из перечисленных выше недостатков лишена теория АЭ, разработанная Н.В. Тюриной для расчёта эффективности АЭ в свободном звуковом поле и в помещениях [51, 52]. Рассмотрим одну из формул, разработанных Тюриной Н.В. на основе статистической теории акустики с применением элементов геометрической и волновой теорий акустики [51]:

$$\Delta L = 10 \lg \left(\frac{1}{\Omega_{\text{ист}}(R+r)^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{6/3})\Psi_{\text{пом}}}{A_{\text{пом}}^{6/3}} \right) - 10 \lg \left(\frac{4\bar{\alpha}_{\text{экр}}(1-\bar{\alpha}_{\text{экр}})}{\Omega_{\text{ист}}\Omega_{\text{экр}}R^2} \arctg \frac{ab}{2r\sqrt{4r^2+a^2+b^2}} + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{2\beta_i}{\Omega_{\text{ист}}\Omega_{\text{экр}}R^2r_i} \arctg \frac{l_i}{2r_i} \right) + \frac{4(1-\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{c/3})\Psi_{\text{пом}}}{A_{\text{пом}}^{c/3}} + \frac{(1-\bar{\alpha}_{\text{пом}})}{\Omega_{\text{ист}}R_{\text{отр}}^2} + \frac{4}{\Omega_{\text{ист}}\Omega_{\text{пр}}R_{\text{пр}}^2} \arctg \frac{h_{\text{АЭ}}l_i}{2r_{\text{пр}}\sqrt{r_{\text{пр}}^2r^2+h_{\text{АЭ}}^2+l_i^2}} \right), \text{дБ} \quad (1.6)$$

где r и R — расстояния от источника шума до экрана и от экрана до защищаемого объекта, соответственно, м;

$l_{\text{экр}}$ — длина АЭ, м;

$h_{\text{экр}}$ — высота АЭ, м;

$\beta_{\text{экр}}$ — коэффициент дифракции АЭ;

$\alpha_{\text{пов}}$ и $\alpha_{\text{экр}}$ — коэффициенты звукопоглощения поверхности перед АЭ и самого экрана, соответственно;

λ — длина звуковой волны, м.

Как видим, формула достаточно сложна для расчетов и не учитывает форму экрана, что крайне важно в условиях применения АЭ в производственных помещениях. Необходимо получить более простую формулу расчёта АЭ в помещении, проверить её точность и установить степень влияния акустических свойств помещения и экрана, а также формы экрана на его эффективность.

При рассмотрении вопросов, связанных со снижением шума в помещениях, особого внимания заслуживают работы, выполненные представителями школы профессора В.И. Леденева, посвященные прогнозированию звуковых полей в помещениях, а также снижению шума экранирующими и звукопоглощающими конструкциями в помещениях [7, 8, 22, 88-95]. Остановимся подробнее на работах, посвященных акустическим экранам. В работах [22, 92, 93] авторы показали, что можно добиться определенного снижения шума на рабочих местах путем установки акустического экрана в помещении между ИШ и рабочим местом, а также повышения звукопоглощения в помещении. Учитывая, что на акустическую эффективность АЭ в помещении существенным образом влияет отраженный шум, проникающий в зону акустической тени, формируемой акустическим экраном, авторами рекомендовано использовать звукопоглощающие элементы в помещении, например, подвешенные на потолке кулисы. Для учета влияния отраженного шума использован метод прослеживания лучей, который позволяет выполнять расчеты отраженного шума как при зеркальной, так и при рассеянной моделях отражения звука от ограждений. Авторы [22] приводят результаты исследования, в котором расчетами установлено, что звукопоглощающие кулисы снижают шум на величину до 7,7 дБ в помещении на расстоянии 18 м от источника шума. При этом, непосредственно за экраном уменьшение суммарного шума только за счет экрана составляет 5 дБ, а при совместном действии звукопоглощающих кулис и акустического экрана уменьшение суммарного шума в зоне глубокой акустической тени достигает 8,3 дБ. Эффективность экрана авторами [22] предложено

рассчитывать по формуле З. Маекавы, распространение звука в помещении рассматривается с использованием классического метода геометрической теории акустики, что на наш взгляд, позволяет оценивать эффективность экранирования прямого звука, но не обеспечивает достаточную точность оценки влияния акустических параметров помещения на эффективность экрана.

При рассмотрении подходов к снижению производственного шума в помещении экранами нельзя не остановиться на требованиях СП 254.1325800.2016 [96]. Свод правил [96] посвящен снижению производственного шума в помещениях и, частично затрагивает вопросы снижения шума акустическими экранами, например, содержит формулу для расчета эффективности АЭ, основанную на оптико-дифракционной теории, а также предлагает данные об эффективности АЭ для нескольких типоразмеров АЭ, плоских и П-образных АЭ. Согласно [96] линейные размеры экрана должны быть не менее чем в три раза больше линейных размеров источников шума, при проектировании шумозащиты рекомендуется отдавать предпочтение экранам П-образной формы. Для снижения отраженного звука от поверхностей помещения и снижения звука, излучаемого другими, расположенными в помещении источниками шума, в [96] рекомендовано совместное применение экранов и звукопоглощающей облицовки, при этом влияние акустических свойств помещения на эффективность АЭ в СП предложено рассматривать в зависимости от среднего коэффициента звукопоглощения помещения. С одной стороны, идеи СП [96] представляются достаточно продуктивными, однако, тщательный анализ требований [96] показывает, что рассмотрение влияния формы АЭ на эффективность АЭ в своде правил представлено достаточно ограниченно (не указано как оценивать эффективность Г-образного, полузамкнутого экранов и экранов других видов), а учет влияния акустических характеристик помещения на эффективность экрана не привязан к конкретным характеристикам производственного помещения.

Таким образом, необходимо разработать метод расчета эффективности АЭ в производственных помещениях с различными акустическими характеристиками.

1.7 Проектирование АЭ

Научно-техническая и методическая литература, посвященная конструированию (проектированию), расчетам эффективности АЭ на этапе проектирования, чрезвычайно обширна [5, 6, 53, 97-100]. В первую очередь, обратимся к классификации АЭ по их назначению (таблица 1.3), согласно которой все АЭ можно разделить на транспортные, офисно-производственные, технологические и дополнительные. Транспортные и технологические АЭ нашли наибольшее применение на практике.

Таблица 1.3 — Классификация акустических экранов по их назначению [5]

Тип АЭ	Схема	Обозначения на схеме	Место установки и применение
Офисно-производственные		1 – источник шума; 2 – АЭ; 3 – рабочее место; 4 - помещение	В помещениях для снижения прямого звука
Транспортные		1 – источник шума (автотранспортный поток или поток железнодорожного транспорта); 2 – АЭ; 3 – опорная поверхность; 4 – жилая застройка	Вдоль автомобильных или железных дорог (а/д) напротив жилой и другой застройки
Технологические		1 – источник шума; 2 – АЭ; 3 – стена; 4 - здание	Со всех сторон источника шума
Дополнительные		1 – источник шума; 2 – АЭ; 3 – проем; 4 – звукоизолирующий капот	В качестве дополнительного средства в шумозащитных конструкциях

В таблице 1.4, на рисунке 1.7 и рисунке 1.8 [5] показаны виды различных надстроек (формы верхней граничной поверхности) и представлены данные об увеличении эффективности АЭ при изменении формы верхней граничной поверхности.

Таблица 1.4 – Дополнительная эффективность АЭ при изменении формы верхней граничной поверхности [5]

Название АЭ	Условная схема	Дополнительная эффективность, дБА
Г-образный	a) 	1,5...2
	б) 	2,0...2,5
Стреловидный		0...0,5
Y-образный		2,5...3,5
X-образный		3,5...4,5
Т-образный	a) 	3...4
	б) 	4,5...5,5

Как следует из представленных в таблице 1.4 данных, теоретически усложнение формы верхней граничной поверхности может увеличить эффективность АЭ от 1 до 5 дБА.

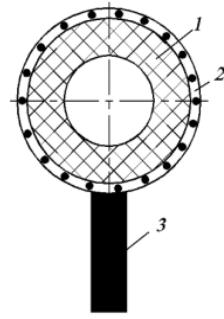


Рисунок 1.7 – Схема антидифрактора [5]: 1 – ЗПМ; 2 – перфорированный цилиндр;
3 – акустический экран

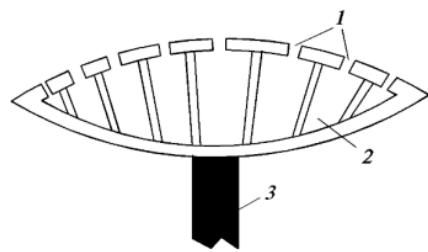


Рисунок 1.8 – Схема резонаторов, устанавливаемых на свободном ребре АЭ [5]
1 – горло резонатора; 2 – объем; 3 – АЭ

По данным научной литературы, на эффективность АЭ, помимо размеров АЭ, влияют наличие и вид надстроек на свободном ребре, форма АЭ (особенно важна для экранов технологических и офисно-производственных), материал АЭ, наличие/отсутствие звукопоглощения в конструкции АЭ.

Усложнение надстроек представляется неперспективным для АЭ в помещениях, считается целесообразным изменение формы АЭ (как, например, указано на рисунке 1.9).

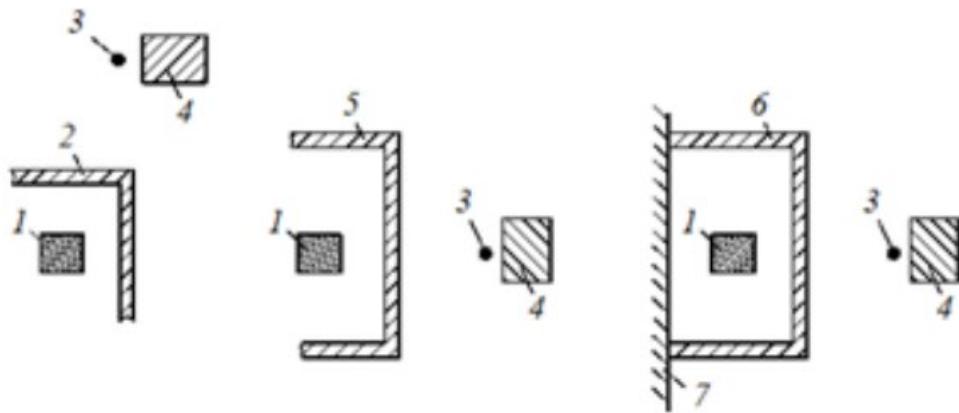


Рисунок 1.9 — Схемы технологических экранов [3]:

- 1 — источник шума; 2 — Г—образный АЭ; 3 — точка измерений;
- 4 — защищаемое от шума здание; 5 — П—образный АЭ;
- 6 — замкнутый П-образный АЭ, примыкающий к стене; 7 — стена

Шашуриным А.Е. [40] и Светловым В.В. [99] были исследованы плоские и Г-образные технологические АЭ в условиях эксплуатации, получены экспериментальные результаты, показавшие, что в зависимости от формы и особенностей размещения технологических АЭ, их эффективность может возрастать от 3 до 9 дБА. При этом указанные исследования не позволяют перенести результаты, полученные для технологических АЭ, на офисно-производственные АЭ и сделать однозначный вывод о влиянии конкретной формы АЭ на эффективность АЭ, который бы позволил разработать практические рекомендации по проектированию АЭ различной формы в производственных помещениях.

Следует отметить, что в производственных помещениях защищаемые объекты размещаются, как правило, на малых расстояниях от предполагаемого места установки АЭ (порядка 0,5-2 м) и в зависимости от конкретных условий могут попадать в зону глубокой акустической тени АЭ или в область граничного радиуса или быть окружеными несколькими источниками шума, формирующими сложные звуковые поля и множественные отражения. Согласно [41] эффективность АЭ увеличивается на 2,5-3 дБА при наличии звукопоглощения, однако, для АЭ в помещении этот вопрос требует также дополнительного изучения.

Увеличение звукопоглощения помещения является основным методом для снижения отраженного звука в замкнутых объемах [3, 5, 6]. Выборочные данные об эффективности этой меры можно найти в [22, 59, 61, 64, 92, 93, 95]. Например, в [3] приведены данные измерений УЗД в цехе до и после применения звукопоглощающей облицовки. По результатам анализа экспериментальных данных авторами получено снижение шума в цехе на 3-10 дБ в диапазоне частот 500-8000 Гц. Применение акустического экрана и звукопоглощающей облицовки помещения являются взаимодополняющими мероприятиями при обеспечении защиты от шума в производственном помещении, при этом совместный эффект, а также степень влияния звукопоглощения помещения и звукопоглощения акустического экрана на его эффективность АЭ в помещении недостаточно изучен.

Для детального исследования вопросов применения АЭ в помещениях, необходимо выполнить натурные испытания эффективности АЭ по следующим направлениям:

- зависимость эффективности АЭ от акустических свойств помещений;
- зависимость эффективности АЭ от формы АЭ;
- зависимость эффективности АЭ от его размеров;
- зависимость эффективности АЭ от его звукопоглощения.

1.8 Основные задачи исследования

На основании выполненного анализа сформулированы следующие задачи исследования:

- выполнение экспериментальных исследований характеристик шума на рабочих местах и в рабочих зонах производственных помещений и определение требований к его снижению;
- изучение механизмов формирования звуковых полей в производственных помещениях с целью разработки классификации производственных помещений в зависимости от их акустических свойств;
- анализ методики расчета эффективности акустического экрана в рабочих помещениях, основанной на оптико-дифракционной теории, с целью

оценки ее пригодности для определения акустической эффективности экранов в производственных помещениях;

- разработка метода расчета эффективности акустического экрана при расположении защищаемого объекта в области прямого и отраженного звука в помещении;
- разработка методики испытаний АЭ и опытного стенда и выполнение экспериментальных исследований эффективности АЭ в свободном звуковом поле и в помещении с целью установления влияния формы и основных конструктивных параметров АЭ, а также акустических свойств помещений на эффективность акустического экрана;
- определение экспериментальных поправок, учитывающих влияние акустических свойств помещения и формы АЭ на эффективность АЭ;
- разработка рекомендаций по проектированию АЭ для снижения шума в производственных помещениях;
- выполнение апробации разработанных решений в условиях производства.

ГЛАВА II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМА И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

2.1. Краткое описание объектов исследования

В качестве объектов исследования были выбраны производственные цеха и участки предприятий (фабрик) бумагопечатного и чеканного производств. Измерения шума на рабочих местах и в рабочих зонах в сравнении с нормами [1] проводились на четырёх производствах, расположенных в городах Москве, Санкт-Петербурге и Перми. На каждой фабрике производились измерения характеристик шума во всех основных цехах и производственных участках, а для дальнейшего изучения выбирались помещения с наиболее высокими уровнями звука на работающих местах и в рабочих зонах, где расположение обслуживающего персонала не локализовано.

Помимо вышеуказанного, изучались акустические свойства помещений. Исследования помещений проводились на тех же фабриках.

2.2. Методики измерений

2.2.1. Измерительная аппаратура и оборудование

Экспериментальные исследования акустических характеристик помещения, эффективности АЭ в помещении, а также в свободном звуковом поле (вне помещения) проводились с использованием средств измерений, внесенных в государственный реестр и имевших действующие свидетельства о поверке. Для проведения измерений уровней звука и уровней звукового давления применялись измерительные системы на базе шумомеров-виброметров, анализаторов спектра ЭКОФИЗИКА-110А (номер в реестре СИ РФ: 48906-12) в различных модификациях и ОКТАВА-110А (номер в реестре СИ РФ: 32747-06), которые соответствуют 1 классу согласно ГОСТ Р 53188.1-2019 [104]. В составе измерительных систем применялись предусилители Р200 и микрофонные капсюли ВМК-205. Для проверки калибровки средств измерений применялся акустический

калибратор АК-1000 (номер в реестре СИ РФ: 76039-19) 1-го класса согласно ГОСТ Р МЭК 60942-2009 [105].

Для определения влияния условий окружающей среды на результаты измерений во время проведения измерений контролировались параметры окружающей среды: скорость движения воздуха, температура воздуха, относительная влажность воздуха и атмосферное давление. Все параметры окружающей среды находились в пределах, установленных в технической документации на средства измерений. Для контроля метеорологических условий при проведении измерений применялась измерительная система Метеоскоп-М (номер в реестре СИ РФ: 32014- 11).

Контроль высоты расположения микрофона над подстилающей поверхностью, а также расстояния от отражающих конструкций выполнялся с помощью рулетки измерительной Geobox PK2-8 (номер в реестре СИ РФ: 36016- 07).

Шумомер-виброметр, анализатор спектра ЭКОФИЗИКА-110А предназначен для измерения среднеквадратичных, эквивалентных и пиковых уровней звука, корректированных уровнями виброускорения, октавных, 1/3-октавных, 1/12-октавных и узкополосных спектров, для анализа сигналов различных первичных преобразователей для регистрации временных форм сигналов с целью оценки влияния звука, инфра- и ультразвука, вибрации и иных динамических физических процессов на человека на производстве, в жилых и общественных зданиях, определения виброакустических характеристик механизмов и машин, а также для научных исследований. Прибор состоит из интерфейсного блока (ИБ) ЭКОФИЗИКА-Д, измерительного модуля (ИМ) HF или 110А и первичных преобразователей. Виды комплектации прибора для работы в режиме шумомера, виброметра или анализатора спектра приведены в разделе «Технические характеристики». Измерительный модуль осуществляет прием аналоговых сигналов от первичных преобразователей, усиление, нормализацию и цифровое преобразование сигналов, расчёт измеряемых величин, а также обеспечивают питание и первичных преобразователей. ИБ ЭКОФИЗИКА-Д осуществляет управление и питание измерительных модулей, индикацию результатов измерений

и их запись в собственной энергонезависимой памяти, передачу результатов измерений на внешние устройства.

Калибратор акустический АК-1000 (далее — калибратор) предназначен для создания звукового поля с уровнями 94 дБ и 114 дБ (относительно 20 мкПа) на частоте 1000 Гц, воздействующего на диафрагму микрофонов, оснащенных защитной сеткой и применяемых в составе шумомеров 1 или 2 класса по ГОСТ 17187-2010, ГОСТ Р 53188.1-2019, МЭК 61672-1.

Всенаправленный источник звука (додекаэдр) OED-SP360 соответствует нормативам: ГОСТ 27296-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций», ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012 «Акустика. Лабораторные измерения звукоизоляции элементов зданий. Часть 2. Измерение звукоизоляции воздушного шума»; ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013 «Акустика. Измерение акустических параметров помещений»; ГОСТ Р ИСО 3382-2-2013 «Акустика. Время реверберации обычных помещений».

При проведении измерений на предприятиях все оборудование использовалось в режиме максимальной загруженности для оценки наихудшей ситуации.

Измеряемыми параметрами являлись уровни звука и уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами в диапазоне от 31,5 до 8000 Гц.

2.2.2. Методика измерения шума на рабочих местах и в рабочих зонах

Измерения шума на рабочих местах и в рабочих зонах выполнялись с учетом нормативных требований [102]. Измеряемыми характеристиками являлись уровни звукового давления и уровни звука — для постоянного шума, эквивалентные уровни звука и максимальные уровни звука — для непостоянного шума. Уровни звукового давления измерялись в октавных полосах со среднегеометрическими частотами: 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц. При измерениях микрофон располагался на высоте 1,5 м над уровнем пола при выполнении работ стоя или в рабочих зонах и на высоте уха, работающего, при выполнении работ

сидя. В рабочих зонах измерения производились в точках наиболее частого пребывания работающих. Измерение УЗД и УЗ проводились в каждой точке не менее трёх раз. При всех измерениях временная характеристика шумомера устанавливается в положение «медленно». Обработка результатов измерений проводилась в соответствии с методиками, представленными в [3].

2.2.3. Методика измерения времени реверберации в помещениях

Время реверберации является исходной измеряемой характеристикой для определения акустических качеств помещении. В отличие от свободного звукового поля, где звук в точке наблюдения определяется дивергенцией (при небольших расстояниях), звук в помещении претерпевает значительные изменения, определяемые, помимо дивергенции, отражениями звука от поверхностей помещения. Мерой отражений в помещении служит время реверберации. Время реверберации — это время, в течение которого уровни звукового давления в помещении снижаются на 60 дБ после прекращения действия стандартного искусственного источника звука. Чем больше отражений, тем больше время реверберации (гулкие помещения). В гулких помещениях отраженный звук ухудшает характеристики шума на рабочих местах, а также снижает эффективность некоторых шумозащитных конструкций (например, акустических экранов).

Измерение времени реверберации проводилось в соответствии с ГОСТ Р ИСО 3382-2-2013 «Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть2. Время реверберации обычных помещений» [103]. Измерения проводились с помощью измерительного тракта в составе: ненаправленного источника излучения шума (ИШ), шумомеров. Перед измерениями все работающее оборудование выключалось, соблюдался режим тишины, затем включался искусственный ИШ, после выключения которого фиксировалось время реверберации ($T, \text{ с}$) в трех точках помещения одновременно, обработка результатов среднеарифметическая. На рисунке 2.1 показан пример расположения ИШ и точек измерения времени реверберации на граверном участке фабрики в г. Санкт-Петербурге.

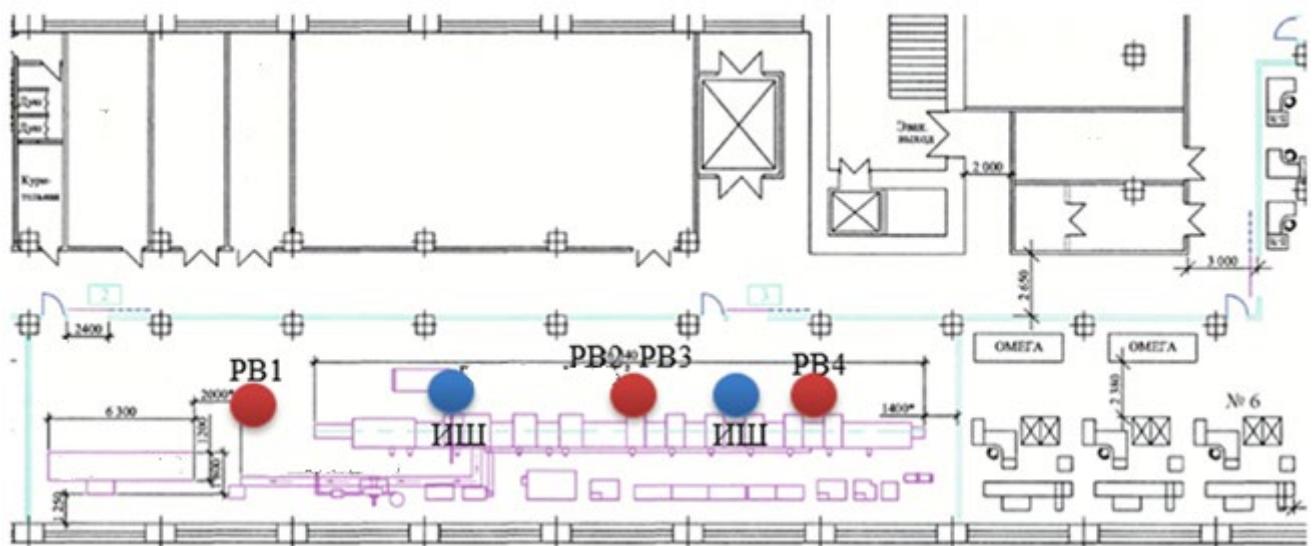


Рисунок 2.1 — Пример схемы размещения ИШ и точек измерения времени реверберации (PB)

PB1, PB2, PB3, PB4 — точка измерения времени реверберации,
ИШ — расположение источника шума

2.3. Шум на рабочих местах и в рабочих зонах предприятий

2.3.1. Фабрика в г. Санкт-Петербурге

Выполнены измерения в 33 точках на фабрике в г. Санкт-Петербург на рабочих местах и в рабочих зонах в цехе производства монетно-медально-орденской продукции на участках: плавильно-прокатный, чеканки и граверный. Полученные результаты приведены в таблице 2.1.

На основании выполненного анализа данных, приведенных в таблице 2.1, сделан вывод о том, что из 33 рабочих мест и рабочих зон нормативные эквивалентные УЗ (и незначительные превышения на 1 дБА) зафиксированы всего в 10 измерительных точках. В четырех точках измерений превышения не превышали 4-5 дБА, а в остальных 19 точках измерений превышение эквивалентных УЗ составило от 6 до 15 дБА. Превышения максимальных УЗ были зафиксированы примерно аналогичные.

Таблица 2.1 — Результаты измерений шума на рабочих местах и в рабочих зонах (фабрика г. Санкт-Петербург)

Наименование участка (профессии)	№ ТИ	УЗ _{ЭКВ} , дБА	Превышение УЗ _{ЭКВ} , дБА	УЗ _{макс} , дБА
1	2	3	4	5
Плавильно-прокатный (вальцовщики холодного металла и др.)	1	76	-	87
	2	86	6	93
	3	87	7	95
	4	98	18	105
Участок чеканки (оператор автоматических станков и установок)	5	87	7	97
	6	80	-	88
	7	89	9	91
	8	89	9	89
	9	85	5	86
	10	81	1	85
	11	86	6	90
	12	93	13	96
	13	93	13	96
	14	95	15	98
	15	89	9	95
	16	89	9	98
	17	94	14	107
	18	93	13	106
	19	92	12	105
	20	88	8	96
Плавильно-прокатный (наладчики)	21	84	4	98
	22	85	5	89
	23	94	14	98

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5
Граверный (операторы станков с ЧПУ)	24	80	-	96
	25	80	-	94
	26	81	1	98
	27	80	-	96
	28	81	1	96
	29	81	1	97
	30	87	7	98
	31	84	4	97
	32	88	8	99
	33	81	1	84

Таким образом, шум в норме примерно только на 30% рабочих мест и в рабочих зонах, в остальных случаях зафиксированы превышения от 2 до 18 дБА. Заметим, что максимальные УЗ находятся в диапазоне 84-107 дБА, превышения носят аналогичный характер.

2.3.2 Фабрика №1 в г. Москве

Измерения на фабрике №1 в г. Москва проводились в печатных цехах. Всего были проведены измерения в 105 точках. В таблице 2.2 приведены результаты измерений в 53 точках, наиболее характерных для данного вида производств. Данные по максимальным УЗ не приводятся, т.к. характер превышения аналогичен.

Таблица 2.2 — Результаты выборочных измерений шума на рабочих местах и в рабочих зонах (фабрика №1, г. Москва)

Наименование цеха, производственного участка	№ ТИ	УЗ _{ЭКВ} , дБА	Превышение УЗ _{ЭКВ} , дБА
1	2	3	4
Печатный цех, участок персонализации	1	87	7
	2	83	3
	3	85	5
	4	84	4
	5	100	20
	6	91	11
	7	89	9
	8	91	11
	9	92	12
	10	86	6
	11	85	5
Печатный цех 1	12	85	5
	13	88	8
	14	87	7
	15	86	6
	16	82	2
	17	85	5
	18	90	10
	19	88	8
	20	92	12
	21	86	6
	22	89	9
	23	94	14
	24	93	13
	25	87	7

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4
	26	90	10
Печатный цех 2	27	96	16
	28	97	17
	29	100	20
	30	97	17
	31	102	22
	32	84	4
Печатный цех 3	33	81	1
	34	80	-
	35	86	6
Цех металло-графический печати	36	87	7
	37	90	10
	38	84	4
	39	88	8
	40	89	9
	41	91	11
	42	94	14
	43	90	10
	44	92	12
	45	81	1
Цех по изготовлению документов	46	95	15
	47	88	8
	48	87	7
	49	85	5
	50	90	10

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4
Цех печати, участок гравировки	51	83	3
	52	95	15
	53	90	10

Анализ данных, приведенных в таблице 2.2, показывает, что только в 3-х точках шум в норме (или превышает на 1 дБА). В основном зарегистрированы превышения на 5-10 дБА, но на некоторых рабочих местах и в рабочих зонах превышения от 11 до 20 дБА, т.е. примерно в 66% случаев превышения до 10 дБА, а примерно в 30% более 10 дБА.

2.3.3 Фабрика №2 в г. Москве

Измерения шума проводились в медально-монетном цехе фабрики №2 в г. Москва на различных производственных участках и в рабочих зонах. Всего были проведены измерения в 45 точках, результаты по 29 точкам приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Результаты выборочных измерений шума на рабочих местах и в рабочих зонах

Наименование производственных участков (рабочих мест)	№ ТИ	УЗ _{экв} , дБА	Превышение УЗ _{экв} , дБА	УЗ _{макс} , дБА
1	2	3	4	5
Рабочая зона наладчиков	1	82	2	84
	2	83	3	86
	3	91	11	96
	4	88	8	95
	5	85	5	88
	6	87	7	90
	7	86	6	91
Рабочая зона вальцовщиков	8	93	13	98
	9	87	7	90
	10	88	8	95
	11	96	16	100

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3	4	5
Рабочие места токарей	12	97	17	101
	13	89	9	93
	14	87	7	93
	16	86	6	89
Рабочие зоны слесарей-ремонтников	17	84	4	90
	18	83	3	89
	19	86	6	90
	20	81	1	86
Рабочие места резчиков металла (на ножницах и прессах)	21	93	13	100
	22	90	10	95
	23	86	6	91
	24	80	-	89
	25	86	6	95
	26	97	17	107
	27	102	22	113
	28	97	17	107
	29	102	22	113

Анализ результатов измерений шума на основных рабочих местах и в рабочих зонах показывает, что в незначительном числе (4) точек измерений (ТИ) отмечены превышения эквивалентных УЗ в пределах 3 дБА, превышения до 10 дБА зафиксированы в 16 ТИ, в остальных превышения составили от 11 до 22 дБА. Особенno большие превышения получены на участках резки металла (от 6 до 22 дБА).

2.3.4 Фабрика в г. Пермь

Измерения на фабрике в г. Пермь шума были выполнены в 158 измерительных точках на производственных участках в цехах: книжно-бланочного и пластикового производства, зоне печатного производства и банкнотного производства. Результаты выборочных измерений по 70 точкам представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 — Результаты выборочных измерений шума на рабочих местах и в рабочих зонах (фабрика, г. Пермь)

Наименование цеха, производственного участка	№ ТИ	УЗ _{экв} , дБА	Превышение УЗ _{экв} , дБА	УЗ _{макс} , дБА
1	2	3	4	5
Участок 1	1	84	4	89
	2	85	5	90
	3	87	7	101
	4	84	4	98
	5	86	6	102
	6	87	7	102
	7	84	4	100
	8	85	5	98
	9	92	12	96
	10	82	2	89
Участок 2	11	84	4	87
	12	85	5	90
	13	83	3	87
	14	85	5	89
	15	87	7	98
	16	84	4	89
Участок 3	17	90	10	97
	18	91	11	96
	19	97	17	100
	20	94	14	99
	21	93	13	97

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5
Участок 4	22	84	4	87
	23	85	5	89
	24	87	7	91
	25	87	7	90
	26	88	8	95
	27	86	6	91
	28	88	8	90
	29	80	-	87
Участок 5	30	81	1	85
	31	87	7	90
	32	84	4	88
	33	87	7	91
	34	83	3	88
	35	93	13	99
	36	86	6	90
	37	85	5	102
Участок 6	38	80	-	98
	39	88	8	93
	40	89	9	97
	41	90	10	95
Участок 7	42	97	17	100
	43	95	15	95
	44	98	18	103
	45	84	4	88
Участок 8	46	80	-	85
	47	84	4	86
	48	86	6	90
	49	83	3	85
	50	81	1	85

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4	5
Участок 9	51	83	3	86
	52	85	5	90
	53	91	11	95
	54	93	13	96
	55	88	8	95
	56	97	17	99
Участок 10	57	89	9	99
	58	88	8	91
	59	87	7	90
	60	85	5	91
	61	93	13	96
	62	89	9	93
Участок 11	63	81	1	85
	64	87	7	90
	65	83	3	87
	66	82	2	85
	67	84	4	88
	68	87	7	91
	69	94	14	100
Участок 12	70	86	6	90
	71	84	4	89
	72	80	-	85
	73	82	2	85
	74	85	5	90
	75	93	13	95
	76	91	11	99

Анализируя результаты измерений, отметим, что нормы шума превышены в превалирующем числе случаев, при этом превышения до 10 дБА составляют

абсолютное большинство из общего числа измеренных точек, только примерно в 20% точек превышения составляют от 11 до 18 дБА.

Обобщая результаты измерений по всем обследованным фабрикам, сделаем общий вывод: из 435 точек измерений только в 10% эквивалентные УЗ находились в норме, в 70% отмечены превышения от 1 до 10 дБА, а в 20% - превышения составили от 11 до 22 дБА. Таким образом проблема защиты от шума исследованных производств является актуальной.

2.4 Анализ акустических свойств производственных помещений

2.4.1 Общие сведения

Любое помещение обладает набором собственных частот колебаний. При выключении источника звука в помещении некоторое время происходят затухающие колебания звука на собственных частотах. На этом эффекте основано определение времени реверберации. Время реверберации — это измеряемый показатель акустического качества помещения. Чем больше время реверберации, тем более гулкое помещение. Снижение времени реверберации в помещении, а значит улучшение его акустических качеств с точки зрения шумозащиты, достигается размещением в помещении звукопоглощающих конструкций или предметов.

Для полной оценки акустических свойств производственных помещений одного времени реверберации недостаточно. Так, например, значение граничного радиуса — величины, показывающей на каком расстоянии от источника шума вклад прямого и отраженного звука приблизительно одинаков, возможно определить зная или время реверберации (T , с), или эквивалентную площадь звукопоглощения (A , m^2), или акустическую постоянную помещения (B , m^2). Время реверберации является исходной величиной для определения не только акустической постоянной помещения и эквивалентной площади звукопоглощения, но и очень важный и практически реализуемой характеристикой акустических качеств помещений — среднего коэффициента звукопоглощения помещения

($\bar{\alpha}_{\text{пом}}$), который, как и все вышеперечисленные параметры, имеет частотно-зависимый характер.

Значение среднего коэффициента звукопоглощения согласно формуле Сэбина [3] определяется следующим образом:

$$\bar{\alpha}_{\text{пом}} = \frac{0,16V_{\text{пом}}}{S_{\text{пом}}T_{\text{пом}}}, \quad (2.1)$$

где $V_{\text{пом}}$ — объем помещения, м³;

$S_{\text{пом}}$ — площадь отражающих (поглощающих) поверхностей помещения, м²;

$T_{\text{пом}}$ — измеренные значения времени реверберации, с.

Акустическая постоянная рассчитывается по формуле:

$$B_{\text{пом}} = \frac{A_{\text{пом}}}{(1-\bar{\alpha}_{\text{пом}})}, \quad (2.2)$$

где $A_{\text{пом}}$ — эквивалентная площадь звукопоглощения помещения, м².

Граничный радиус (радиус реверберации) вычисляется по следующей формуле [87]:

$$r_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{A_{\text{пом}}}{16\pi}} = 0,057 \sqrt{\frac{V_{\text{пом}}}{T_{\text{пом}}}}, \quad (2.3)$$

Объективными показателями акустических качеств производственных помещений, определяемыми в данном исследовании, являются $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$, $r_{\text{гр}}$.

Исходя из требований НТД [103], измерения времени реверберации и расчет других параметров осуществлялся с октавной полосы со среднегеометрическим значением частоты 125 Гц.

2.4.2 Измерения и расчеты акустических параметров производственных помещений

Всего было выполнено 3 серии измерений по одной в каждой из исследованных фабрик (на фабрике №2 в г. Москве измерения не проводились) в следующих городах: Санкт-Петербург, Москва, Пермь.

Фабрика г. Санкт-Петербург. В первой серии измерений было обследовано 5 производственных помещений, геометрические параметры которых приведены в таблице 2.5. Указанные в таблице параметры рассчитаны без учета смежных помещений, прилегающих к рассматриваемым.

Таблица 2.5 — Геометрические характеристики помещений

№ помещения	Помещение, рабочее место	Объем пом., м ³	Общая площадь внутр. поверхностей, м ²
1	Цех 1, плавильно-прокатный участок	1841	1151
2	Цех 2, автоматические и полуавтоматические линии станков и установок	143	194
3	Цех 3	154	136
4	Цех 4, резка металла на ножницах и прессах	297	278
5	Цех 5, станки с числовым программным управлением	101	152

Данные усредненных значений времени реверберации, измеренных в производственных помещениях, приведены в таблице 2.6. Вычисленные значения $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ и $r_{\text{гр}}$ производственных помещениях приведены в таблице 2.7.

Как следует из полученных результатов экспериментов, практически все обследованные помещения имеют очень низкие звукопоглощающие свойства. Характерным для всех помещений являются увеличение среднего коэффициента звукопоглощения с увеличением частоты. Например, в первом помещении зафиксировано увеличение среднего коэффициента звукопоглощения от 0,07 до 0,11, а в третьем помещении - от 0,08 до 0,17.

Таблица 2.6 — Измеренные усредненные значения времени реверберации в производственных помещениях

№ помещений	Измеренные усредненные значения времени реверберации, с в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	1,77	1,71	1,65	1,54	1,45	1,26	1,08
2	0,91	0,82	0,75	0,71	0,69	0,61	0,57
3	1,66	1,47	1,21	1,11	1,04	0,87	0,71
4	1,34	1,12	1,07	1,02	0,99	0,92	0,81
5	1,22	1,13	1,11	1,09	1,01	0,95	0,88

Таблица 2.7 — Вычисленные значения среднего коэффициента звукопоглощения и граничного радиуса

№ помещений	Вычисляемые параметры	Рассчитанные значения $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ и $r_{\text{гр}}$, м, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,11
	$r_{\text{гр}}$	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,45	1,6
2	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,19	0,2
	$r_{\text{гр}}$	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0
3	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,08	0,1	0,12	0,13	0,14	0,16	0,17
	$r_{\text{гр}}$	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8
4	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,13	0,15	0,15	0,16	0,16	0,18	0,2
	$r_{\text{гр}}$	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1
5	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,08	0,09	0,09	0,1	0,1	0,11	0,12
	$r_{\text{гр}}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6

Главный вывод, связанный с разработкой шумозащиты в цехах, состоит в том, что выявлены чрезвычайно низкие значения среднего коэффициента

звукопоглощения в помещениях (на высоких частотах значение $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ составляют от 0,07 до 0,2). В связи с этим получены и невысокие значения граничного радиуса (за исключением первого помещения), составляющие от 0,5 м до 1 м. Исследованные помещения имеют низкие акустические качества, что затрудняет разработку отдельных средств шумозащиты, а также является одной из причин повышенного шума на рабочих местах и в рабочих зонах. Обобщая анализ, отметим, что на частоте 1000 Гц средний коэффициент звукопоглощения для всех помещений составил менее 0,2 ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} \leq 2$).

Фабрика г. Москва. Во второй серии измерений было обследовано 7 производственных помещений на фабрике в г. Москва, геометрические параметры которых приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 — Геометрические характеристики обследованных помещений (фабрика г. Москва)

№ пом.	Помещение, рабочее место	Объем помещения, м ³	Общая площадь внутр. поверхностей, м ²
1	Цех с ротационной печатной машиной	1219,9	946,9
2	Упаковочный участок	767,5	618,8
3	Печатный цех	169,9	189,5
4	Участок термоструйных принтеров	518,4	437,4
5	Граверный участок	274,6	263,8
6	Цех с приклеечным оборудованием и прессами	1481,4	1027,0
7	Цех металлографской печати	936,6	620,8

Данные усредненных значений времени реверберации, полученные на основании результатов измерений в производственных помещениях, приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 — Усредненные значения времени реверберации в производственных помещениях

№ помещения	Измеренные усредненные значения времени реверберации, с в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	1,36	1,26	1,20	1,18	1,0	0,95	0,89
2	1,28	1,11	1,02	0,88	0,81	0,80	0,77
3	1,17	1,06	1,00	0,98	0,95	0,84	0,73
4	1,32	1,20	1,09	1,00	0,93	0,83	0,78
5	1,86	1,63	1,36	1,25	1,17	1,11	1,11
6	2,17	2,20	2,08	2,01	1,88	1,58	1,32
7	1,44	1,39	1,28	1,19	1,16	1,06	1,03

Вычисленные значения среднего коэффициента звукопоглощения ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}$) и граничного радиуса ($r_{\text{гр}}$) в производственных помещениях приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 — Вычисленные значения среднего коэффициента звукопоглощения и граничного радиуса

№ помещений	Вычисляемые параметры	Рассчитанные значения $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ и $r_{\text{гр}}$, м, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,15	0,16	0,16	0,17	0,20	0,21	0,23
	$r_{\text{гр}}$	1,7	1,8	1,8	1,8	2,0	2,0	2,0
2	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,15	0,19	0,20	0,20	0,22	0,22	0,23
	$r_{\text{гр}}$	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,7	1,8

Продолжение таблицы 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,12	0,16	0,16	0,16	0,17	0,19	0,20
	$r_{\text{гр}}$	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0
4	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,15	0,16	0,19	0,20	0,21	0,24	0,26
	$r_{\text{гр}}$	1,4	1,5	1,6	1,6	1,6	1,7	1,8
5	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,09	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15
	$r_{\text{гр}}$	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
6	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,15	0,17
	$r_{\text{гр}}$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,7	1,9
7	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,23	0,23
	$r_{\text{гр}}$	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,7	1,7

Также отметим низкие акустические качества исследованных помещений, значение $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ составило около 0,2.

Фабрика, г. Пермь. В третьей серии измерений было обследовано 10 производственных помещений, геометрические параметры которых приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 — Геометрические характеристики помещений (Фабрика г. Пермь)

№ помещения	Помещение, рабочее место	Объем помещения, м ³	Общая площадь внутренних поверхностей, м ²
1	2	3	4
1	Производственное помещение 1	1369	799,6
2	Производственное помещение 2	1169	704,4

Продолжение таблицы 2.11

1	2	3	4
3	Производственное помещение 3	482	402,3
4	Производственное помещение 4	1264	793,8
5	Производственное помещение 5	990	637,0
6	Производственное помещение 6	1836,7	1539,9
7	Производственное помещение 7	160	179,9
8	Производственное помещение 8	939	592,0
9	Производственное помещение 9	371	280,8
10	Производственное помещение 10	811	606,0

Данные усредненных значений времени реверберации, полученные на основании результатов измерений в производственных помещениях, приведены в таблице 2.12. Вычисленные значения $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ и $r_{\text{гр}}$ в производственных помещениях приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.12 — Измеренные усредненные значения времени реверберации в производственных помещениях

№ помещений	Измеренные усредненные значения времени реверберации, с в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,61	1,54	1,45	1,36	1,31	1,28	1,08

Продолжение таблицы 2.12

1	2	3	4	5	6	7	8
2	2,32	2,29	2,21	2,02	1,94	1,81	1,63
3	1,34	1,26	1,19	1,16	1,1	1,06	1,0
4	1,51	1,49	1,41	1,32	1,16	1,09	1,02
5	1,42	1,35	1,32	1,20	1,11	1,03	0,95
6	1,47	1,36	1,32	1,30	1,20	1,08	0,94
7	1,41	1,35	1,30	1,19	1,07	0,95	0,81
8	1,91	1,85	1,79	1,78	1,69	1,64	1,60
9	1,37	1,29	1,11	1,06	1,0	0,97	0,85
10	1,28	1,21	1,11	1,05	1,0	0,95	0,85

Таблица 2.13 — Вычисленные значения среднего коэффициента звукопоглощения и граничного радиуса

№ помещений	Вычисляемые параметры	Рассчитанные значения $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ и $r_{\text{гр}}$, м, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,2
	$r_{\text{гр}}$	1,5	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,9
2	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,16
	$r_{\text{гр}}$	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,45	1,5
3	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
	$r_{\text{гр}}$	1,0	1,0	1,1	1,15	1,15	1,2	1,2
4	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,17	0,17	0,18	0,19	0,20	0,22	0,25
	$r_{\text{гр}}$	1,2	1,2	1,4	1,7	1,8	1,9	2,0
5	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,25	0,25

Продолжение таблицы 2.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$r_{\text{гр}}$	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8
6	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,18	0,20
	$r_{\text{гр}}$	2,0	2,1	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
7	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,16
	$r_{\text{гр}}$	0,6	0,65	0,7	0,7	0,75	0,8	0,8
8	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,11	0,11	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16
	$r_{\text{гр}}$	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5
9	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,15	0,16	0,18	0,2	0,21	0,22	0,24
	$r_{\text{гр}}$	0,5	0,9	1,0	1,05	1,1	1,2	1,2
10	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14	0,16	0,17
	$r_{\text{гр}}$	1,4	1,45	1,5	1.55	1,6	1,7	1,8

Заметим, что полученные данные акустических свойств исследованных помещений подтверждают вышесказанное: $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} \leq 0,2$.

2.4.3 Анализ акустических свойств производственных помещений

Всего было обследовано 22 производственных помещения различных объемов и размеров. Полученные измерениями спектры максимальных и минимальных значений времени реверберации в производственных помещениях с учетом [103] показаны на рисунке 2.2. Спектры имеют частотно-зависимый характер (спад с ростом частоты, в пределах 0,6-2,3 с.). Разброс полученных значений времени реверберации связан с разбросом объемов измеренных помещений.

На рисунке 2.3 представлено несколько вычисленных спектров значений средних коэффициентов звукопоглощения, в том числе, полученные минимальный и максимальный спектры. Можно убедиться, что у подавляющего большинства спектров, во всем частотном диапазоне значение среднего коэффициента

звукопоглощения $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ находится в пределах 0,1-0,2, то есть все без исключения исследованные помещения имеют с точки зрения шумозащиты очень низкие акустические качества.

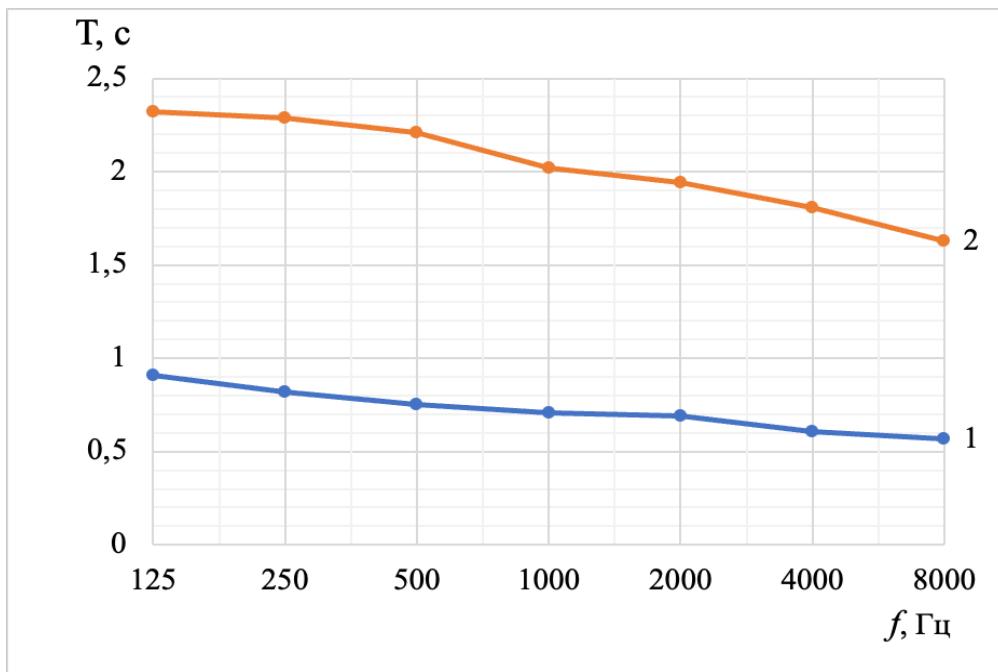


Рисунок 2.2 — Значения времени реверберации, полученные экспериментальным путем в производственных помещениях трех фабрик:
1 — минимальные, 2 — максимальные спектры

Для того, чтобы можно было сравнивать производственные помещения друг с другом по акустическим качествам, нами выбрано значение коэффициента звукопоглощения на частоте 1000 Гц в качестве оценочного критерия.

Оценивая исследованные помещения с помощью предложенного критерия, отметим, что $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ находится в пределах 0,15-0,2. Звуковое поле при $\bar{\alpha}_{\text{пом}} = 0,2$ считается диффузным и при расчетах поправка на отклонение от этого допущения принимается равной 0 (при увеличении значений $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ вводятся поправки, начиная от $\bar{\alpha}_{\text{пом}} = 0,3$).

Чем меньше $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$, тем больше влияние отраженного звука, а тем самым меньше эффективность средств шумозащиты, в частности АЭ. Улучшение

акустических качеств помещений достигается внесением в помещение звукопоглощающих материалов и конструкций.

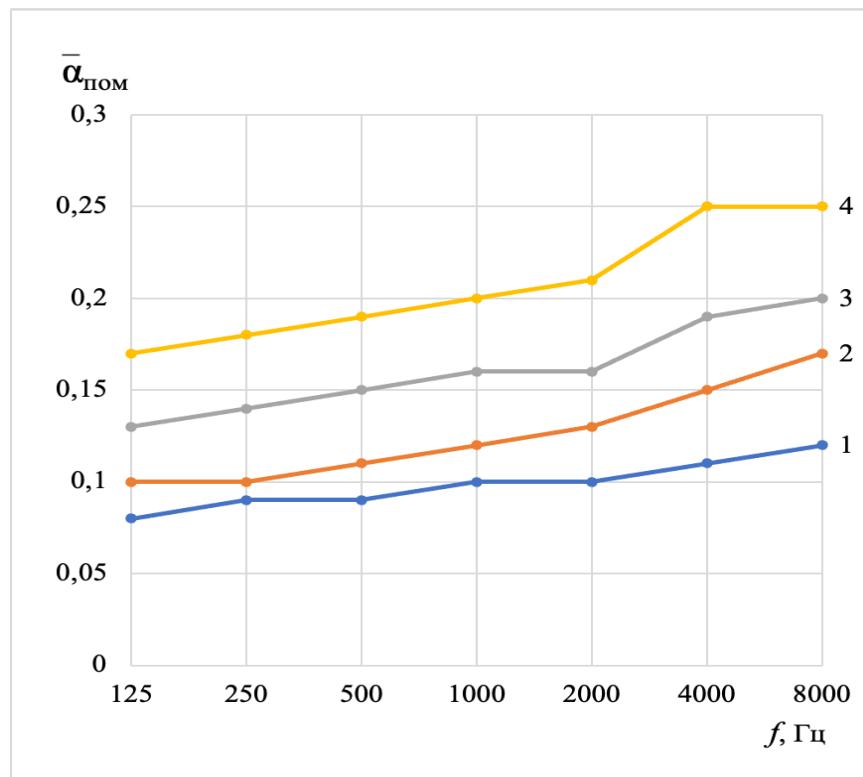


Рисунок 2.3 — Рассчитанные спектры среднего коэффициента звукопоглощения в отдельных производственных помещениях фабрик:

- 1 — помещение №5 (фабрика г. Санкт-Петербург), 2 — помещение №6 (фабрика г. Москва), 3 — помещение №2 (фабрика г. Санкт-Петербург),
- 4 — помещение №5 (фабрика г. Пермь)

Учитывая большую выборку объектов измерений, можно утверждать, что акустически необработанные производственные помещения характеризуются параметрами $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} \leq 0,2$.

Границный радиус является вспомогательной акустической характеристикой производственного помещения, связанной с размещением акустических экранов, установленных в помещении. Вычисленные значения граничного радиуса, на примере четырех помещений различных предприятий показаны на рисунке 2.4.

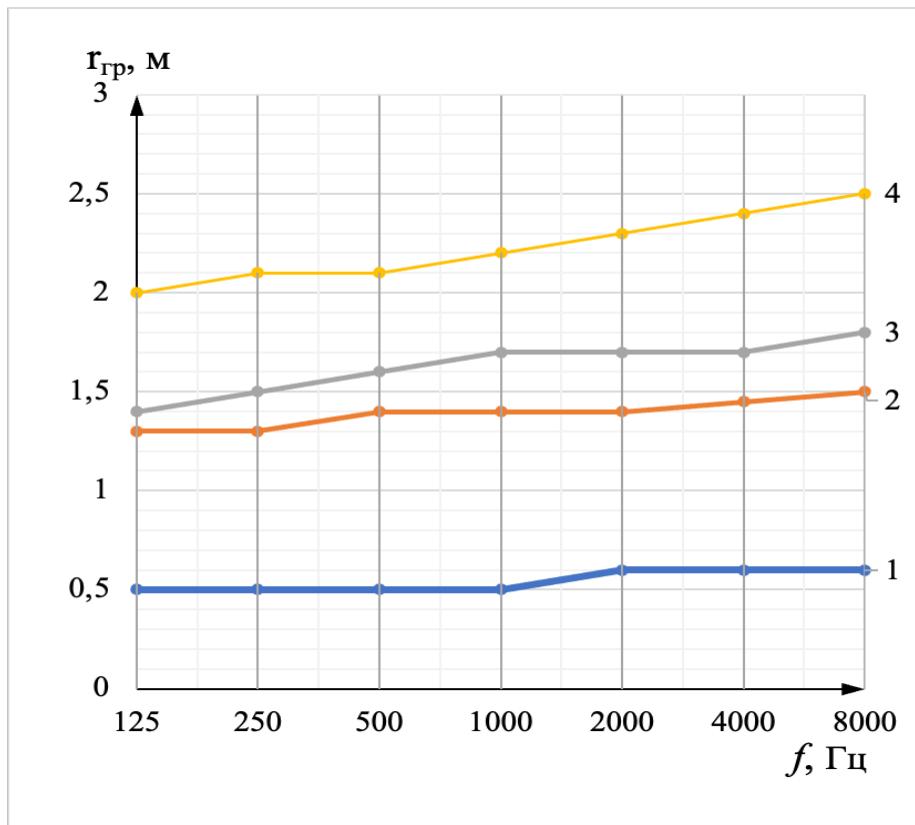


Рисунок 2.4 - Значения граничного радиуса ($r_{\text{гр}}$): 1 — помещение №5 (фабрика г. Санкт-Петербург); 2 — помещение №2 (фабрика г. Пермь); 3 — помещение №4 (фабрика г. Москва); 4 — помещение №6 (фабрика г. Пермь)

Отметим слабо выраженный частотный характер полученных спектров. Величина граничного радиуса связана не только с акустическими свойствами помещений, но и с их объемом. При увеличении объема помещения граничный радиус существенно возрастает.

Величина граничного радиуса для обследованных помещений колеблется в пределах от 0,5-0,7 м до 2,0-2,3 м. Это показывает, что в акустически необработанных небольших помещениях установка АЭ может быть затруднена, т.к. при небольших значениях $r_{\text{гр}}$ УЗД в разных точках за АЭ могут быть примерно одинаковыми из-за влияния отраженного звука. В то же время в помещениях больших размеров установка АЭ в области прямого звука не вызывают затруднений. Таким образом, наряду с определением $\bar{d}_{\text{пом}}^{1000}$, необходимо знать величину $r_{\text{гр}}$ и пользоваться этим на практике.

2.5 Классификация производственных помещений

Для оценки акустических свойств производственных помещений предложено использовать критерий $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$, по которому производственные помещения можно классифицировать, разбив на четыре класса (таблица 2.14).

Таблица 2.14 — Классификация производственных помещений по их акустическим свойствам

Класс помещения	Характер звукового поля	Поправка $10\lg \psi_{\text{пом}}$	Значение критерия $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$	Акустические характеристики помещения
I	диффузное	0	$\leq 0,2$	гулкое, не имеет акустической обработки
II	квазидиффузное I	1,5	0,3	незначительная акустическая обработка
III	квазидиффузное II	2	0,4	значительная акустическая обработка
IV	слабодиффузное	3	0,5	максимально возможная акустическая обработка

Классификация производственных помещений по их акустическим свойствам представляет объективную картину акустических характеристик производственных помещений, определяя численный показатель их возможного акустического состояния: используя предложенный критерий $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} \leq 0,2$ – реально полученная автором и подтвержденная многочисленными экспериментами характеристика акустически необработанных производственных помещений (характер звукового поля – диффузное, поправка $10\lg \psi_{\text{пом}} = 0$ дБ, помещение гулкое, не имеет акустической обработки), а $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ – звуковое поле имеет слабодиффузный характер, поправка $10\lg \psi_{\text{пом}} = 3$ дБ, максимально возможная, реализуемая на практике (по мнению автора), акустическая обработка производственных помещений [106]. Разработанная классификация, на наш взгляд, очень удобна для выбора акустических характеристик помещения, в процессе его

акустической обработки. Основная идея диссертационного исследования – связать акустическую эффективность экранов в области прямого и отраженного звука с акустическими характеристиками помещений, которые определяются в соответствии с предложенной автором классификацией.

Экспериментальные исследования эффективности АЭ в помещениях выполнялись автором в соответствии с предложенной классификацией. Рекомендации по проектированию АЭ в помещениях и выбору средств звукопоглощения также разработаны на основании предложенной классификации.

Выводы по главе

1. Измерения шума (эквивалентные и максимальные уровни звука, дБА) были проведены на рабочих местах и в рабочих зонах четырех производственных предприятий в городах: Санкт-Петербург, Москва и Пермь. Всего было обследовано 22 производственных цеха, измерения проведены в 435 измерительных точках (ТИ).

2. При анализе было установлено, что уровни звука не превышают норму примерно на 10% рабочих мест и в рабочих зонах, в 70% превышения шума до 10 дБА, а в 20% - зарегистрированы существенные превышения от 11 до 22 дБА. Таким образом, проблема защиты от шума на предприятиях исследуемой отрасли является актуальной.

3. Акустические свойства помещений промышленных предприятий были изучены на основании экспериментальных исследований 22 помещений (цехов и производственных участков), для каждого из которых были выполнены измерения времени реверберации, а затем выполнены вычисления среднего коэффициента звукопоглощения (основной показатель) и граничного радиуса (вспомогательный показатель, связанный с размещением акустических экранов в помещении) в октавных полосах в диапазоне частот 125-8000 Гц. Оба расчетных параметра имеют частотно-зависимый характер — увеличение значений при увеличении частоты. Исходный характеристикой для расчётов являлись измеренные значения времени реверберации, которые составили от 0,8-0,5 до 2,3-1,3 с. Вычисленные

значения среднего коэффициента звукопоглощения находятся в диапазоне 0,1-0,2 (за исключением небольшого числа спектров, где эти значения составили 0,21-0,23 в частотном диапазоне 2000-8000 Гц). В качестве оценочного критерия акустических качеств производственных помещений предложено использовать значение среднего коэффициента звукопоглощения на частоте 1000 Гц ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$). Отмечено, что исследуемые производственные помещения имеют низкие акустические качества ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} \leq 0,2$), что снижает эффективность средств шумозащиты, устанавливаемых на пути распространения звука от ИШ до рабочего места или рабочей зоны, в частности, акустических экранов.

4. Предложена классификация акустических свойств производственных помещений в зависимости от значения предложенного критерия и характера звукового поля в помещении:

- I класс: ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} \leq 0,2$), звуковое поле диффузное, помещение гулкое, какое-либо звукопоглощение отсутствует (поправка $10\lg \psi_{\text{пом}} = 0$ дБ);
- II класс: ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$), звуковое поле квазидиффузное I, помещение обладает слабым звукопоглощением (поправка $10\lg \psi_{\text{пом}} = 1,5$ дБ);
- III класс: ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$), звуковое поле квазидиффузное II, помещение обладает заметным звукопоглощением (поправка $10\lg \psi_{\text{пом}} = 2$ дБ);
- IV класс: ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$), звуковое поле слабодиффузное, помещение обладает максимально возможным в производственных условиях звукопоглощением (поправка $10\lg \psi_{\text{пом}} = 3$ дБ).

Использование предложенной классификации позволяет не только систематизировать акустические качества производственных помещений, но упрощает и упорядочивает выбор шумозащиты, устанавливаемой на пути распространения звука от ИШ до защищаемого объекта, в частности, АЭ.

Глава III. РАСЧЕТ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭ

3.1. Расчёт снижения шума АЭ по ГОСТ 31287

Одним из основных нормативных документов, используемых для оценки эффективности АЭ в рабочих помещениях, является ГОСТ 31287-2005 [87]. Формулы для расчета эффективности АЭ, представленные в [87], основаны на положениях оптико-дифракционной теории и рассмотрении разности хода звуковых лучей при наличии АЭ и при его отсутствии. В ГОСТ 31287-2005 [87] предложены две формулы для расчета эффективности АЭ: для случая расположения РТ за АЭ в зоне глубокой акустической тени (в этом случае считается, что экран снижает прямой звук, излучаемый источником), а также при расположении расчетной точки в пределах радиуса реверберации с учетом отражения от ближайшей к источнику шума стены и влияния кромки с наибольшей дифракцией, где звуковое поле формируется прямым и отраженным звуком. Схема расположения акустического экрана в помещении, с учетом отражений звука, а также, обозначения, необходимые для выполнения расчётов согласно [87], показаны на рисунке 3.1.

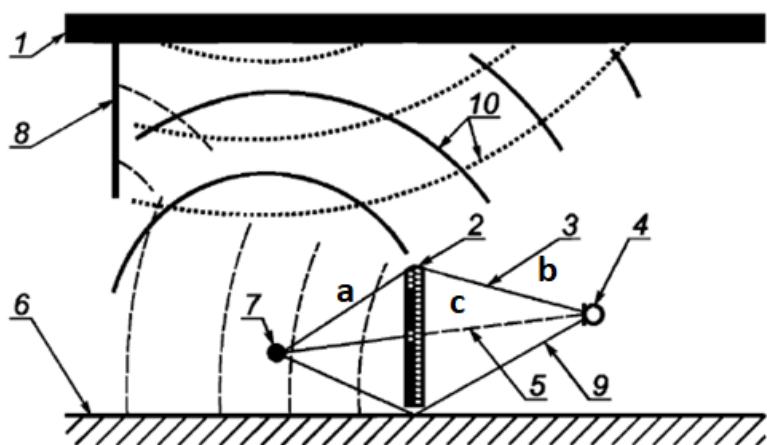


Рисунок 3.1 — Схема распространения звука в помещении при установленном экране: 1 — потолок; 2 — акустический экран; 3 — дифрагирующий звук; 4 — микрофон (расчетная точка, защищаемый от шума объект); 5 — прямой звук; 6 — пол; 7 — источник шума; 8 — акустическая преграда; 9 — отраженный от пола звук; 10 — отраженный и рассеянный звук

В зоне прямого звука (в [87] предлагается этот случай рассматривать как свободное звуковое поле) эффективность АЭ рассчитывается по формуле:

$$\Delta L_{\text{экп}}^{\text{пр}} = 10 \lg \left(3 + 40 \frac{z}{\lambda} \right), \text{дБ} \quad (3.1)$$

где λ — длина звуковой волны, м;

z — разность хода звуковых лучей, м:

$$z = a + b - c, \quad (3.2)$$

где a, b, c — расстояния, указанные на рисунке 3.1.

Снижение звука АЭ с учётом отражения звука в пределах радиуса реверберации (или граничного радиуса) определяется следующим образом [87]:

$$\Delta L_{\text{экп}}^{\text{отр}} = 10 \lg \left(1 + 20 \frac{z}{\lambda} \right), \text{дБ} \quad (3.3)$$

Значение радиуса реверберации (граниченного радиуса) определяется:

$$r_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}, \text{м} \quad (3.4)$$

где A — эквивалентная площадь звукопоглощения помещения, м^2 ;

V — объём помещения, м^3 ;

T — время реверберации в помещении, с.

С целью анализа возможности применения [87] для расчета эффективности АЭ, установленных в помещении, выполнены расчеты эффективности АЭ размерами 2x2 м, а также натурные замеры эффективности АЭ размерами 2x2 м в помещении со средним коэффициентом звукопоглощения на частоте 1000 Гц от 0,2 до 0,5. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными эффективности АЭ в помещении с различными акустическими свойствами в соответствии с предложенным значением $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ (0,2, 0,3, 0,4, 0,5) приведено в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Результаты расчётов АЭ по [87] в сравнении с данными экспериментов

Параметр, формула	Численные значения параметров, эффективность АЭ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\lambda = \frac{c}{f}$, м, $c = 340$ м/с	2,7	1,36	0,68	0,34	0,17	0,08	0,04
$\Delta L_{\text{экп}}^{\text{пр}} = 10 \lg \left(3 + 40 \frac{Z}{\lambda} \right)$, дБ	14	16	20	22	25	28	31
$\Delta L_{\text{экп}}^{\text{опт}} = 10 \lg \left(1 + 20 \frac{z}{\lambda} \right)$, дБ	10	13	16	19	22	25	28
Эффективность АЭ ($\Delta L_{\text{эксп}}$), дБ $\overline{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	1,5	2	2,5	3	4	5	5
Эффективность АЭ ($\Delta L_{\text{эксп}}$), дБ $\overline{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$	2,5	4	5	6,5	8	10,5	11
Эффективность АЭ ($\Delta L_{\text{эксп}}$), дБ $\overline{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$	3,5	5,5	8,5	10	13	15	16
Эффективность АЭ ($\Delta L_{\text{эксп}}$), дБ, $\overline{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$	4,5	8	11	13	17,5	19	20
$\Delta L_{\text{экп}}^{\text{опт}} - \Delta L_{\text{эксп}}$ при $\overline{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$	5,5	5	5	6	5	6	8

Не комментируя подробно данные экспериментов (описаны в главе 4), лишь отметим значительную разницу расчетных и экспериментальных данных, достигающую даже для $\overline{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ значений 5,5-8 дБ. Для помещений с худшими акустическими свойствами (гулких, характеризующимся низких

звукопоглощением) эта разница достигает десятков дБ. Таким образом, на основании выполненного анализа результатов расчетов и экспериментов, сделан вывод о том, что предложенные в ГОСТ 31287-2005 (ИСО 17624-2004) [87] формулы непригодны для расчета эффективности АЭ в помещениях.

Анализ экспериментальных данных также показывает, что допущение, принятое в [87] о том, что, если АЭ в помещении находится в зоне прямого звука, то условия снижения им шума аналогичны условиям свободного звукового поля, некорректно, так как согласно выполненным исследованиям даже в зоне прямого звука в помещении обязательно присутствуют определённый вклад отражённого звука, который будет также влиять на эффективность АЭ в помещении. При этом расчет АЭ, выполненный для условий свободного звукового поля (область прямого звука), можно использовать, если вносить в результаты расчета поправки на влияние отражённого звука (например, из данных экспериментов, в соответствии с предложенной классификацией помещений).

Для точного расчета эффективности АЭ в помещении, требуется разработка новых формул с использованием статистической и геометрической теорий акустики и метода последовательного преобразования звуковых полей [101].

3.2. Основные допущения. Границы расчетов

Звуковое поле в помещении характеризуется взаимным влиянием полей прямого и отраженного звука. Доля прямого звука зависит, в основном, от характеристик источника шума, а также взаимного расположения источника, рабочего места и акустического экрана. Доля отраженного звука зависит, в основном, от объемно-планировочных решений помещения, акустических характеристик поверхностей, наличия рассеивающих звук элементов оборудования, мебели и прочих предметов, необходимых для производственного процесса.

Особенностью применения акустических экранов для защиты от шума является наличие дифракционных явлений на «открытых» ребрах экрана, что означает существенную зависимость эффективности экрана от условий его

установки. Поэтому, исследуя применение АЭ для снижения шума на рабочих местах в помещениях, важно учесть влияние различных параметров на снижение акустическим экраном звукового давления на конкретном рабочем месте.

Для анализа звуковых полей в помещениях применяются методы расчета, содержащие элементы трех основных теорий акустики: волновой, геометрической и статистической [77]. Применение волновой теории акустики требует рассмотрения замкнутого объема в виде сложной колебательной системы, что приводит к громоздким математическим моделям, а также к чрезмерных временными и вычислительными затратами, тем самым ограничивая применение волновой теории для расчетов производственных помещений. В соответствии с геометрической теорией акустики звуковое поле в помещении представляется в виде суперпозиции звуковых лучей прямой волны с бесконечным числом волн, отраженных от поверхностей помещения. Оценка точности применения геометрических методов для задач акустики наиболее полно приведена в работах Л.М. Бреховских [78].

Наиболее подходящими для разработки математических моделей эффективности АЭ в производственных помещениях являются статистический энергетический метод или геометрический статистический метод, которые позволяют уйти от необходимости разделения звуковой энергии на отражаемую и рассеиваемую составляющие (что весьма сложно практически, но важно для геометрической теории) и не учитывают строгое предположение статистической теории о равномерном распределении отраженного звука по помещению.

Статистическая геометрическая теория предполагает квазидиффузный характер распределения звукового поля в помещении. При этом главным преимуществом является возможность анализа распределения звуковой энергии в помещении без предварительного рассмотрения волновых закономерностей распространения, отражения и рассеяния звука. Следует отметить, что степень диффузности поля зависит от звукопоглощения и геометрических параметров помещения. С ростом звукопоглощения поверхностей помещения снижается доля отраженного звука и нарушается требование однородности и изотропности поля.

Кроме того, предположение об однородности отраженного поля, используемое при выводе статистических формул, ограничивает диапазон их практического применения только для помещений с близкими соотношениями линейных размеров – соразмерных помещений.

Согласно определению Шредера [3] звуковое поле в случае спадов отраженной энергии имеет квазидиффузный характер, обусловленный наличием в каждой точке объема результирующего потока энергии при сохранении формального признака диффузности по изотропности угловой направленности элементарных потоков. Поэтому весь частотный диапазон подразделяют на три основные области: вынужденных колебаний, отраженной звуковой энергии и квазидиффузного звукового поля (Рисунок 3.2). Квазидиффузное звуковое поле определяется путем энергетического суммирования звуковой энергии, пришедшей от различных источников в рассматриваемую точку.

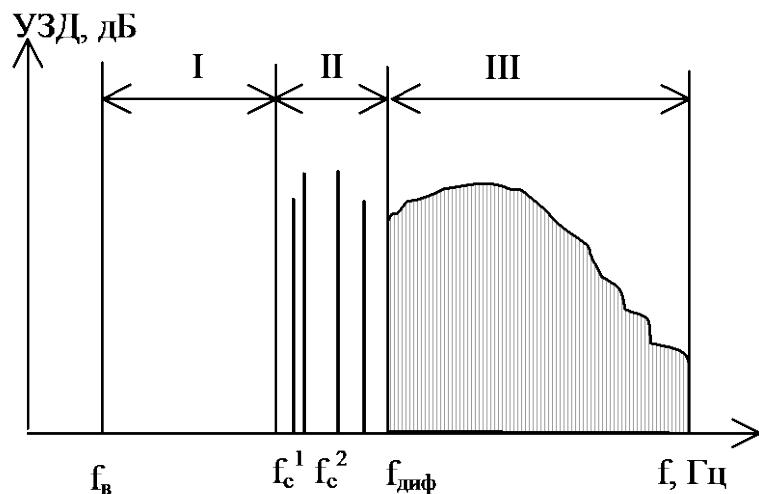


Рисунок 3.2 Области звукового поля в помещении:

I – вынужденных колебаний (прямого звука); II – единичных отражений (прямого и отраженного звука); III – квазидиффузного поля (поздней reverberации)

Границы исследования в настоящей работе определены допустимостью аппроксимации звукового поля в помещении как квазидиффузного звукового поля, исходя из условием Майера [3]. Учитывая, что рабочие места, как правило,

располагаются в производственных помещениях объемом не менее 50 м^3 , граница применимости расчетов по условию Майера составит 136 Гц.

С целью дальнейшего анализа параметров звукового поля в помещении, обратимся к своду правил [96], в котором предложено условно разделить звуковое поле в помещении с одним источником звука на три части: I – прямой звук ($r \leq 0,5r_{\text{rp}}$), II – прямой и отраженный звук ($0,5r_{\text{rp}} < r < 2r_{\text{rp}}$), III – отраженный звук ($r \geq 2r_{\text{rp}}$). Условная схема звукового поля в помещении с учетом влияния прямого и отраженного звука показана на рисунке 3.3.

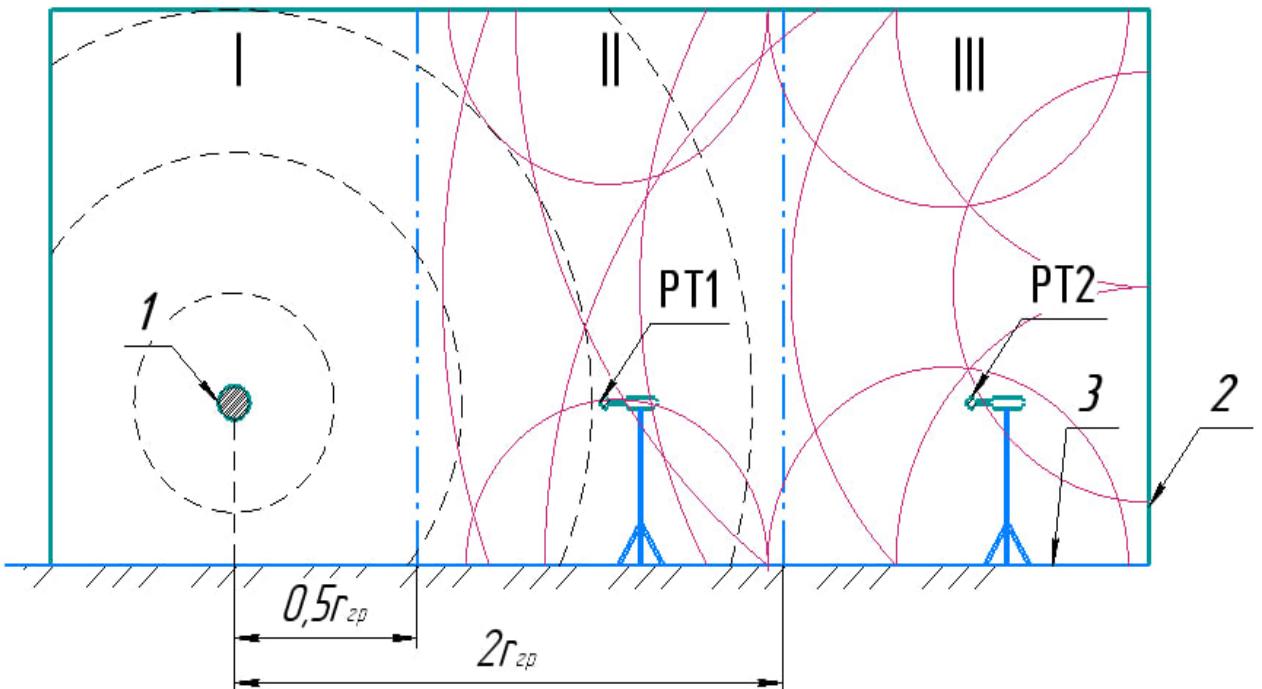


Рисунок 3.3 – Схема звукового поля в помещении: 1 – источник шума, 2 – помещение, 3 – опорная поверхность, I – зона преимущественного действия прямого звука, II – зона действия прямого и отраженного звука, III – зона действия отраженного звука, черным пунктиром показано действие прямого звука, излучаемого источником шума, красным условно показан отраженный звук

Пользуясь рассмотренными положениями [96], расчет АЭ в помещении предлагается выполнить для двух условий:

$$1. \text{ в границах действия прямого и отраженного звука: } 0,5r_{\text{гр}} < r < 2r_{\text{гр}}, \quad (3.5)$$

$$2. \text{ в границах преимущественного действия отраженного звука: } r \geq 2r_{\text{гр}}. \quad (3.6)$$

Вывод формул расчета эффективности АЭ в помещении для указанных условий выполняется с использованием метода последовательного преобразования звуковых полей [5, 103]. Предлагается с использованием указанного метода, получить формулу для расчёта АЭ в зонах прямого и отраженного звука.

Формулы разработаны в соответствии с принципом Гюйгенса, согласно которому каждую точку среды можно считать центром расходящейся или вторичной волны, интенсивность которой пропорциональна первичному возмущению в этой точке. Акустический экран рассматривается как набор вторичных излучателей звука. Звуковое поле в РТ формируется вкладами вторичных источников шума. Шум в расчетной точке определяется энергетическим суммированием вкладов от этих источников.

При выводе формул приняты следующие допущения:

- помещение соразмерное;
- в помещении – один точечный источник шума;
- звуковое поле вблизи АЭ принято квазидиффузным, отражение учтено с использованием метода мнимых источников;
- интерференционные явления не учитываются;
- звук дифрагирует к защищаемому объекту через свободное ребро АЭ, являющееся вторичным линейным ИШ;
- прохождение звука через АЭ не учитывается, АЭ принят звуконепроницаемой конструкцией, звукоизоляция экрана ($ZI_{\text{экр}}$) существенно выше, чем его требуемая эффективность ($\Delta L_{\text{экр}}$), то есть выполняется условие: ($ZI_{\text{экр}} >> \Delta L_{\text{экр}}$);

- звукопоглощение опорной поверхности между ИШ и РТ не учитывается.

3.3. Расчёт эффективности АЭ в помещении в зоне действия прямого и отраженного звука

Расчётная схема показана на рисунке 3.4.

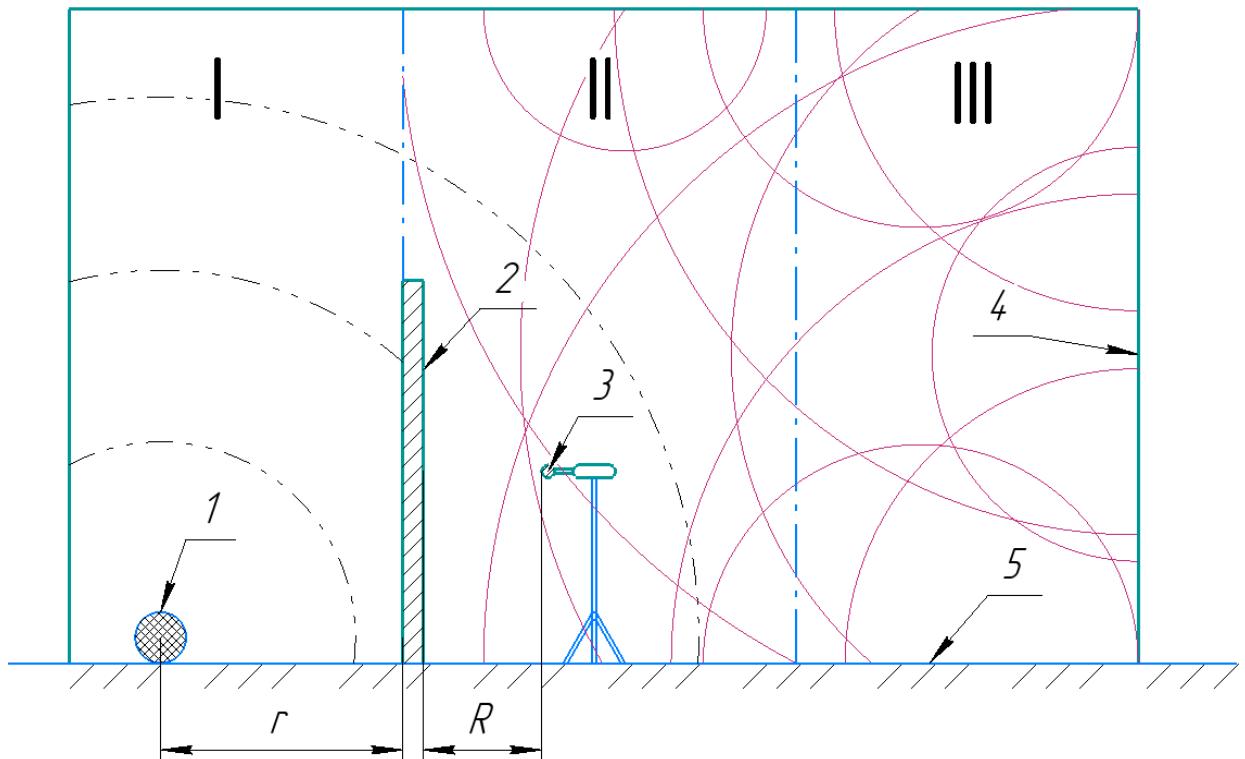


Рисунок 3.4 — Расчетная схема АЭ в зоне прямого и отраженного звука:

- 1 — источник шума (ИШ), 2 — акустический экран (АЭ),
- 3 — расчётная точка (РТ), 4 — помещение, 5 – опорная поверхность.

Акустическая эффективность АЭ определяется в виде [5]:

$$\Delta L_{\text{экр}} = 10 \lg \frac{I_{\text{РТ}}^{\delta/\exists}}{I_{\text{РТ}}^{c/\exists}}, \text{дБ} \quad (3.7)$$

где $I_{\text{РТ}}^{\delta/\exists}$ — интенсивность звука в РТ без АЭ, Вт/м²;

$I_{\text{РТ}}^{c/\exists}$ — интенсивность звука в РТ с установленным АЭ, Вт/м².

Вывод формулы выполняется при следующих условиях:

- $0,5r_{\text{р}} < r < 2r_{\text{р}}$
- РТ расположена в зоне действия прямого и отраженного звука.

Определим числитель в формуле (3.7) следующим образом:

$$I_{\text{РТ}}^{\frac{5}{3}} = \frac{W_{\text{ист}}}{2\pi(r+R)^2}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.8)$$

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

r — расстояние от ИШ до АЭ, м;

R — расстояние от АЭ до РТ, м.

Выполним определение знаменателя в формуле (3.7), используя метод последовательного преобразования звуковых полей [5].

Интенсивность звука, падающего в нижнюю часть АЭ:

$$I_{\text{пад}} = \frac{W_{\text{ист}}}{2\pi r^2}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.9)$$

Акустическая мощность, излучаемая в нижней части АЭ, вторичным условным ИШ шириной $r_0=1$ м.

$$W_h = I_{\text{пад}} l_{\text{экр}} \cdot 1, \text{ Вт} \quad (3.10)$$

где $l_{\text{экр}}$ — длина АЭ, м; r_0 — ширина вторичного условного источника шума, излучаемого в нижней части АЭ, равная 1 м;

Интенсивность АЭ в верхней части АЭ (на свободном ребре):

$$I_p = \frac{W_h(1-\alpha_{\text{экр}})}{\pi h_{\text{экр}} l_{\text{экр}}} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2h_{\text{экр}}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.11)$$

где $\alpha_{\text{экр}}$ — частотно-зависимый коэффициент звукопоглощения АЭ;

$h_{\text{экр}}$ — высота АЭ, м.

Мощность звука, дифрагированного через АЭ:

$$W_{\text{экп}} = I_p l_{\text{экп}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{экп}} \text{Вт} \quad (3.12)$$

где λ — длина звуковой волны, м;

$\beta_{\text{дифр}}^{\text{экп}}$ — коэффициент дифракции АЭ, равный π .

Интенсивность звука в РТ с АЭ:

$$I_{\text{РТ}}^{c/\exists} = \frac{W_{\text{экп}}}{\pi l_{\text{экп}} R} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экп}}}{2R}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.13)$$

Выполнив преобразования, получим:

$$I_{\text{РТ}}^{c/\exists} = \frac{W_{\text{ист}} l_{\text{экп}} \cdot 1(1 - \alpha_{\text{экп}}) l_{\text{экп}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{экп}}}{\pi r^2 \cdot \pi h_{\text{экп}} l_{\text{экп}} \cdot \pi l_{\text{экп}} R} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экп}}}{2h_{\text{экп}}} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экп}}}{2R}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.14)$$

После упрощений (3.14) подставим (3.8) и (3.14) в (3.7):

$$\Delta L_{\text{экп}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}} 2\pi r^2 \pi h_{\text{экп}} \pi R}{2\pi(r+R)^2 r_0 W_{\text{ист}} (1 - \alpha_{\text{экп}}) \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{экп}} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экп}}}{2h_{\text{экп}}} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экп}}}{2R}}, \text{ дБ, (3.15)}$$

Выполняем преобразование (3.15):

$$\Delta L_{\text{экп}} = 10 \lg \frac{r^2 R}{(r + R)^2 r_0} + 10 \lg \frac{h_{\text{экп}}}{\lambda} - 10 \lg (1 - \alpha_{\text{экп}}) - 10 \lg \beta_{\text{дифр}}^{\text{экп}} - 10 \lg \left(\arctg \frac{l_{\text{экп}}}{2h_{\text{экп}}} \right) - 10 \lg \left(\arctg \frac{l_{\text{экп}}}{2R} \right) + 10 \lg \pi^2 - \Delta L_{\text{ном}}^f + \Delta L_{\phi}^f \text{ дБ, (3.16)}$$

В полученную формулу введены экспериментальные поправки: $\Delta L_{\text{ном}}^f$ на влияние отраженного звука в помещении, ΔL_{ϕ}^f — влияние формы АЭ на его эффективность. Отрицательная частотно-зависимая поправка ($\Delta L_{\text{ном}}^f$) будет получена для четырех классов помещений (см. табл. 4.9 глава 4). Положительная частотно- зависимая поправка (ΔL_{ϕ}^f) будет получена для Г-образного, П-

образного и полузамкнутого АЭ (см. табл. 4.5 глава 4). Результаты расчётов АЭ для РТ в области II (см. рисунок 3.4) в сравнении с данными экспериментов на опытном стенде (см. главу 4) приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Расчёт АЭ в области прямого и отраженного звука

Параметр, формула	Параметры, разность УЗД, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\lambda = \frac{c}{f}$, м.	2,7	1,36	0,68	0,34	0,17	0,08	0,04
$10\lg \frac{r^2 R}{(r + R)^2 r_0}$ $r = 1\text{м.}$ $R = 0,5\text{м.}$	-6,5	-6,5	-6,5	-6,5	-6,5	-6,5	-6,5
$10\lg \frac{h_{\text{экп}}}{\lambda}$ $h_{\text{экп}} = 2\text{м.}$	-1,3	1,7	4,7	7,7	10,7	13,7	16,7
$\alpha_{\text{экп}}$	0,6	0,7	0,75	0,75	0,8	0,7	0,65
$10\lg(1 - \alpha_{\text{экп}})$	-3	5,2	-6	-6	-7	-5,2	-4,6
$10\lg \left(\operatorname{arctg} \frac{l_{\text{экп}}}{2h_{\text{экп}}} \right)$	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3
$10\lg \left(\operatorname{arctg} \frac{l_{\text{экп}}}{2R} \right)$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\Delta L_{\text{экп}}$ (расчет), дБ	4	8,2	12	15	19	20,3	22,6
$\Delta L_{\text{экп}}$ (эксперимент), дБ	6	10	14	16	20	22	23
Отклонение данных, дБ	-2	-1,8	-2	-1	-1	-1,7	-0,4

Сравнительный анализ данных расчётов и экспериментов показал, что отклонение во средне и высокочастотном диапазоне не превышает 2 дБ, что можно признать удовлетворительным.

3.4 Расчет эффективности АЭ в помещении в зоне действия отраженного звука

Ослабление шума (или акустическую эффективность) АЭ в области отраженного звука определим с учётом акустических свойств помещения [107]. Расчёчная схема показана на рисунке 3.5.

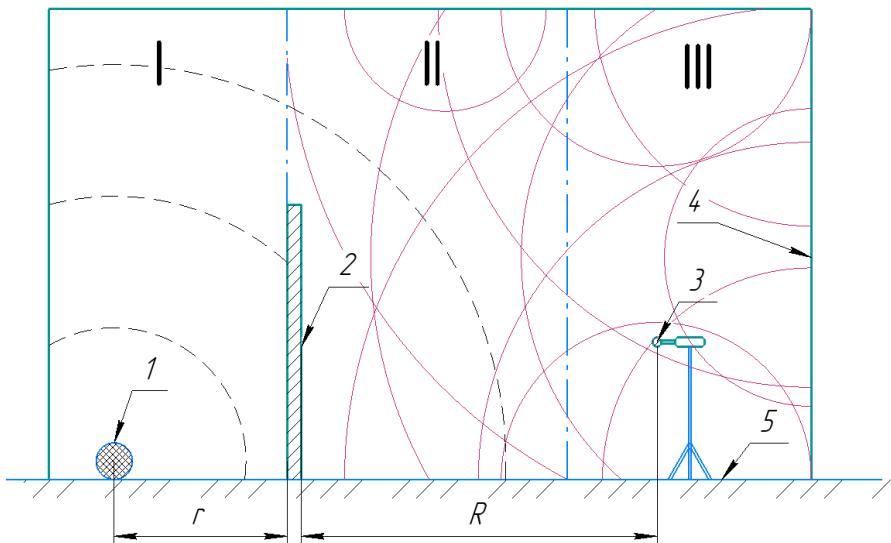


Рисунок 3.5 — Расчетная схема АЭ в зоне отраженного звука: 1 — источник шума (ИШ), 2 — акустический экран (АЭ), 3 — расчёчная точка (ПТ), 4 — помещение, 5 — опорная поверхность

При выводе формулы приняты допущения:

- ПТ находится в области преимущественного действия отраженного звукового поля ($r + R \geq 2r_{\text{рп}}$);
- АЭ звуконепроницаемый ($\text{ЗИ}_{\text{экр}} \gg \Delta L_{\text{экр}}$).

Для случая отсутствия АЭ, интенсивность в расчетной точке рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{\text{ПТ(пом)}}^{\delta/\text{з}} = W_{\text{ист}} \left[\frac{1}{2\pi(r+R)^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha}_{\text{пом}})}{\psi_{\text{пом}} A_{\text{пом}}} \right], \text{Вт/м}^2, \quad (3.17)$$

где $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ — частотно-зависимый средний коэффициент звукопоглощения помещения;

$A_{\text{пом}}$ — эквивалентная площадь звукопоглощения помещения, м²;

$\psi_{\text{пом}}$ — коэффициент, показывающий степень отклонения характера звукового поля от идеального диффузного в зависимости от $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ (таблица 3.3).

Таблица 3.3 — Значения поправки $\psi_{\text{пом}}$ [3]

$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	$\psi_{\text{пом}}$	10lgψ, дБ
0,2	1,25	1
0,4	1,6	2
0,5	2,0	3
0,6	2,5	4

Для получения аналогичного выражения при наличии АЭ воспользуемся преобразованным выражением (3.14). Тогда, интенсивность в РТ при наличии АЭ:

$$I_{\text{РТ(пом)}}^{c/\exists} = W_{\text{ист}} \left[\frac{(1-\alpha_{\text{экр}})\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{экр}} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2h_{\text{экр}}} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2R}}{2\pi r^2 \cdot \pi h_{\text{экр}} \cdot \pi R} + \frac{4(1-\bar{\alpha}'_{\text{пом}})}{\psi'_{\text{пом}} A'_{\text{пом}}} \right], \text{ Вт/м}^2 \quad (3.18)$$

Подставим (3.15) и (3.16) в (3.5) получим формулу для расчёта эффективности АЭ в помещении области III (Рисунок 3.4), т.е. области отраженного звука:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{экр}}^{\text{пом}} &= 10 \lg \left[\frac{1}{2\pi(r+R)^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha}_{\text{пом}})}{\psi_{\text{пом}} A_{\text{пом}}} \right] - \\ &- 10 \lg \left[\frac{(1-\alpha_{\text{экр}})\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{экр}} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2h_{\text{экр}}} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2R}}{2\pi^3 r^2 h_{\text{экр}} R} + \frac{4(1-\bar{\alpha}'_{\text{пом}})}{\psi'_{\text{пом}} A'_{\text{пом}}} \right], \text{ дБ} \end{aligned} \quad (3.19)$$

где $\bar{\alpha}'_{\text{пом}}$ — средний коэффициент звукопоглощения после установки в помещении АЭ, обладающего звукопоглощающими свойствами;

$\psi'_{\text{пом}}$ — коэффициент, показывающий отклонение звукового поля от диффузного;

$A'_{\text{пом}}$ — эквивалентная площадь звукопоглощения в помещении после установки в помещении АЭ, обладающего звукопоглощающими свойствами.

В таблице 3.4 дан пример расчёта эффективности АЭ в помещении, когда РТ расположена в области отраженного звука. Акустический экран, который устанавливается в помещении, с двух сторон облицован звукопоглощающим материалом.

Таблица 3.4 — Результаты расчётов акустической эффективности АЭ в помещении при расположении РТ в области отраженного звука

Параметр, формула	Вычисленные значения в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$\bar{\alpha}'_{\text{пом}}$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
$10 \lg \left[\frac{1}{2\pi(r+R)^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha}_{\text{пом}})}{\psi_{\text{пом}} A_{\text{пом}}} \right]$	-6,4	-6,4	-6,4	-6,4	-6,4	-6,4	-6,4
$A'_{\text{пом}}$	20	21,6	22,4	22,4	22,4	22,4	21,6
$\frac{4(1-\bar{\alpha}'_{\text{пом}})}{\psi'_{\text{пом}} A'_{\text{пом}}}$	0,17	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16
$10 \lg \left[\frac{(1-\alpha_{\text{экр}}) \lambda \beta_{\text{дифр}} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2h_{\text{экр}}} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2R} + \frac{4(1-\bar{\alpha}'_{\text{пом}})}{\psi'_{\text{пом}} A'_{\text{пом}}}}{2\pi^3 r^2 h_{\text{экр}} R} \right]$	7,7	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,0
$\Delta L_{\text{экр}}$ (расчет), дБ	1,3	1,6	1,8	1,8	1,8	1,8	1,6
$\Delta L_{\text{экр}}$ (эксперимент), дБ	0,5	1,5	2	2	2	2,5	3
Разница данных, дБ	0,8	0,1	0,2	0,2	0,2	0,7	1,4

Сравнительный анализ данных расчётов и экспериментов показал хорошее совпадение результатов, отклонение составило 0,1-1,4 дБ.

Выводы по главе:

1. Расчёт по формулам, представленным в нормативном документе ГОСТ 31287-2005 (ИСО 17624-2004), показал неприемлемое отклонение расчётных данных от данных экспериментов, что означает, что представленные в НТД формулы практически не работают для расчета эффективности АЭ в помещениях. В основу этих формул положена оптико-дифракционная теория, базирующаяся на разности хода звуковых лучей в присутствии экрана, определяемая числом Френеля.

2. Расчет акустической эффективности АЭ предложено проводить для двух случаев расположения РТ на расстоянии r от ИШ относительно граничного радиуса и соответственно характера звукового поля: в области прямого и отраженного звука ($0,5r_{\text{гр}} < r < 2r_{\text{гр}}$) и в области отраженного звука ($r \geq 2r_{\text{гр}}$).

3. Основываясь на статистической и геометрической теории акустики и методе последовательного преобразования звуковых полей, получены формулы для расчётов АЭ, для РТ в области действия прямого и отраженного звука. Эффективность АЭ зависит от акустических свойств помещения, от формы АЭ, расположения его в пространстве, высоты АЭ, его поглощающих свойств и коэффициента дифракции. Экспериментальные поправки на влияние помещения и форму АЭ будут получены и изложены в главе 4. Для АЭ размером 2x2 м был выполнен расчет по полученной формуле для условий свободного звукового поля и проведен эксперимент, результат которого показал, что отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 1-2 дБ, что обеспечивает приемлемую точность расчетной формулы.

4. При нахождении РТ за пределами граничного радиуса, то есть в зоне преимущественного действия отраженного звука, также получена формула для расчётов эффективности АЭ, в которой, помимо вышеуказанных параметров, также включены параметры, показывающие поглощающие (отражающие) свойства помещений (средний коэффициент звукопоглощения, эквивалентная площадь

звукопоглощения и коэффициент диффузности звукового поля), как до, так и после установки АЭ. Экспериментальная проверка показала приемлемую точность результатов расчетов, отклонение которых от экспериментальных данных составило 0,1-1,4 дБ.

**Глава IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО
ПРОЕКТИРОВАНИЮ**

4.1 Краткое описание опытного стенда

Экспериментальные исследования эффективности АЭ выполнены на стенде, представляющем собой набор деревянных акустических экранов трех типоразмеров, а также комплект измерительной аппаратуры, включающий шумомеры, искусственный ненаправленный источник звука и другое необходимое оборудование. Все средства измерений, использованные при испытаниях, проводимых в помещении и в свободном звуковом поле (вне помещения), внесены в государственный реестр и имеют действующие свидетельства о поверке. Сведения об измерительной аппаратуре и оборудовании, применяемом для проведения экспериментов приведены в разделе 2.2.1.

Экспериментальные исследования проводились на двух испытательных площадках: на открытом воздухе (в условиях свободного звукового поля), где испытательная площадка была свободна от каких-либо отражающих (поглощающих) предметов и сооружений в радиусе 30 м от ее центра, а также в испытательном помещении. Испытываемые конструкции и аппаратура располагались в центре испытательной площадки или в центре помещения.

Испытательное помещение имело следующие размеры: высота — 3,6 м, длина — 6,4 м, ширина — 5,6 м, площадь всех поверхностей — 159 м². Стены помещения, потолок и пол исходно бетонные, последовательно (в 4 этапа) облицовывались ЗПМ различной площади. Акустические характеристики помещения, моделируемые последовательно в период натурных испытаний, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Акустические характеристики испытательного помещения

№ этапов	Обозначение измеренных (T, с) и вычисленных параметров ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}$)	Измеренные (T, с) и вычисленные ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}$, $r_{\text{гр}}$, м) параметры в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Этап I	T, с *	0,92	0,80	0,55	0,55	0,54	0,43	0,40
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ **	0,14	0,16	0,2	0,2	0,24	0,31	0,30
	$r_{\text{гр}}$, м **	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0
Этап II	T, с	0,63	0,60	0,59	0,40	0,40	0,36	0,31
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,21	0,21	0,22	0,33	0,33	0,37	0,40
	$r_{\text{гр}}$, м	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,2	1,2
Этап III	T, с	0,55	0,53	0,40	0,30	0,28	0,23	0,21
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,24	0,25	0,33	0,43	0,47	0,58	0,6
	$r_{\text{гр}}$, м	0,9	0,9	1,0	1,2	1,2	1,4	1,4
Этап IV	T, с	0,35	0,29	0,27	0,25	0,23	0,19	0,18
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,36	0,46	0,48	0,51	0,57	0,68	0,70
	$r_{\text{гр}}$, м	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,5	1,5

* T, с — время реверберации;

** $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ — усредненный коэффициент звукопоглощения;

*** $r_{\text{гр}}$, м — граничный радиус.

Характеристики звукопоглощения испытательного помещения изменялись в соответствии с предложенным критерием $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000}$ поэтапно (путем увеличения площади звукопоглощения). По выбранному критерию $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000}$ соответствовали (округленно): этап I – 0,2, этап II – 0,3, этап III – 0,4, этап IV – 0,5. Значения граничного радиуса $r_{\text{гр}}$ с увеличением $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000}$ увеличивались: этап I – 0,8 м, этап II – 1,0 м, этап III – 1,2, этап IV – 1,3.

В качестве материала для выполнения акустической обработки помещения использовались минеральные плиты.

Заметим, что полученные значения Т и $\bar{\alpha}_{\text{ном}}$ на I этапе близки к значениям, полученным при изучении акустических свойств реальных производственных помещений, описанных в главе 2.

4.2 Методика проведения испытаний АЭ в свободном звуковом поле

4.2.1 Опытные акустические экраны

На обеих площадках были испытаны экраны следующих типоразмеров: 1x1 м, 1,5x1,5 м и 2x2 м двух модификаций — с облицовкой звукопоглощающим материалом по всей плоскости и без облицовки; на открытой площадке были испытаны АЭ различной формы: плоские, Г-образные, П-образные и полузамкнутые.

Внешний вид опытных АЭ различной формы и схемы измерений приведены на рисунках 4.1—4.7. Перечень измерений и сведения об опытных образцах приведены в таблице 4.2.

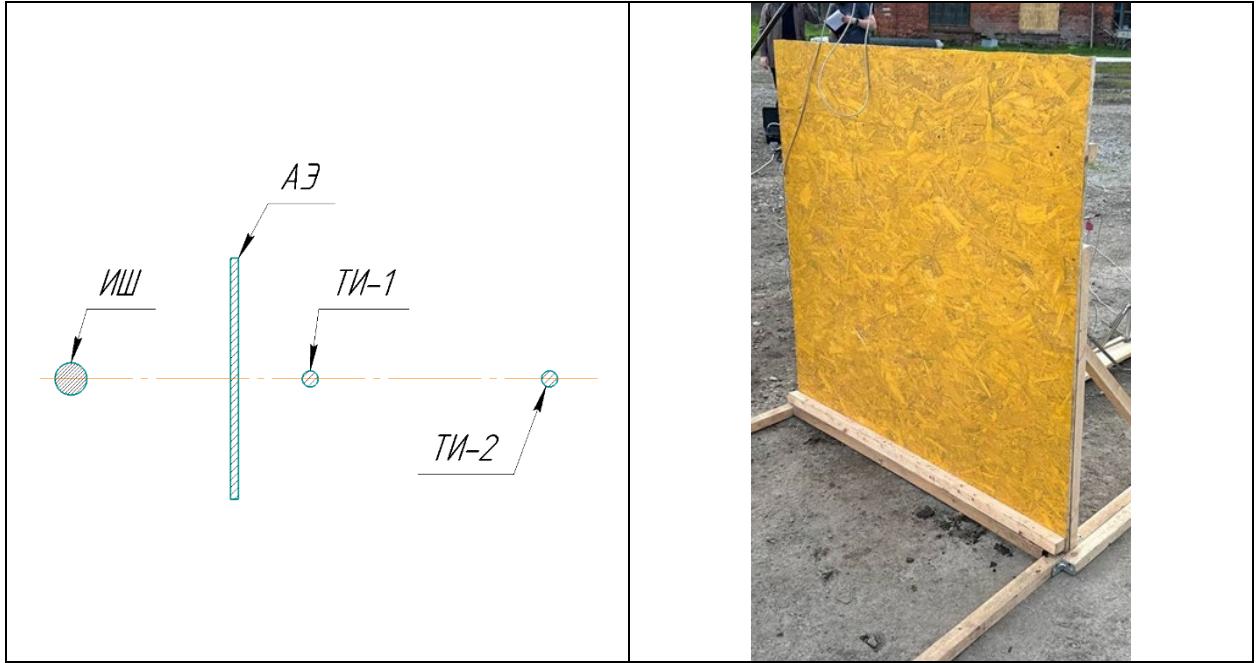


Рисунок 4.1 – Плоский АЭ: ИШ – искусственный ненаправленный источник шума; АЭ – испытываемый акустический экран, ТИ-1, ТИ-2 – точки измерений, где располагались шумометры

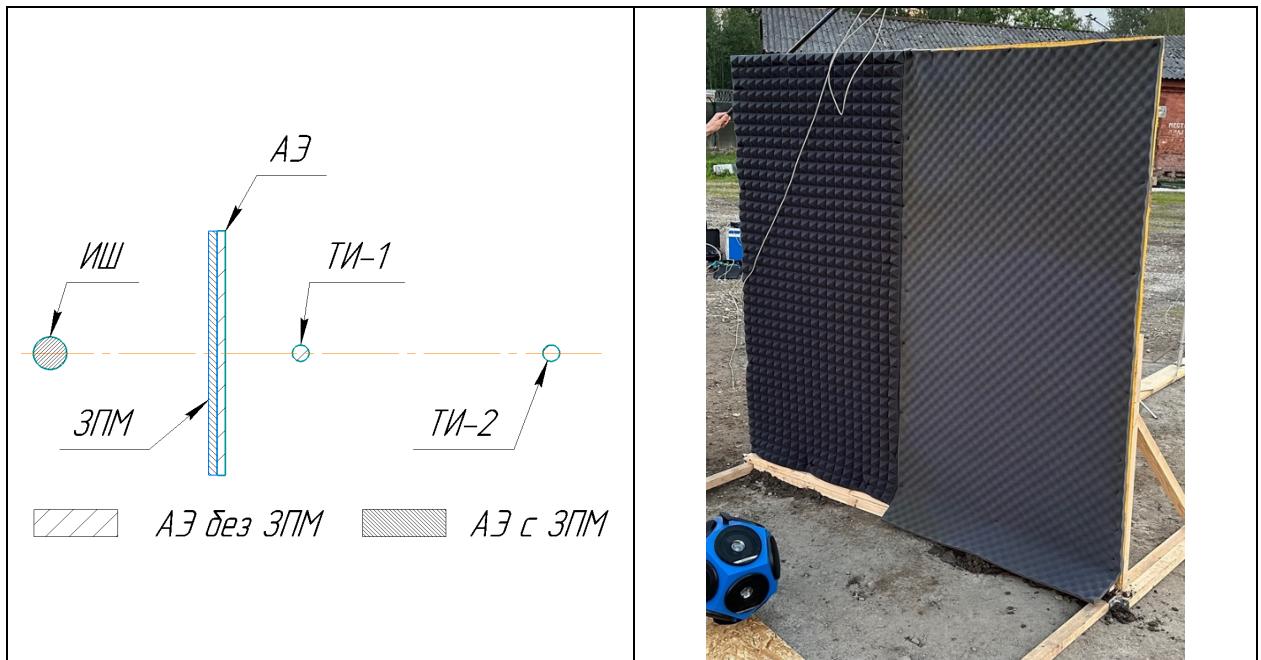


Рисунок 4.2 – Плоский АЭ с ЗПМ: ИШ – искусственный ненаправленный источник шума; АЭ – испытываемый акустический экран, ТИ-1, ТИ-2 – точки измерений, где располагались шумометры

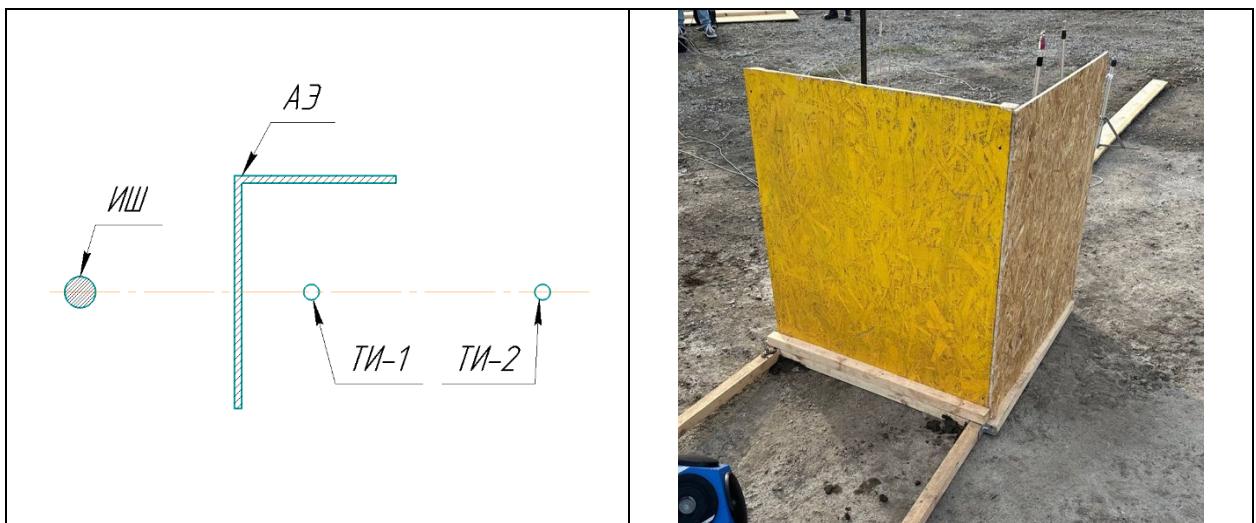


Рисунок 4.3 – Г-образный АЭ: ИШ – искусственный ненаправленный источник шума; АЭ – испытываемый акустический экран, ТИ-1, ТИ-2 – точки измерений, где располагались шумометры

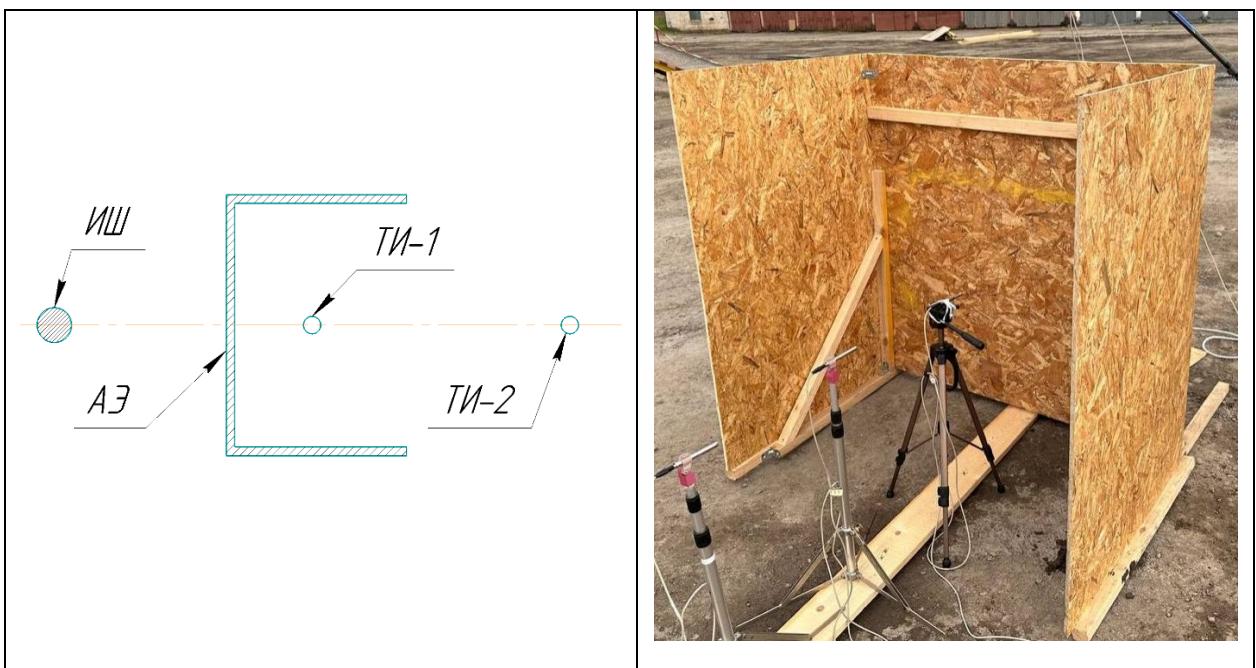


Рисунок 4.4 – П-образный АЭ: ИШ – искусственный ненаправленный источник шума; АЭ – испытываемый акустический экран, ТИ-1, ТИ-2 – точки измерений, где располагались шумометры

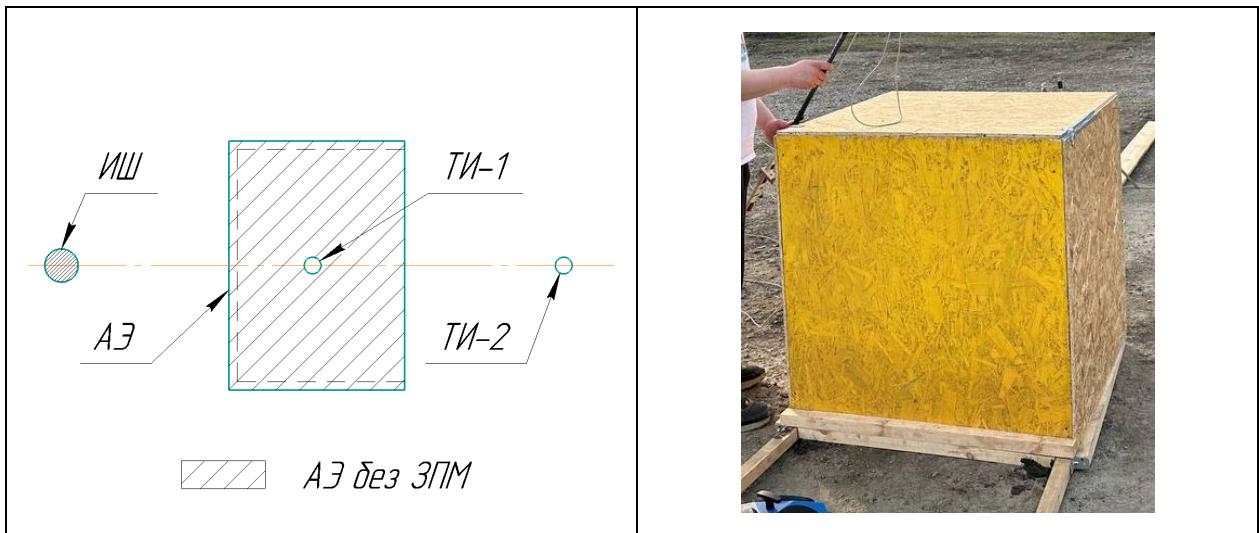


Рисунок 4.5 — Полузамкнутый АЭ: ИШ — искусственный ненаправленный источник шума; АЭ — испытываемый акустический экран, ТИ-1, ТИ-2 — точки измерений, где располагались шумометры

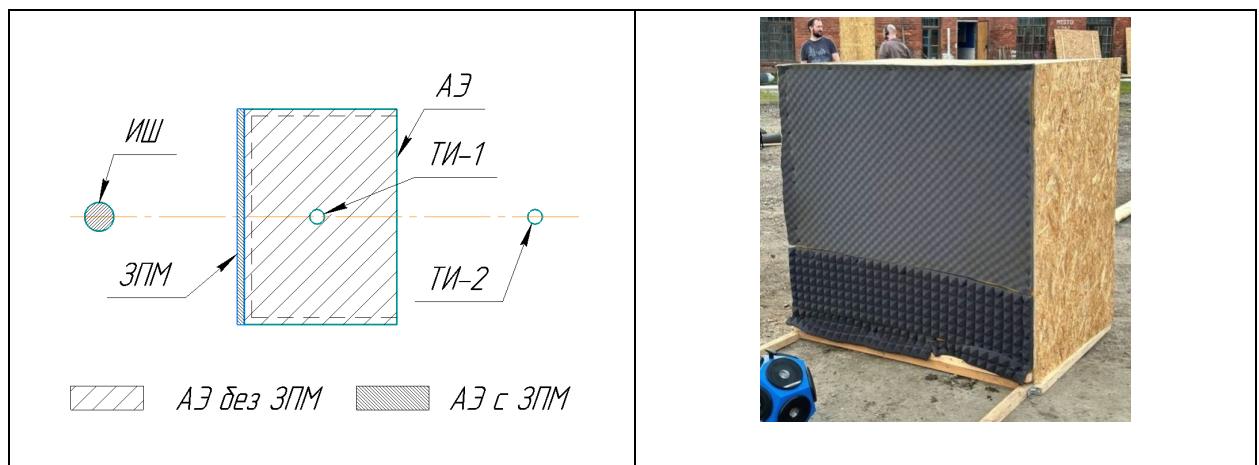


Рисунок 4.6 — Полузамкнутый АЭ с ЗПМ на лицевой стороне

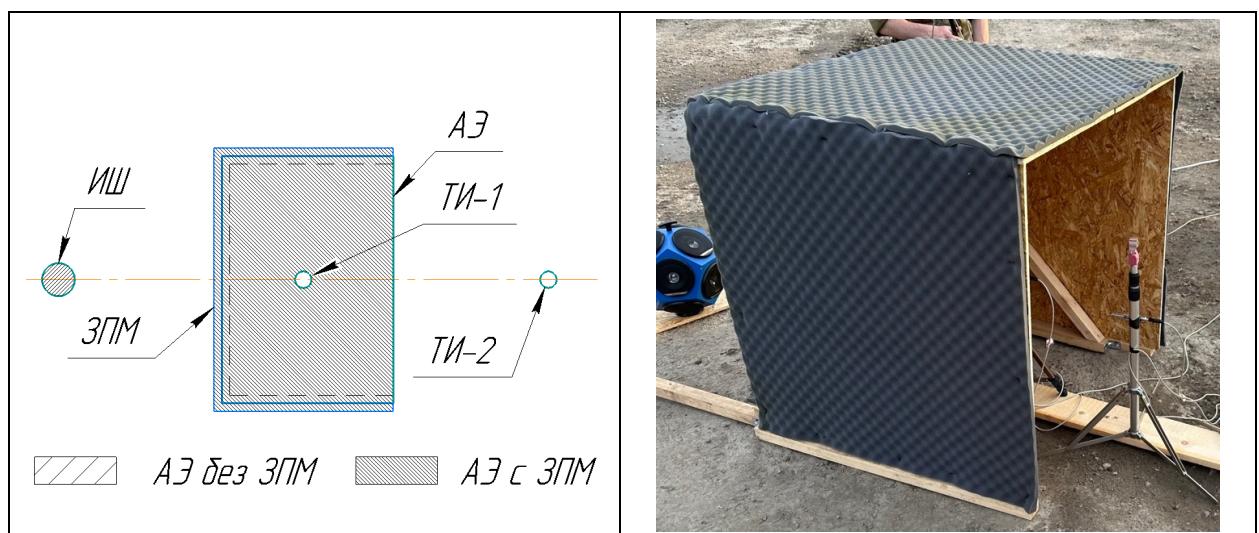


Рисунок 4.7 — Полузамкнутый АЭ с ЗПМ на внешнем контуре

Таблица 4.2 — Перечень измерений и сведения об опытных образцах АЭ

№ п/п	Размер АЭ, м	Высота ТИ, м	Форма АЭ
1	1 x 1	0,5	Плоский
			Г-образный
			П-образный
			П-образный, полузамкнутый
			П-образный, полузамкнутый с ЗПМ на внешнем контуре
2	1,5 x 1,5	0,75	Плоский
			Г-образный
			П-образный
			П-образный, полузамкнутый
			Плоский с ЗПМ (лицевая сторона)
			П-образный, полузамкнутый с ЗПМ на лицевой стороне
3	2 x 2	1,0	Плоский
			Г-образный
			П-образный
			П-образный, полузамкнутый
			Плоский с ЗПМ (лицевая сторона)
			П-образный, полузамкнутый с ЗПМ на лицевой стороне

4.2.2 Методика измерений

Испытания проводились ненаправленным искусственным источником звука постоянной звуковой мощности. Для измерений использовались прецизионные шумомеры, устанавливаемые в точках измерений. Более подробные сведения об аппаратуре и других устройствах приведены в разделе 2.1.1.

Измерения проводились в трёх измерительных точках (рисунок 4.8), в том числе в контрольной точке, количество замеров в каждой точке измерения — 3. Оценка погрешности измерений выполнялась в соответствии с [3]. В каждой измерительной точке измерялись уровни звукового давления (УЗД), дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и

8000 Гц, а также уровни звука (УЗ, дБА). Акустическая эффективность опытных экранов определялась как разность уровней звуковых давлений (УЗД) и УЗ в точке измерений без акустического экрана и с акустическим экраном [107].

Все результаты измерений обрабатывались по данным, полученным в ТИ за АЭ, данные в ТИ над АЭ использовались для контроля.

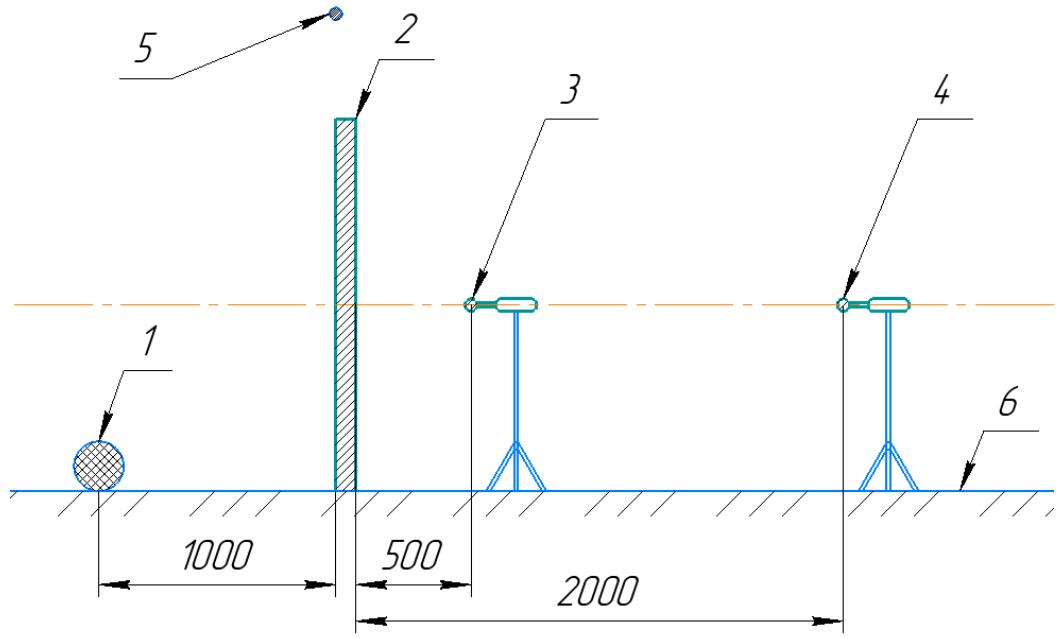


Рисунок 4.8 — Схема расположения точек измерения для определения акустической эффективности АЭ (с установленным АЭ):

- 1 — расположение ИШ, 2 — расположение АЭ, 3 — ТИ-1 (за АЭ),
4 — ТИ-2 (за АЭ), 5 — контрольная точка (над АЭ), 6 — опорная поверхность

4.3 Анализ результатов измерений АЭ в свободном звуковом поле

4.3.1 Зависимость эффективности АЭ от размеров

Были выполнены испытания трёх образцов плоских АЭ размерами: 1,0x1,0 м, 1,5x1,5 м., 2,0x2,0 м [108]. Усреднённые данные измерений приведены в таблице 4.3 и показаны на рисунках 4.9—4.10.

Так как АЭ имеет три свободных ребра, то рассмотрено увеличение (удвоение) площади опытного экрана. Отметим, что каждое удвоение площади увеличивает эффективность АЭ на 3 дБА. В частотном диапазоне разница в

основном составляет 3-4 дБ. Спектральные составляющие эффективности имеют ярко выраженный подъём в сторону высоких частот с наклоном 2-2,5 дБ на октаву.

Таблица 4.3 — Эффективность АЭ при измерениях в свободном звуковом поле в зависимости от размеров экрана (экран плоский, вертикальный)

Размеры АЭ и высота ТИ, м	Расстояние от АЭ до ТИ, м	Эффективность АЭ, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эффективность, дБА
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1x1	0,5	3	5	7,0	9,0	12,0	15,0	17,0	8,0
	2,0	2,5	4	4,0	7,0	10,0	12,0	14,0	6,0
1,5x1,5	0,5	4,5	8,0	10,0	13,0	17,0	19,0	20,0	12,0
	2,0	3,0	6,0	9,0	11,5	14,0	16,0	17,0	10,0
2x2	0,5	6,0	10,0	14,0	16,0	20,0	22,0	23,0	15,0
	2,0	5,0	8,0	11,0	14,0	17,5	20,0	21,0	13,0

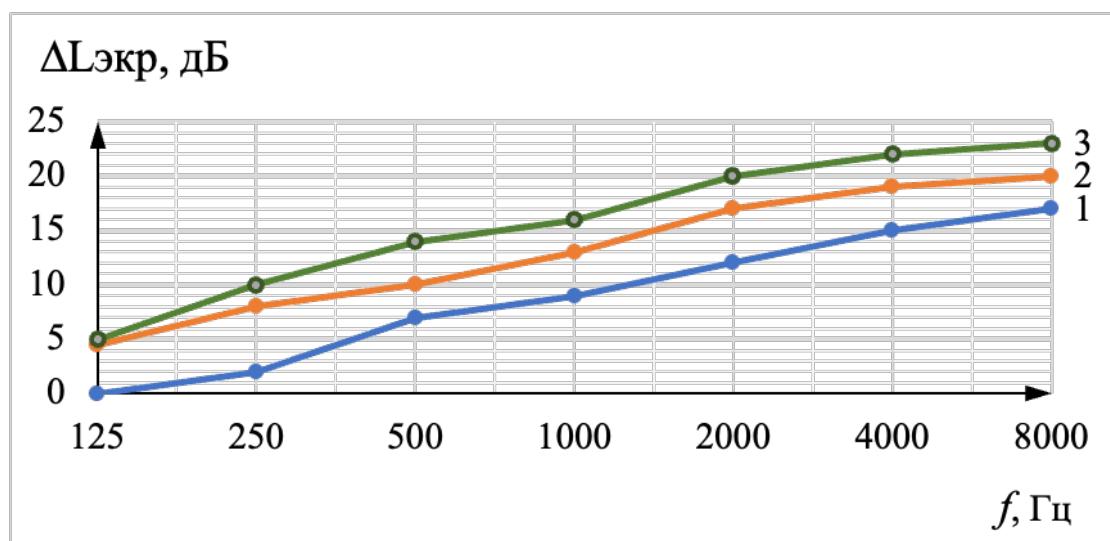


Рисунок 4.9 — Измеренные значения акустической эффективности АЭ различных размеров в ТИ-1 на расстоянии 0,5 м от АЭ:

1 — АЭ 1x1 м, 2 — АЭ 1,5x1,5 м; 3 — АЭ 2x2 м

Данные в ТИ-1 на 1-3 дБ выше, чем в ТИ-2, то есть эффективность АЭ заметно убывает при увеличении расстояния от АЭ до расчётной точки (в связи с уменьшением угла дифракции). Полученные данные могут быть использованы при проектировании АЭ.

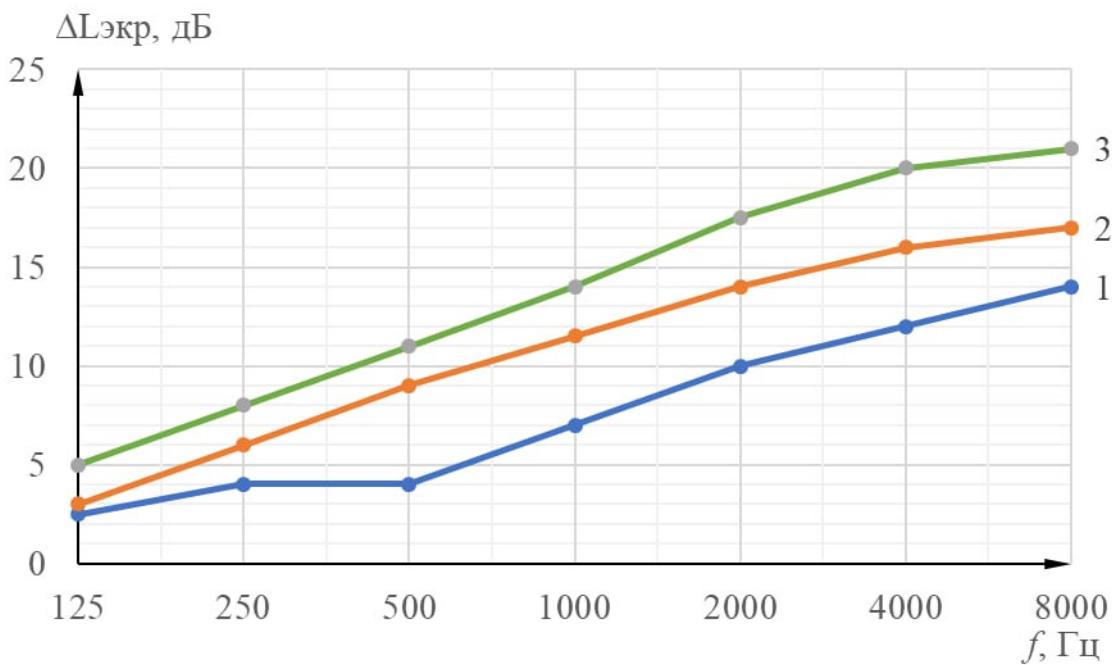


Рисунок 4.10 — Зависимость акустической эффективности АЭ разных размеров в свободном звуковом поле на расстоянии от АЭ до ТИ-2 — 2,0 м:

1 — АЭ 1x1 м; 2 — АЭ 1,5x1,5 м; 3 — АЭ 2x2 м

4.3.2 Зависимость эффективности акустического экрана от формы

Были выполнены испытания различных АЭ: плоского, Г-образного, П-образного и полузамкнутого типа, то есть П-образного с полкой на верхнем свободном ребре АЭ. Испытания проводились на АЭ трёх типоразмеров, но, так как полученные данные идентичны, приводятся результаты испытаний для АЭ размером 1x1 м. Данные испытаний приведены в таблице 4.4 и показаны на рисунке 4.11.

Изменение формы акустического экрана заметно сказывается на его эффективности. Г-образный акустический экран эффективнее плоского на 1–2 дБ (2 дБА), П-образный акустический экран заметно эффективнее плоского, в рассматриваемом частотном диапазоне на 3–4 дБ (3 дБА). Максимальное насыщение экрана надстройками на свободных рёбрах дополнительно увеличивает его эффективность на 5–7 дБ (6 дБА), то есть если плоский акустический экран обеспечивает снижение УЗД на 2–17 дБ (6 дБА), то полузамкнутый на 6–22 дБ (14 дБА), разница 8 дБА.

В табл. 4.5 приведена положительная поправка в формулу (3.16), показывающая увеличение эффективности АЭ при усложнении его формы.

Таблица 4.4 — Эффективность АЭ в свободном звуковом поле в зависимости от формы экрана

Форма АЭ	Расстояние от АЭ до ТИ, м	Эффективность АЭ, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эффективность, дБА
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Плоский	0,5	1,0	2,0	7,0	9,0	12,0	15,0	17,0	8,0
	2,0	0,0	1,0	5,0	7,0	10,0	12,0	14,0	6,0
Г-образный	0,5	2,0	4,0	9,0	11,0	14,0	17,0	19,0	9,0
	2,0	1,0	2,0	6,0	8,0	11,0	14,0	17,0	7,0
П-образный	0,5	3,0	6,0	11,0	13,0	16,0	19,0	21,0	11,0
	2,0	1,0	3,0	8,0	10,0	12,0	15,0	17,0	8,0
Полузамкнутый	0,5	5,0	8,0	13,0	15,0	18,0	21,0	22,0	14,0
	2,0	3,0	5,0	10,0	13,0	14,0	17,0	18,0	11,0

Таблица 4.5 — Поправка в формулу (3.16) при изменении формы АЭ ($\Delta L_{\text{экр}}^f$)

Форма АЭ	Поправка, дБ, показывающая изменение эффективности АЭ при изменении формы, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Г-образный	1	2	2	2	2	2	2
П-образный*	2	4	4	4	4	4	4
Полузамкнутый**	4	6	6	6	6	6	6

*положительная поправка используется, если расчетная точка лежит в пределах полузамкнутого объема, сформированного боковыми отгонами П-образного АЭ;

**положительная поправка используется, если расчетная точка лежит в пределах полузамкнутого объема, сформированного полузамкнутым АЭ.

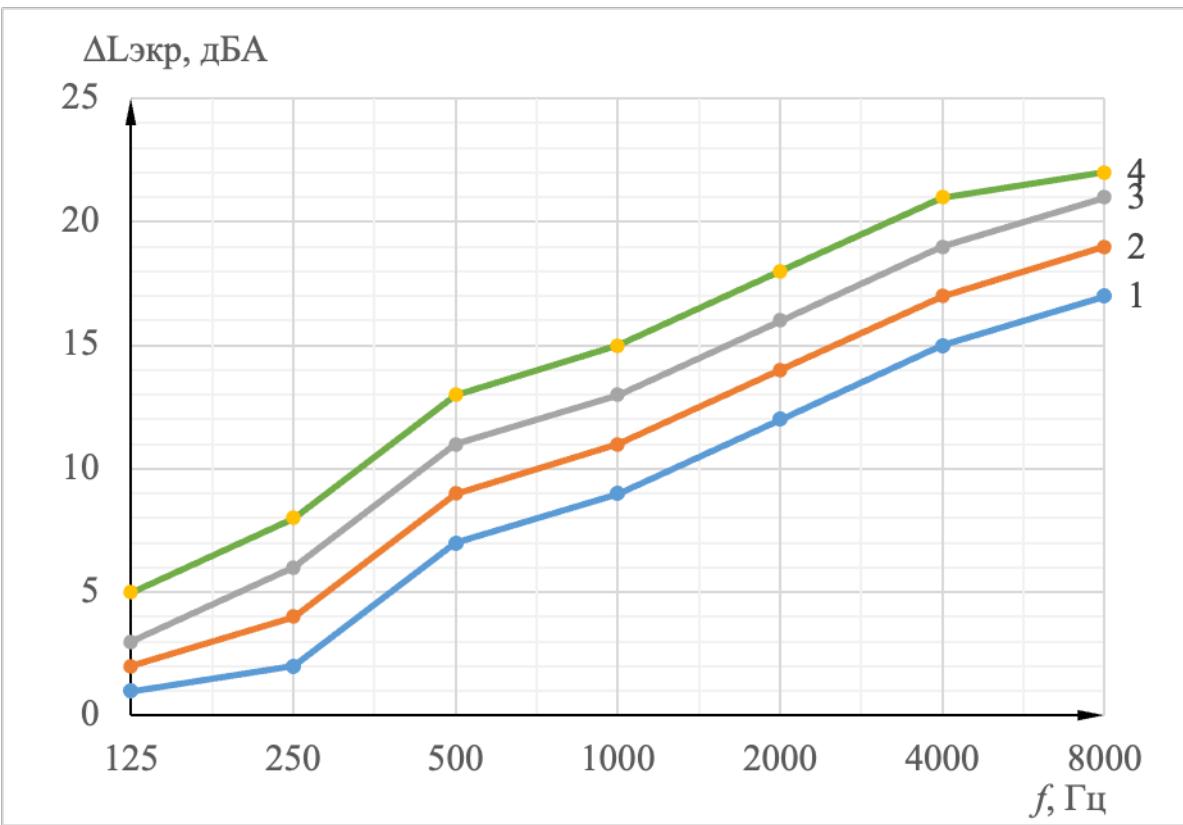


Рисунок 4.11 — Сравнительная эффективность АЭ размером 1x1 м в зоне акустической тени при различной форме АЭ: 1 — плоский АЭ; 2 — Г-образный АЭ; 3 — П-образный АЭ; 4 — полузамкнутый АЭ

4.3.3 Влияние звукопоглощения на эффективность акустического экрана

Испытывались акустические экраны со звукопоглощающим материалом, нанесённым со стороны искусственного источника звука по всей площади опытного акустического экрана, для всех типоразмеров. Результаты усреднённых измерений в виде разницы между УЗД для плоского акустического экрана размером 2x2 м приведены в таблице 4.6.

Расчёты увеличения эффективности акустического экрана за счёт нанесения ЗПМ выполняется по формуле [108]:

$$\Delta L_{\text{ЗПМ}}^{\text{экр}} = 10 \lg(1 - \alpha_{\text{экр}}), \text{дБ} \quad (4.1)$$

где $\alpha_{\text{экр}}$ — значения коэффициента звукопоглощения должны быть взяты из паспорта АЭ (или получено экспериментально).

Таблица 4.6 — Усреднённые значения (по всем акустическим экранам и по всем измерительным точкам) эффективности звукопоглощения

Способ получения данных	Эффективность ЗПМ, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Эксперимент, дБ	1,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
$\alpha_{экр}$ — пересчет экспериментальных данных по формуле (4.1)	0,2	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\alpha_{экр}$ — измеренный в реверберационной камере	0,5	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
Расчёт по формуле (4.1), дБ	3,0	5,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0

Отметим, что экспериментально установлено: эффективность экрана увеличивается на 1–3 дБ в рассматриваемом частотном диапазоне за счёт нанесения на поверхность акустического крана звукопоглощающего материала (ЗПМ). Это неплохой результат, но полученные данные на 2–4 дБ (то есть фактически вдвое) ниже полученных экспериментом в акустической камере (паспортные данные). Разница объясняется тем, что коэффициент звукопоглощения для получения паспортных данных определялся при испытаниях панели акустического экрана в реверберационной камере, то есть почти в идеальном диффузном звуковом поле. На практике имеет место направленное падение звука на акустические экраны, при этом значение коэффициента звукопоглощения акустического экрана почти в два раза ниже реверберационных

значений. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании акустических экранов, установленных в помещениях.

4.4 Экспериментальные исследования АЭ в помещении

При выполнении экспериментальных исследований была поставлена задача изучить, как влияет изменение акустических свойств помещения на изменение эффективности АЭ. С этой целью путём поэтапного внесения ЗПМ в опытное помещение его акустические свойства поэтапно изменялись. Здесь за оценочный показатель (критерий) было принято вычисленное (по результатам измерений в помещении времени реверберации) значение среднего коэффициента звукопоглощения на частоте 1000 Гц ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$). Всего выполнено 4 этапа измерений (на плоских АЭ):

$$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2;$$

$$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3;$$

$$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4;$$

$$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5.$$

Заметим, что значение 0,2 было выбрано в соответствии с результатами исследований акустических свойств производственных помещений (см. главу 2), а значение 0,5 было выбранное из понимания того обстоятельства, что после обработки производственных помещений ЗПМ, с целью снижения интенсивности отраженного звука, это значение является максимально достижимым на практике. Экспериментальные исследования состояли из двух частей: в начале определялось, как поэтапное изменение $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ влияет на относительную эффективность АЭ, а затем рассматривалась их акустическая эффективность при разных значениях $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$.

Исходные результаты измерений УЗД и УЗ в измерительных точках за экранами трёх типоразмеров при поэтапном изменении акустических свойств помещения приведены в приложении Б, а обработанные результаты

сравнительного увеличения акустической эффективности АЭ при поэтапном увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ приведены в таблице 4.7.

Относительное увеличение эффективности АЭ размером 2x2 м при поэтапном увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ приведено на рисунке 4.12.

Анализ данных в таблице 4.6 и на рисунке 4.12 показывает, что увеличение $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$, т.е. улучшение акустических свойств помещения за счёт снижения отраженного звука, заметно сказывается на эффективности АЭ. Так, для АЭ размером 2x2 м увеличение $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ от 0,2 до 0,5 увеличивает эффективность АЭ на 8-10 дБ в диапазоне частот 125-8000 Гц (до 10 дБА). Ориентировочная увеличение по этапам составило: $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$ -2 дБА, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$ -4 дБА, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$ -8 дБА, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ -10 дБА. Заметим, что для каждого из других рассмотренных типоразмеров АЭ полученные значения эффективности на 1-2 дБ ниже, чем для АЭ размером 2x2 м.

За относительную эффективность, равную 0, принята для АЭ размером 1x1 м при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$. Таким образом, разница для АЭ размером 2x2 м $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$ составила 1-2 дБ в рассматриваемом частотном диапазоне. Далее все рассуждения ведутся для АЭ 2x2 м (рис. 4.12).

Таблица 4.7 — Результаты сравнительного увеличения акустической эффективности АЭ при увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$

Размеры АЭ, м	Значения $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$	№ ТИ	Разница измеренных УЗД, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Разница УЗ, дБА
			125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11
1x1	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	1	0	0	0	0	0	0	0		0
		2	0	0	0	0	0	0	0		0
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$	1	1,0	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,0		2,5
		2	0,8	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5		2,0

Продолжение таблицы 4.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,5x1,5	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$	1	3,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	6,0	5,0
		2	3,0	4,5	4,5	5,0	6,0	5,0	5,0	4,5
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$	1	4,0	6,0	6,0	7,0	8,0	7,5	7,5	7,0
		2	3,5	5,5	5,0	6,0	6,5	6,5	6,5	6,0
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	1	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		2	0,5	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$	1	2,0	2,5	3,0	3,0	3,5	3,5	3,0	3,5
		2	2,0	2,0	2,0	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0
2x2	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$	1	3,0	6,0	7,0	7,0	6,5	6,5	6,5	6,0
		2	3,0	5,0	0,5	6,0	6,0	6,0	6,5	5,5
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$	1	6,4	7,0	8,5	8,5	8,5	8,0	7,0	8,0
		2	5,4	6,5	8,0	8,0	8,0	7,0	6,5	7,0
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	1	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
		2	0,5	1,0	1,0	1,5	1,5	2,5	2,0	1,5
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$	1	2,5	3,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	4,0
		2	1,5	2,5	3,0	3,0	3,0	3,5	3,0	3,5
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$	1	4,0	5,0	6,5	8,0	8,0	8,0	7,5	8,0
		2	3,0	4,0	6,0	7,0	7,5	7,5	7,0	7,0
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$	1	5,5	8,0	9,5	10	9,5	9,5	8,0	10
		2	4,5	8,5	8,5	8,5	9,0	9,0	7,5	9,0

При небольшом увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$ дополнительная эффективность АЭ составила 2,5-4 дБ (4 дБА), при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$ соответственно 4-7 дБ (7 дБА) и, наконец, при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ соответственно 6,5-9 дБ (9 дБА). Таким образом, улучшение акустических свойств помещения путем увеличения среднего коэффициента звукопоглощения от $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$ до $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ увеличивает эффективность АЭ в помещении минимум на 7 дБА.

Рассмотрим абсолютные значения акустической эффективности АЭ при изменении акустических свойств помещения. В таблице 4.8 приведены результаты исследований АЭ в помещении с различными значениями $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$, а на рисунке 4.15 показаны результаты испытаний АЭ размером 2x2 м. Результаты этих экспериментов подтверждают чрезвычайно высокое влияние изменения

акустических свойств помещений на акустическую эффективность АЭ. Так для АЭ 2x2 м акустическая эффективность составила в частотном диапазоне 125–8000 Гц, дБ и в дБА: 1,5–6 дБ (5 дБА) при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}=0,2$; 2,5–11 (7,5 дБА) при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}=0,3$; 3,5–16 (10 дБА) при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}=0,4$; 4,5–20 (12,5 дБА) при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}=0,5$.

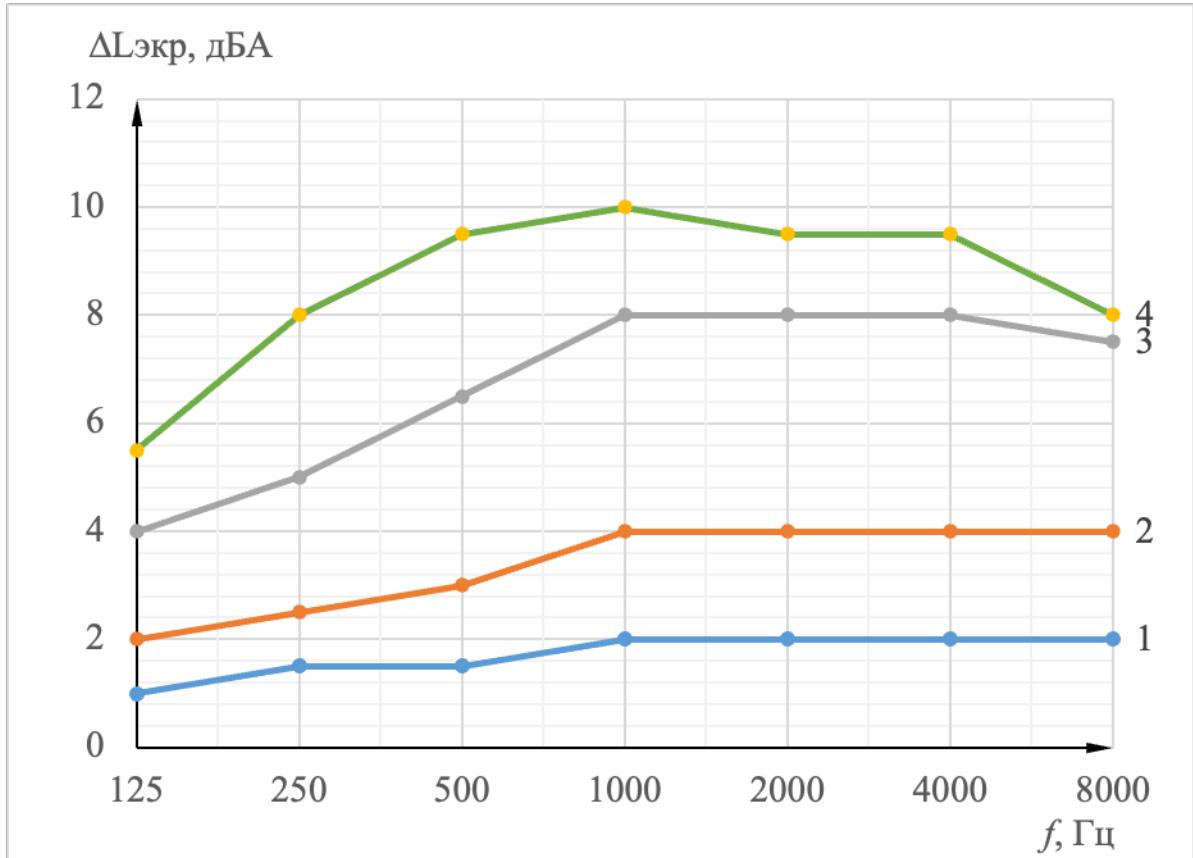


Рисунок 4.12 — Увеличение акустической эффективности АЭ размером 2x2 м в зоне акустической тени АЭ при увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$:

$$1 - \bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2; 2 - \bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3; 3 - \bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4; 5 - \bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$$

В таблице 4.8 приведены абсолютные значения эффективности АЭ при изменении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$, а на рис. 4.13 даны такие же данные в сравнении с полученными данными эффективности АЭ в свободном звуковом поле (Таблица 4.3).

Таблица 4.8 — Акустическая эффективность АЭ в помещении при изменении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ и размеров АЭ

Разме- ры АЭ, м	Значе- ние $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$	№ ТИ	Акустическая эффективность АЭ, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Эфек- тивность, дБА
			125	250	50 0	100 0	200 0	400 0	8000	
1×1	0,2	1	0,5	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0	1,5	2,5
		2	0,5	0,5	1,0	1,0	2,0	1,5	1,0	2,0
	0,3	1	1,0	2,0	3,0	3,0	3,0	2,5	2,0	3,0
		2	1,0	2,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,5
	0,4	1	2,0	3,5	4,5	5,0	7,0	9,0	12,0	5,0
		2	1,5	3,0	4,0	4,0	6,0	8,0	11,0	4,0
	0,5	1	2,5	4,5	6,0	7,0	10,0	12,5	14,0	7,0
		2	2,0	4,0	5,0	6,0	6,0	11,0	13,0	6,0
1,5×1,5	0,2	1	1,5	2,5	3,0	4,0	5,5	6,0	7,0	3,0
		2	1,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,0	6,0	2,0
	0,3	1	2,0	3,0	3,5	5,0	6,5	10,0	10,0	5,0
		2	1,5	2,0	2,5	4,0	5,5	8,0	9,0	4,0
	0,4	1	3,0	5,0	7,0	9,0	11,0	12,0	15,0	7,0
		2	2,5	4,5	6,0	8,0	10,0	11,0	12,0	6,0
	0,5	1	4,0	7,0	9,0	11,5	14,5	17,0	18,0	10,0
		2	4,5	6,0	8,0	10,5	13,0	16,0	17,0	9,0
2×2	0,2	1	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	5,0	5,0
		2	1	1,5	2,0	2,0	3,0	5,0	5,5	4,0
	0,3	1	2,5	4,0	5,0	6,5	8,0	10,5	11,0	7,5
		2	2,0	3,0	5,0	6,0	7,0	9,0	10,0	7,0
	0,4	1	3,5	5,5	8,5	10,0	13,0	15,0	16,0	10,0
		2	2,5	6,0	8,0	9,0	12,0	15,0	18,0	9,0

Продолжение таблицы 4.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,5	1	4,5	8,0	11,0	13,0	17,5	19,0	20,0	12,5	
	2	4,0	7,0	10,0	12,0	17,0	18,0	19,0	11,0	

Нетрудно убедиться, что даже при $\bar{\alpha}_{\text{пом}} = 0,5$ акустическая эффективность АЭ в помещении остается (в диапазоне частот 250–8000 Гц) практически на 3-4 дБ ниже, чем эффективность АЭ в свободном звуковом поле. Ещё раз обратим внимание, что при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$ акустическая характеристика соответствует условиям производственных помещений и эффективность АЭ составляет 1,5-5 дБ (5 дБА), что очень невелико. При $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$ эффективность АЭ 2,5-11 дБ (7,5 дБА), при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$ эффективность АЭ 3,5-16 дБ (10 дБА), а при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ эффективность АЭ 4,5-20 дБ (12,5 дБА), то есть при увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ на каждые 0,1 эффективность АЭ возрастает на 2,5 дБА.

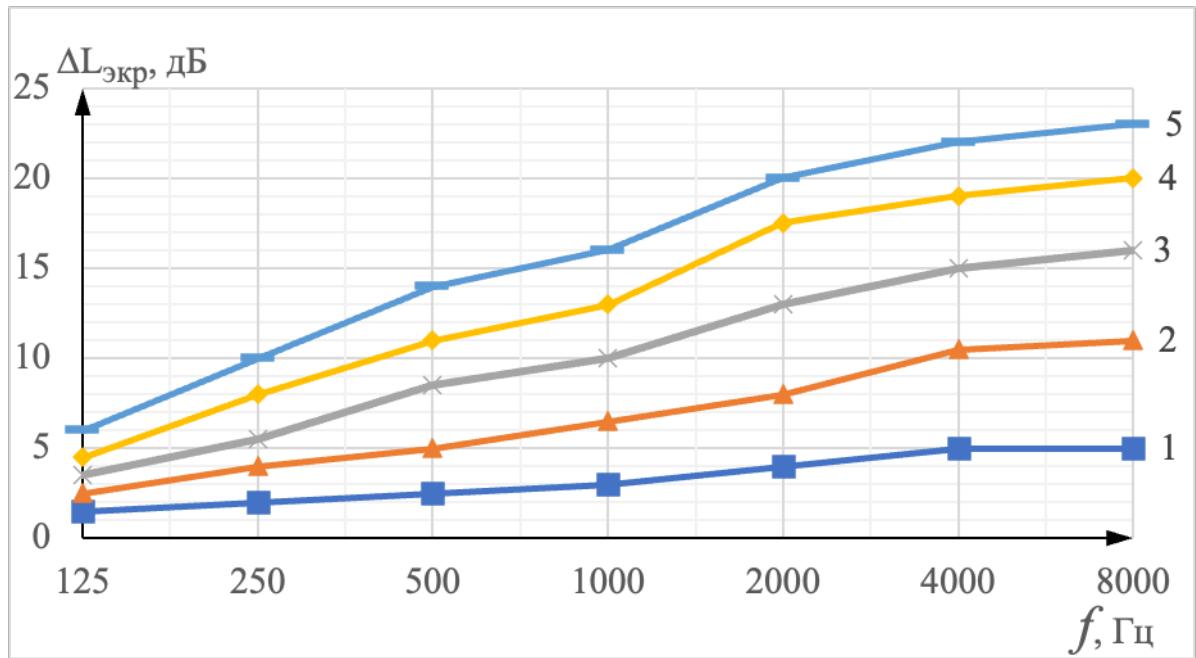


Рисунок 4.13 — Акустическая эффективность АЭ 2x2 м в опытном помещении с различными акустическими свойствами (1-4) и в свободном звуковом поле (5):

1 — $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$; 2 — $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$; 3 — $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$; 4 — $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$;

5 — свободное звуковое поле

4.5 Значения экспериментальных поправок в расчёты АЭ в помещениях

На основании результатов экспериментов получены значения экспериментальных поправок в формулу (3.16) расчёта акустической эффективности АЭ для помещений с различной степенью акустической обработки ЗПМ (таблица 4.9). Эти обобщенные значения получены для расчётных точек (точка 1), в области прямого звука. При этом обращено внимание на результаты экспериментов: для АЭ, установленных в помещении, разница между результатами, полученными в точках 1 и 2, всегда меньше, чем в результатах, полученных в свободном звуковом поле (влияние отраженного звука). Поэтому с точностью до $\pm 0,5$ дБ можно для точек 2 принять для всех значений в таблице 4.9 поправку равную - 1 дБ (дБА). Ещё раз обратим внимание, что точка 2 находится в границах радиуса реверберации.

Таблица 4.9 — Значение усредненных экспериментальных поправок в расчёты акустической эффективности АЭ в помещениях (формула (3.14))

Размеры АЭ, м	Акустические свойства помещения $\overline{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$	Поправка, дБ, в значения акустической эффективности АЭ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Поправка, дБА
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1x1	0,2	2,5	4,0	5,5	7,5	10,0	13,0	13,5	6,0
	0,3	1,0	3,0	5,0	6,0	9,0	9,5	11,0	5,0
	0,4	1,0	1,5	2,5	4,0	5,0	6,0	5,0	3,0
	0,5	0,5	1,0	1,0	2,0	2,0	2,5	3,0	2,5
1,5x1,5	0,2	3,0	5,5	7,0	9,0	11,5	13,0	13,0	9,0
	0,3	2,5	5,0	6,5	8,0	10,5	10	10	7,0
	0,4	1,5	3,0	3,0	4,0	5,0	7,0	7,0	5,0
	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	2,5	2,0	2,0	2,0

Продолжение таблицы 4.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2x2	0,2	3,0	6,0	9,0	11,0	16,0	16,0	17,0	10,0
	0,3	3,0	5,0	6,0	6,0	12,0	12,0	12,0	7,5
	0,4	2,5	3,5	3,5	3,5	7,0	7,0	7,0	5,0
	0,5	1,5	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	2,5

Таким образом, поправки в расчёты АЭ могут составить, например, для АЭ размерами 2х2 м:

при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$ от 3,0 до 16 дБ в рассматриваемом частотном диапазоне (10 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$ от 3,0 до 12 дБ (7,5 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$ от 2,5 до 7 дБ (5дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ от 1,5 до 3 дБ (2,5 дБА).

Таким образом, в расчётах АЭ обязательно должны учитываться акустические свойства помещений, при этом АЭ, устанавливаемые в акустически необработанных помещениях, имеют эффективность в несколько раз меньшую, чем АЭ, расположенные в свободном звуковом поле.

4.6 Рекомендации по проектированию и установке АЭ в производственных помещениях

На основании выполненных исследований АЭ в свободном звуковом поле и в помещении с различными акустическими свойствами разработаны следующие рекомендации.

1. Акустическая обработка производственных помещений.

Устанавливать АЭ, предназначенные для снижения шума на рабочих местах и в рабочих зонах, в помещениях, предварительно подвергшихся акустической обработке путем внесения в помещение звукопоглощающих материалов.

Критерием для оценки акустических качеств помещения является $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$. Учитывая, что акустически необработанные производственные помещения в основном характеризуются $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$, рекомендуется доводить средний коэффициент

звукопоглощения помещений до $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$. В акустически необработанных производственных помещениях ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$) акустическая эффективность АЭ (например, размерами 2x2 м) в зоне прямого звука (защищаемый объект находится условно в геометрическом центре АЭ на расстоянии (R) от последнего $R \leq 0,5$ м) может составлять всего 1,5-5 дБ в частотном диапазоне 125-8000 Гц (5 дБА). При увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ до 0,4 акустическая эффективность АЭ возрастает до 3,5-16 дБ (10 дБА), т.е. практически вдвое. Тем не менее, акустическая эффективность АЭ в помещении всегда ниже, чем та же в свободном звуковом поле. Даже, если $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ (практически максимально достижимая величина в производственном цеху), аналогичный рассматриваемому АЭ имеет значение акустической эффективности на 2-4 дБ (3 дБА) ниже.

2. Расположение АЭ в помещении. Так как в любой точке помещения имеются составляющие как прямого звука ИШ, так и отраженного от поверхностей помещения, важной характеристикой является граничный радиус или радиус реверберации — условная граница, где вклад прямого и отраженного звука приблизительно одинаков. Экран работает в зоне прямого звука, поэтому необходимо стремиться располагать АЭ, а также локацию объекта защиты от шума на расстояниях от ИШ, которые меньше величины граничного радиуса. В случае расположения объекта защиты в области граничного радиуса эффективность АЭ снижается не менее чем на 2-4 дБА.

3. Проектирование АЭ. Эффективность АЭ возрастает с увеличением размеров АЭ. Возрастание площади АЭ вдвое не менее чем на 3-4 дБА увеличивает его акустическую эффективность. Обычно АЭ, установленный на опорной поверхности, имеет 3 свободных ребра. Усложнение формы АЭ путем применения, например, надстройки на свободном ребре, также увеличивает эффективность АЭ на 2 дБА. Эффективность Г-образного АЭ на 1 дБА выше плоского, эффективность П-образного – выше на 3 дБА, а эффективность полузамкнутого – выше на 6 дБА. Применение звукопоглощения в конструкции АЭ (ЗПМ расположен по всей плоскости АЭ) увеличивает его акустическую эффективность до 2 дБА,

4.8 Апробация предложенных решений на практике

С целью проверки разработанных рекомендаций для снижения шума в цехе металлообработки на рабочем месте слесаря механосборочных работ были выполнены следующие мероприятия по шумозащите:

- установка опытного акустического экрана в рабочей зоне слесаря механосборочных работ (Рисунок 4.14) таким образом, чтобы АЭ находился в зоне прямого и отраженного звука от превалирующего источника шума (компрессор), т.е. на расстоянии $R < 2r_{rp}$;
- установка по всей площади потолка цеха штучных (функциональных) звукопоглотителей (Рисунок 4.15).

Общий вид АЭ показан на рисунке 4.14. П-образный АЭ размером 2,5x4 м изготовлен из металлических панелей со звукопоглощением, установлен на полу цеха.

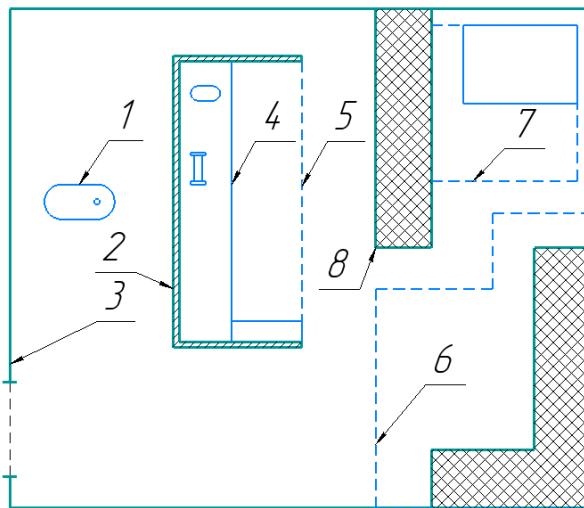


Рисунок 4.14 — Схема цеха металлообработки с установленным АЭ и фото рабочего места слесаря механосборочных работ:

1- ИШ (компрессор), 2 – АЭ, 3 – цех металлообработки, 4 – защищаемое рабочее место, 5 – рабочая зона слесаря механосборочных работ, 6 – складская зона, 7 – зона оператора контрольно-измерительного прибора, 8 – рабочие шкафы

Измерения шума проводились на рабочем месте слесаря механосборочных работ, как до установки, так и после установки АЭ при в следующих условиях в

цеху: сначала цех не имел акустической обработки ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ составило 0,2), после акустической обработки цеха значение $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ составило 0,4.



Рисунок 4.15 — Вид штучного (функционального) звукопоглотителя

Для увеличения звукопоглощения были выбраны штучные (функциональные) звукопоглотители, выбор был обусловлен удобством их размещения. Количество штучных звукопоглотителей, необходимого для достижения акустических характеристик помещения цеха по выбранному критерию $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}=0,4$; определено расчетом. Данные измерений времени реверберации в цехе, а также вычисленные значения среднего коэффициента звукопоглощения помещения приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 — Данные измерений и расчетов в цехе металлообработки до и после акустической обработки

Этапы акустической обработки	Параметр	Измеренные (T, с) и вычисленные ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}$, $T_{\text{гр}}$, м) параметры в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
До	T, с	1,34	1,12	1,07	1,02	0,99	0,92	0,8
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,13	0,15	0,15	0,16	0,16	0,18	0,2
После	T, с	0,55	0,53	0,4	0,3	0,28	0,28	0,21
	$\bar{\alpha}_{\text{пом}}$	0,14	0,25	0,33	0,43	0,47	0,58	0,6

Необходимо выполнить акустическую обработку помещения, чтобы его акустические свойства соответствовали выбранному критерию $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}=0,4$. Выбор числа функциональных звукопоглотителей определен, используя паспортные данные коэффициента звукопоглощения звукопоглотителя на частоте 1000 Гц равные 0,8. Число поглотителей размером 1,6x0,6 м, необходимых для выполнения поставленных условий, составило 80 шт. Проверка правильности полученных значений приведена в табл. 4.10, где представлено вычисленное значение критерия $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}=0,43$, что соответствует выбранному критерию $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}=0,4$.

Вычисленное значение граничного радиуса ($r_{\text{гр}}$) для помещения цеха составило $r_{\text{гр}}=1,8$ м, рабочее место находится в зоне прямого и отраженного звука.

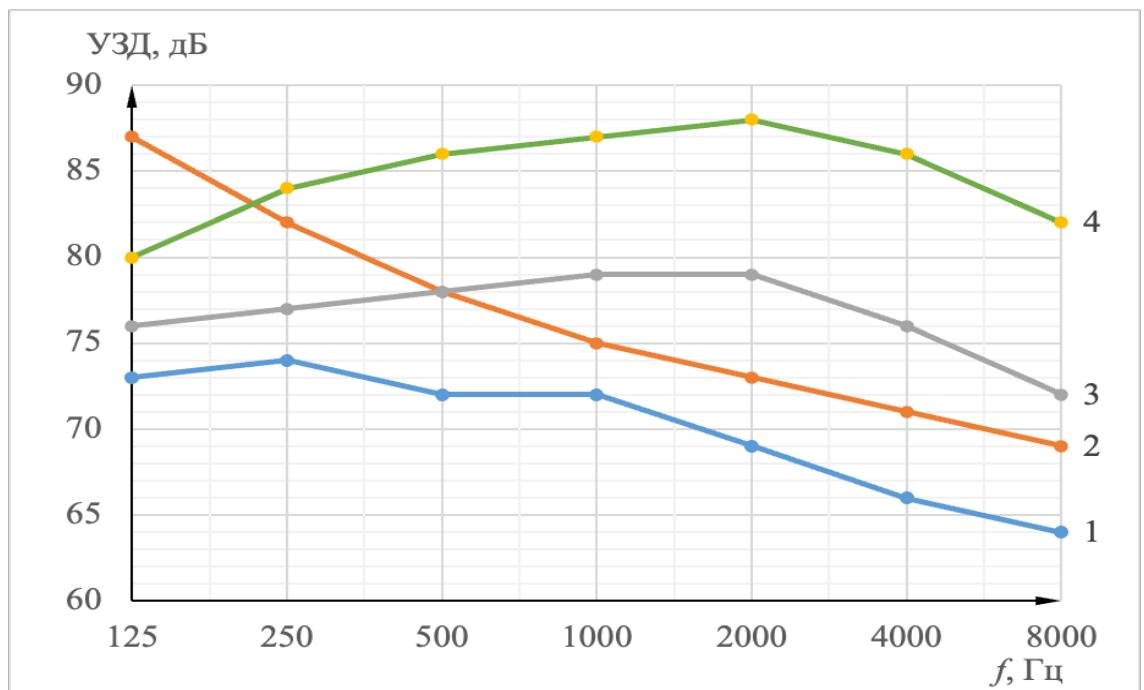


Рисунок 4.16 — Спектры шума на рабочем месте слесаря механосборочных работ до установки АЭ (4) и после (1,3):

1 — спектр шума на рабочем месте, АЭ установлен, выполнена акустическая обработка цеха ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}=0,4$), 2 — норма шума [2], 3 — установлен АЭ, акустическая обработка не выполнена ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}=0,2$), 4 — спектр шума на рабочем месте без АЭ

Значения полученных уровней звукового давления в сравнении с действующими нормами [1] приведены в таблице 4.11 и показаны на рисунке 4.16, а в таблице 4.12 даны значения превышения норм для различных условий.

Таблица 4.11 — Измеренные спектры шума на рабочем месте слесаря механосборочных работ в сравнении с нормами без АЭ и с АЭ

№	Применяемые средства защиты от шума	УЗД, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	Средства защиты от шума отсутствуют	74	80	84	86	87	88	86	82	95
2	Установлен АЭ, акустическая обработка отсутствует ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$)	-	76	77	78	79	79	76	72	85
3	Установлен АЭ, выполнена акустическая обработка ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$)	-	73	74	72	72	69	66	64	76
4	Нормы шума	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Таким образом, отметим, что превышения УЗД над нормами, при отсутствии шумозащиты, составило 2-15 дБ в диапазоне частот 250-8000 Гц (15 дБА), т.е. в 3 раза по субъективному ощущению громкости. При установке АЭ в акустически необработанном помещении ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$) шум на рабочем месте снизился на 2-10 дБ в диапазоне частот 125-8000 Гц и на 10 (дБА), но продолжал превышать норму на 4-6 дБ (5 дБА) в частотном диапазоне 1000-8000 Гц.

Таблица 4.12 — Значения превышения норм при различных вариантах установки шумозащиты

№	Применяемые средства защиты от шума	Превышения норм, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Превышение, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	Средства защиты от шума отсутствуют	-	-	2	8	12	15	15	3	15
2	Установлен АЭ, акустическая обработка отсутствует ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$)	-	-	-	0	4	4	5	6	5
3	Установлен АЭ, выполнена акустическая обработка помещений $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = (0,4)$	-	-	-	-	-	-	-	-	-

После проведения акустической обработки помещения ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$) при том же АЭ дополнительное снижение УЗД составила 7-20 дБ (19 дБА). Таким образом, АЭ в акустически обработанном помещении снизил УЗД на 7-20 дБ, а УЗ на 19 дБА. Шум на рабочем месте слесаря механосборочных работ в производственном помещении снижен до нормы.

Выводы по главе

1. Для проведения испытаний был создан опытный стенд, состоящий из набора АЭ различных по площади, форме, звукопоглощению, в совокупности с искусственным ненаправленным источником звука постоянной звуковой мощности и аппаратурой для измерений значений УЗД, УЗ и времени реверберации в

помещениях. Испытания проводились в свободном звуковом поле и в опытном помещении с различными задаваемыми акустическими характеристиками.

2. На основании действующей НТД была разработана методика испытаний АЭ в свободном звуковом поле и в помещении, содержащая расположение измерительных точек и АЭ. Точка измерений 1 расположена на расстоянии 0,5 м (в зоне глубокой акустической тени АЭ) в середине АЭ, размещение АЭ в зоне действия прямого и отраженного звука, точка 2 на расстоянии 2м от АЭ в области отраженного звука. Испытывались АЭ трех типоразмеров (1x1 м; 1,5x1,5 м; 2x2 м), плоских, Г-образных, П-образных и полузамкнутых с нанесенным по площади АЭ ЗПМ и без ЗПМ. Все измерения в точках 1 и 2 проводились как с установленным АЭ, так и без него. Испытания проводились в свободном звуковом поле и в опытном помещении. Акустические свойства опытного помещения определялись расчётом на основании результатов измерений времени реверберации при различной эквивалентной площади и площади звукопоглощения, материал для акустической обработки помещений — минеральная вата. В качестве критерия звукопоглощающих свойств опытного помещения использовался средней коэффициент звукопоглощения в помещении на частоте 1000 Гц ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$). Этапы акустической обработки испытательного помещения (изменение $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$) проводились следующим образом - этап 1: средний коэффициент звукопоглощения равен 0,2; этап 2: средний коэффициент звукопоглощения равен 0,3; этап 3: средний коэффициент звукопоглощения равен 0,4; и этап 4: средний коэффициент звукопоглощения помещения доведен до 0,5.

3. Результаты испытаний АЭ в области прямого звука показали следующее. Для АЭ различных размеров в точке 1 (в зоне глубокой акустической тени АЭ) получено: для АЭ 1x1м эффективность 3-17 дБ, в диапазоне частот — 125-8000 Гц (8 дБА); 1,5x1,5м эффективность 4,5-20 дБ (12 дБА); 2x2 эффективность 6-23 дБ (15 дБА); отмечена закономерность — при каждом удвоении площади АЭ эффективность возрастает на 3 дБА. Значение эффективности АЭ в точке 2 на 2 дБ (дБА) ниже из-за уменьшения угла дифракции. Следующий по значимости фактор, влияющий на эффективность АЭ, — его форма.

Эффективность Г-образных АЭ на 1-2 дБ (1дБА) выше, чем плоских П-образных, выше на 2-4 дБ (3 дБА), а полузамкнутых выше на 5-7 дБ (6дБА). И, наконец, при нанесении на плоскость АЭ звукопоглощающих материалов (ЗПМ) его эффективность возрастает на 1-3 дБ (в среднем, на 2 дБА).

4. При расположении АЭ в помещении, его акустическую эффективность, в первую очередь, зависят от акустических свойств помещения, определяемых выбранным критерием значения среднего коэффициента звукопоглощения ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$). Были выполнены исследования эффективности АЭ при поэтапном изменении последних в пределах от 0,2 до 0,5 для трех типоразмеров АЭ. Так для АЭ с размером 2x2 м при увеличении от 0,2 до 0,3 эффективность АЭ увеличивается на 1,5-2,5 дБ (2дБА), при увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ до 0,4 на 3,5-5,5 дБ (5дБА); при увеличении до 0,5 на 5-8 дБ (9 дБА). Абсолютные значения акустической эффективности АЭ 2x2 м при различных $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ составили: при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$ эффективность 1,5-6 дБ (5 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$ эффективность 2,5-11 дБ (7,5 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$ эффективность 3,5-16 дБ (10 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ эффективность 4,5-20 дБ (12 дБА). Таким образом при каждом увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ на 0,1 эффективность АЭ возрастила на 2-2,5 дБА. На основании выполненных экспериментов для всех типоразмеров АЭ получены значения поправок в формулу расчёта эффективности АЭ в зависимости от $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$.

5. Разработаны рекомендации по проектированию и установке АЭ в производственных помещениях, включающие: обязательную акустическую обработку помещений, где располагаются АЭ, связь местоположения АЭ с величиной граничного радиуса (радиуса реверберации), а также применение в конструкции АЭ элементов, увеличивающих его эффективность (размеры, форма, ЗМП).

6. Выполнена апробация предложенных решений: в производственном помещении (в цехе металлообработки) установлен П-образный АЭ размером 2,5x4 м для защиты от шума рабочего места слесаря механосборочных работ. Без АЭ шум превышал нормы на 2-15 дБ (15 дБА), при установке АЭ в цехе без

акустической обработки снижение шума на рабочем месте составляло 7-10 дБ (10 дБА) и шум превышал нормы на 4-6 дБ (5 дБА). При том же АЭ и акустической обработке помещения ($\overline{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}=0,4$) уровни звукового давления дополнительно снижены на 3-10 дБ, а уровни звука на 9 дБА, шум в норме во всем частотном диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Измерения шума были проведены на рабочих местах и в рабочих зонах четырех производственных предприятий в городах: Санкт-Петербург, Москва, Пермь. Всего было обследовано 22 производственных цеха, производственных участка и производственных линий, измерения проведены в 435 измерительных точках. При анализе было установлено, что эквивалентные уровни звука не превышают норму примерно на 10% рабочих мест и в рабочих зонах, в 70% превышения шума до 10 дБА, а в 20% зарегистрированы существенные превышения от 11 до 22 дБА. Таким образом, проблема защиты от шума на предприятиях этой отрасли является актуальной.

2. Акустические свойства помещений промышленных предприятий были изучены на основании экспериментальных исследований 22 помещений (цехов и производственных участков), для каждого из которых были выполнены измерения времени реверберации, а также вычисления среднего коэффициента звукопоглощения и граничного радиуса в октавных полосах частотного диапазона 125-8000 Гц. Измеренные значения времени реверберации составили от 0,8-0,5 до 2,3 – 1,3 с. Вычисленные значения среднего коэффициента звукопоглощения находятся в диапазоне 0,1 – 0,2, что значительно снижает эффективность средств шумозащиты, устанавливаемых на пути распространения звука от ИШ до рабочего места или рабочей зоны, в частности, акустических экранов.

3. Предложена классификация акустических свойств производственных помещений в зависимости от значения предложенного критерия $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ и характера звукового поля в помещении: I класс: ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} \leq 0,2$), звуковое поле диффузное, помещение гулкое, какое-либо звукопоглощение отсутствует; II класс: ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$), звуковое поле квазидиффузное I, помещение обладает слабым звукопоглощением; III класс: ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$), звуковое поле квазидиффузное II, помещение оборудовано заметным звукопоглощением; IV класс: ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$), звуковое поле слабодиффузное, помещение оборудовано максимально возможным звукопоглощением.

4. Расчёт по формулам, представленным в основном нормативном документе, показал неприемлемое отклонение расчётных данных от данных эксперимента. В помещениях с одним (или превалирующим) ИШ предложено рассматривать три области звукового поля на расстояниях r , связанных с граничным радиусом $r_{\text{гр}}$: I – прямой звук ($r \leq 0,5r_{\text{гр}}$), II – прямой и отраженный звук ($0,5r_{\text{гр}} < r < 2r_{\text{гр}}$), III – отраженный звук ($r \geq 2r_{\text{гр}}$), а расчет АЭ выполнять в зависимости нахождения РТ в одной из областей.

5. Получена формула для расчётов АЭ в области прямого и отраженного звука, где эффективность АЭ зависит от расположения его в пространстве, высоты АЭ, его звукопоглощающих свойств, коэффициента дифракции $\beta_{\text{дифр}}^{\text{экп}}$ и экспериментальных поправок на влияние отраженного звука в помещении и на влияние формы АЭ. Для звукового поля в области отраженного звука получена формула для расчётов АЭ, в которой, помимо вышеуказанных параметров, также включены параметры, показывающие поглощающие (отражающие) свойства помещений (средний коэффициент звукопоглощения, эквивалентная площадь звукопоглощения и коэффициент диффузности звукового поля), как до, так и после установки АЭ). Экспериментальная проверка показала приемлемую точность результатов, полученных расчётом по двум предложенными формулам.

6. Для проведения испытаний был создан опытный стенд, состоящий из набора АЭ различных по площади, форме и пр. в совокупности с искусственным ненаправленным источником звука постоянной звуковой мощности и аппаратурой для измерений значений УЗД, УЗ и времени реверберации в помещениях. Испытания проводились в свободном звуковом поле и в опытном помещении с различными задаваемыми акустическими характеристиками. Испытывались АЭ трех типоразмеров (1x1; 1,5x1,5; 2x2), плоские, Г-образные, П-образные и полузамкнутые с нанесенным по площади АЭ ЗПМ и без ЗПМ. В соответствии с предложенной классификацией акустическая обработка опытного помещения проводилась в 4 этапа: в зависимости от значения выбранного критерия $\alpha_{\text{пом}}^{1000} = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$.

7. Результаты испытаний АЭ в свободном звуковом поле показали, что для АЭ различных размеров в точке 1 (зона глубокой акустической тени) получено: 1x1м – эффективность 3-17 дБ, в диапазоне частот — 125-8000 Гц (8 дБА); 1,5x1,5м – эффективность 4,5-20дБ (12 дБА); 2x2 – эффективность 6-23 дБ (15 дБА); отмечена закономерность — при каждом удвоении площади АЭ эффективность возрастает на 3-4 дБА. Значение эффективности в точке 2 стабильно на 2 дБ (дБА) ниже из-за уменьшения угла дифракции. Эффективность Г-образных АЭ на 1-2 дБ (1дБА) выше, чем плоских П-образных, выше на 2-4 дБ (3 дБА), а полузамкнутых выше на 5-7 дБ (6дБА). И, наконец, при нанесении на плоскость АЭ звукопоглощающих материалов (ЗПМ) его эффективность возрастает на 2-3 дБ (2 дБА)

8. Если АЭ расположен в помещении, то его акустическую эффективность, в первую очередь, определяют акустические свойства помещения $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$. Были выполнены исследования изменения эффективности АЭ и степени влияния на эффективность АЭ акустических свойств помещения. Так для АЭ с размером 2x2 м при увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ от 0,2 до 0,3 эффективность АЭ увеличивается на 1,5 – 2,5 дБ (2 дБА), при увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ до 0,4 на 3,5 – 5,5 дБ (5дБА); при увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ до 0,5 на 5 – 8 дБ (9 дБА). Абсолютные значения акустической эффективности АЭ 2x2 м при различных $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ составили: при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$ эффективность 1,5-6 дБ (5 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$ эффективность 2,5 – 11 дБ (7,5 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$ эффективность 3,5 – 16 дБ (10 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ эффективность 4,5 – 20 дБ (12 дБА). Таким образом при каждом увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ на 0,1 эффективность АЭ возрастаёт на 2-2,5 дБА. На основании выполненных экспериментов для всех типоразмеров АЭ получены значения поправок в предложенную формулу расчёта эффективности АЭ в помещении.

9. Разработаны рекомендации по проектированию и установке АЭ в производственных помещениях, включающие: обязательную акустическую обработку помещений, где располагаются АЭ; связь местоположения АЭ с

величиной граничного радиуса (радиуса реверберации), а также применение в конструкции АЭ элементов, увеличивающих его эффективность (размеры, форма, ЗМП).

10. Выполнена апробация предложенных решений: П-образный АЭ размером 2,5x4 м установлен в цехе металлообработки на рабочем месте слесаря механосборочных работ. Без АЭ шум превышал нормы на 2-15 дБ (15 дБА), при установке АЭ в цехе без акустической обработки снижение шума на рабочем месте составляло 7-10 дБ (10 дБА) и шум превышал нормы на 4-6 дБА (5 дБА). При том же АЭ и акустической обработке помещения ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$) уровни звукового давления дополнительно снижены на 3-10 дБ, а уровни звука на 9 дБА, шум в норме во всем частотном диапазоне

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: СанПиН 1.2.3685-21 : утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28.01.2021. – Москва: Роспотребнадзор. 2021.
2. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменениями №1-4). - М.: Стандартинформ, 2011. - 57 с.
3. Буторина, М. В. Основы виброакустики. Теория и практика борьбы с шумом и вибрацией : учебник : в 2 т. / М. В. Буторина, Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин. – СПб. : БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 2024. – Т. 1. – 391 с. ; Т. 2. – 380 с.
4. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году : Государственный доклад / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. – М. : Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2025. – 424 с.
5. Иванов Н.И., Тюрина Н.В. Акустические экраны и экранирующие сооружения: в кн. Иванов Н.И. «Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом»-3-е изд. перераб. и доп. -М.: Логос, 2013. -с 181-206.
6. Иванов, Н. И. Защита от шума и вибрации : учеб. пособие / Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Печатный Цех, 2019. – 284 с.
7. Антонов А. И. Расчеты шума в гражданских и промышленных зданиях при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений/ А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, И. Л. Шубин – М.: Директ-Медиа. -2022. –192 с.
8. Леденев, В. И. Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании производственных зданий/ В. И. Леденев. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. ун-та, 2000. –156 с.

9. Лагунов, Л. Ф. Борьба с шумом в машиностроении / Л. Ф. Лагунов, Г. Л. Осипов. – М. : Машиностроение, 1980. – 150 с.
10. Колесникова, Г. М. Анализ возможных причин возникновения профзаболеваний занятых на полиграфическом предприятии работников/ Г. М. Колесникова// Наука промышленность обороны: труды XX Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения С.А. Чаплыгина: в 4-х томах, Новосибирск, 17–19 апреля 2019 года / Под редакцией С.Д. Саленко. Том 3. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. – С. 84-88.
11. Справочник по технической акустике / под ред. М. Хекла, Х. А. Мюллера ; пер. с нем. – Л. : Судостроение, 1980. – 440 с.
12. Тупов, В. Б. Снижение шума от энергетического оборудования : учеб. пособие для вузов / В. Б. Тупов. – М. : Изд-во МЭИ, 2005. – 232 с.
13. Осипов Г. Л. Исследование звуковых полей в производственных помещениях и разработка методов расчета ожидаемого шума// Г. Л. Осипов, М. В. Сергеев, И. Л. Шубин/Строительные конструкции. Обзорная информация. М.ВНИИС. Строительство и архитектура. Сер. 8. -1985. -№8. -73 с.
14. Engineering Acoustics: Noise and Vibration Control: Handbook / Malcolm J. Crocker, Jorge P. Arenas. – John Wiley & Sons Ltd., 2021. – 784 p.
15. Тюрина, Н. В. Снижение шума на селитебных территориях и рабочих местах в помещениях акустическими экранами/Н. В. Тюрина. –СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2014. –79 с.
16. Месхи, Б. Ч. Улучшение условий труда рабочих, занятых в обслуживании металло- и деревообрабатывающих станков прерывистого резания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.01/Б. Ч. Месхи. – Санкт-Петербург, 2004. – 39 с.
17. Vasiliev A.V., Sannikov V.A., Tyurina N.V. Experience of estimation and reduction of noise and vibration at industrial enterprises of Russia // Akustika, 2019, vol. 32, pp. 247-250.

18. Крутова, В. А. Практические рекомендации по снижению шума на рабочем месте машиниста вагона-электростанции восстановительного поезда / В. А. Крутова, Д. С. Фролова // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 5. – С. 43-47. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-5-43-47.
19. Мусина, С. А. Анализ опасных и вредных факторов и разработка мероприятий по снижению уровня шума на рабочем месте распиловщика мясопродуктов мясоперерабатывающего цеха / С. А. Мусина, А. И. Щелчкова, Л. Ф. Хасанова // Форум молодых ученых. – 2018. – № 3 (19). – С. 124-128.
20. Терехов, А. Л. Повышение безопасности труда на предприятиях ПАО «Газпром» (компрессорные станции) / А. Л. Терехов // Вестник газовой науки. – 2017. – № 1 (29). – С. 55-62.
21. Чукарин, А. Н. Экспериментальные исследования уровней шума, создаваемых мостовыми кранами в производственных помещениях/ А. Н. Чукарин, В. А. Бондаренко // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2017. – № 4(43).
22. Антонов, А. И. Снижение шума акустическими экранами в помещениях с потолками из звукопоглощающих кулис кессонного типа / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // Безопасность строительного фонда России: Материалы Международных академических чтений, Курск, 14 ноября 2025 года. - Курск: Курский государственный университет, 2025. 12-17 с.
23. Tsukernikov, I. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection / I. Tsukernikov, A. Antonov, V. Ledenev, I. Shubin, T. Nevenchannaya // Procedia Engineering. - 2017. - No 176. - P. 218-225.
24. Борьба с шумом на производстве: справочник / под общ. ред. Е. Я. Юдина. – М. : Машиностроение, 1985. – 400 с.
25. Звукоизоляция и звукопоглощение : учеб. пособие / под ред. Г. Л. Осипова, В. Н. Бобылева. – М. : АСТ, 2004. – 336 с.
26. Клюкин, И. И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах / И. И. Клюкин. – Л. : Судостроение, 1971. – 416 с.

27. Васильев А. П. Разработка мероприятий для снижения шума вытяжных систем промышленного предприятия/ Васильев А. П., Кондратьев С. А., Фиев К. П., Тюрина Н. В. // Noise Theory and Practice. – 2025. – №3(11). – С. 188-197.
28. Шабарова А. В. 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.
29. Гомзиков Э.А. К расчету эффективности звукозащитных экранов //Судостроение. -1968. -4. –с.16-18.
30. Шубин И.Л. Акустический расчет и проектирование конструкций шумозащитных экранов: специальность 01.04.06 диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: / Шубин Игорь Любимович. – Москва, 2011. – 318 с.
31. 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. 78-82.
32. Осипов, Г. Л. Защита зданий от шума / Г. Л. Осипов. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1972. – 215 с.
33. Снижение шума в зданиях и жилых районах / под ред. Г. Л. Осипова, Е. Я. Юдина. – М. : Стройиздат, 1987. – 588 с.
34. Средства защиты в машиностроении. Расчет и проектирование : справочник / под ред. С. В. Белова. – М. : Машиностроение, 1989. – 480 с.
35. Тюрина, Н.В. Оценка эффективности кабины для снижения шума на рабочих местах/ Тюрина Н.В., Фиев К.П., Воронова А.А// Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 4(26). – С. 92-101.
36. Воронова, А. А. Расчет акустической эффективности кабин, устанавливаемых в помещениях/ Воронова А. А. Тюрина Н. В., Иванов Н. И., // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 4(26). – С. 102-107.
37. Щевьев, Ю. П. Аналитические методы расчета шумозащитных конструкций / Ю. П. Щевьев, А. А. Белоусов. – СПб. : Политехника, 2002. – 341 с.

38. ГОСТ 12.1.029-80. Система стандартов безопасности труда. Средства и методы защиты от шума. Классификация. – Введ. 1982-01-01.
39. Шашурин, А. Е. Расчёт шумозащитных ограждений для снижения шума операторов металлообрабатывающих станков / А. Е. Шашурин, П. С. Курченко, М. Г. Гогуадзе, Ж. П. Разаков // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 4(26). – С. 18-25.
40. Шашурин, А. Е. Снижение внутреннего шума звукоизолирующими кабинами (на примере строительно-дорожных машин) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.06 / А. Е. Шашурин. – Санкт-Петербург, 2010. – 24 с.
41. Зюзликова Н.В., Иванов Н.И., Шубин И.Л. Влияние звукопоглощения на эффективность акустических экранов, устанавливаемых в помещении. //Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новое в экологии и БЖД», 18-21 июня 1998, Санкт-Петербург, -т.2, -с.374-378.
42. Олейников, А. Ю. Акустическая защита на борту пилотируемых космических станций : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.06 / А. Ю. Олейников. – Санкт-Петербург, 2007. – 24 с.
43. Изак, Г. Д. Шум на судах и методы его уменьшения / Г. Д. Изак, Э. А. Гомзиков. – М. : Транспорт, 1987. – 303 с.
44. Пятачкова, Л. Н. Снижение шума на промышленных предприятиях методом экранирования / Л. Н. Пятачкова, А. С. Рыбак // Сборник докладов научно-практических конференций по борьбе с шумом и вибрацией на производстве. – Л. : Судостроение, 1972. – С. 39–43.
45. Пятачкова, Л. Н. Расчет эффективности плоских экранов конечных размеров / Л. Н. Пятачкова, С. А. Рыбак // Тезисы докладов конференции «Безопасность труда и профилактика профессиональных заболеваний в судостроительной промышленности». – Л. : Судостроение, 1969. – С. 5-8.
46. Поболь, О. Н. Шум в текстильной промышленности и методы его снижения / О. Н. Поболь. – М. : Легпромбытиздат, 1987. – 144 с.

47. Bento Coelho, J. L. Noise in industry - a survey in Portugal / J. L. Bento Coelho, J. F. M. V. Serrano, C. A. Fafaiol // Proceedings of international conference Noise'93, May 31-June 3, 1993, St. Petersburg, Russia. – 1993. – Vol. 2. – P. 91-96.
48. Maekawa, Z. Environmental and architectural acoustics / Z. Maekawa. – London : E & FN Spon, 1994. – 377 p.
49. Maekawa, Z. Recent problems with noise barriers / Z. Maekawa // Proceedings of international conference Noise'93, May 31-June 3, 1993, St. Petersburg, Russia. – 1993. – Vol. 4. – P. 125-131.
50. Maekawa, Z. Simple estimation methods for reduction by variously shaped barriers / Z. Maekawa // Archives of Acoustics. – 1985. – Vol. 10, № 4. – P. 369-382.
51. Зюзликова Н.В. Снижение шума на рабочих местах в помещениях акустическими экранами: автореф. дис....канд. техн. наук: 01.04.06, 05.26.01/ Н. В. Зюзликова – Санкт-Петербург, 1999. – 24 с.
52. Тюрина, Н. В. Решение проблемы снижения шума на селитебных территориях и рабочих местах в помещениях акустическими экранами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.06/ Н. В. Тюрина. – Санкт-Петербург, 2014. – 22 с.
53. Natalia Tyurina, Nickolay Ivanov, Alexander Shashurin, Svetlana Bortsova Investigation of parameters influencing noise barrier efficiency// Proceedings of the 27th Annual Congress of International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), 11-16 July 2021. – 5p.
54. Тюрина, Н. В. Классификация акустических экранов/Н. В. Тюрина // Новое в теоретической и прикладной акустике: сб. тр. 2-ой Всероссийской школы-семинара / под ред. Н. И. Иванова. – СПб.: Изд-во БГТУ, 2002. – С. 115–122.
55. Tyurina, N. V. Application of acoustical barriers for reduction of environmental noise emitted by ventilation systems/N. V. Tyurina//Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden, 7-10 July 2003. –2003. – Vol. 5. – P. 2781–2788.
56. Tyurina, N. V. Experimental study of noise barriers // N. V. Tyurina, N. N. Minina, A. E. Shashurin, M. G. Goguadze //Proceedings of the 26th International

Congress on Sound and Vibration, ICSV 2019, Montreal, QC, 07–11 July 2019 – Montreal, QC: Canadian Acoustical Association, 2019.

57. Tyurina, N. V. Prediction and design of noise barriers for stationary noise sources /N. V. Tyurina//Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration, Vienna, Austria, 2-6 July, 2006. –2006. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
58. Тюрина, Н. В. Акустические экраны для снижения шума в жилой застройке /Н. В. Тюрина, Н. И. Иванов, Н. Г. Семёнов//Безопасность жизнедеятельности. Приложение к журналу. – 2012. – № 4. – С. 1–24.
59. Чудинов, Ю. М. Оценка звукопоглощения системы акустических кулис в диффузном поле/Ю. М. Чудинов//Сборник трудов НИИСФ. – М. : НИИСФ, 1983. – С. 50-53.
60. Акустика: учебник для вузов / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев, Ю. П. Щевьев ; под ред. Ю. А. Ковалгина. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 660 с.
61. Гаспарян, Ю. А. Инженерный метод оценки снижения шума звукопоглощающими конструкциями в цехах производственных зданий большой площади/ Ю. А. Гаспарян, К. Г. Воронов// Сборник трудов НИИСФ. – М. : НИИСФ, 1983. – С. 53-57.
62. Рэлей (Стретт, Дж. В.). Теория звука: в 2 т. – М. : Гостехиздат, 1955.
63. Скучик, Е. Основы акустики: в 2 т. – М. : Мир, 1976. – Т. 1. – 557 с. ; Т. 2. – 548 с.
64. Шелухин, М. И. О приведенном коэффициенте звукопоглощения ограждающей поверхности помещения/ М. И. Шелухин// Сборник трудов НИИСФ. – М.: НИИСФ, 1983. –С. 21-24.
65. Шелухин, М. И. Учет поглощения звука в воздухе при расчете звукового поля помещения/ М. И. Шелухин// Сборник трудов НИИСФ. –М. : НИИСФ, 1983. –С. 24-27.
66. Кочнев, А. П. Акустики храмовых, театральных и спортивных сооружений/ А. П. Кочнев. – М.: Стройиздат, 1990. – 288 с.

67. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RUS №2008610071. Расчет уровней шума нестационарного звукового поля и времени реверберации в производственных помещениях методом прослеживания звуковых лучей/ А. И. Антонов, А. М. Макаров (РФ), опубл. 09.01.2008.
68. Щевьев, Ю. П. Основы физической акустики: учебное пособие / Ю. П. Щевьев. – СПб.: Лань, 2017. – 364 с.
69. Борисов, Л. А. Акустические проблемы комфортной среды обитания человека / Л. А. Борисов, М. А. Пороженко, Х. А. Щиржецкий // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 65-67.
70. Косинова, В. Е. О расчете реверберации в закрытых помещениях / В. Е. Косинова, Н. Г. Сасковец // Сборник трудов НИИСФ. – М. : НИИСФ, 1983. – С. 17-22.
71. Косинова, В. Е. Методы расчета реверберации в помещениях с недиффузным звуковым полем : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.03 / В. Е. Косинова. – М., 1987. – 24 с.
72. Борисов, Л. А. Акустика малых музыкальных помещений / Л. А. Борисов, Х. А. Щиржецкий, Е. В. Насонова // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 88-94.
73. Щиржецкий, Х. А. Акустика большого концертного зала Дворца культуры и спорта им. В. И. Ленина в г. Таллине / Х. А. Щиржецкий, М. З. Малкович, Л. Мадалик // Сборник трудов НИИСФ. – М. : НИИСФ, 1985. – С. 31-37.
74. Щиржецкий, Х. А. Обеспечение акустического комфорта в многоцелевых залах с помощью систем электроакустики / Х. А. Щиржецкий, М. З. Малкович // Сборник трудов НИИСФ. – М. : НИИСФ, 1985. – С. 37-48.
75. Щиржецкий, Х. А. К проблеме акустического проектирования современных залов многоцелевого назначения / Х. А. Щиржецкий, В. Н. Сухов, А. Х. Щиржецкий, В. М. Алёшкин // Жилищное строительство. – 2019. – № 7. – С. 25-29.

76. Сергеев, М. В. Исследования применимости формулы Эйринга к описанию реверберации в несоразмерных помещениях / М. В. Сергеев, В. Е. Косинова // Сборник трудов НИИСФ. – М. : НИИСФ, 1983. – С. 10-17.
77. Kuttruff, H. Room Acoustics/ H. Kuttruff. – 3rd edition. – London : Elsevier Applied Science, 1991. – 401 p.
78. Бреховских Л.М. Пределы применимости некоторых приближенных методов, употребляемых в архитектурной акустике. //УФН. –т.32. –4. –1947. -с.464-476.
79. Основы проектирования транспортных шумозащитных экранов: учебное пособие /И.Л. Шубин, И.Е. Цукерников, Н. Николов, А. Писарски/. -М.: ИД «БАСТЕТ». -2015. -208 с.
80. Kurze, U. J. Scattering of Sound in Industrial Spaces/ U. J. Kurze// Journal of Sound and Vibration. – 1985. – Vol. 98, № 3. – P. 349-364.
81. Klimov, B. I. Calculation of noise reduction provided by flexible screens (barriers) for printing machines/ B. I. Klimov, N. V. Sizova// Proceedings of the Second International Congress on Recent Developments in Air- and Structure-borne Sound and Vibration, March 4-6, 1992, Auburn, USA. -1992. – Vol. 3. – P. 1449-1453.
82. Duhamel, D. Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier / D. Duhamel // Journal of sound and vibration. – 1996. – Vol. 197, № 5. – P. 547-571.
83. Lam, W. A simple method for accurate prediction of finite barrier insertion loss / W. Lam, S. C. Roberts // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1993. – Vol. 93, № 3. – P. 1445-1452.
84. Chevret P., Chattillon J. Implementation of diffraction in a ray-tracing model for the prediction of noise in open-plan offices / J. Acoust. Soc. Am. 123, 3760 (2008). DOI. org/ 10.1121/1.4754554.
85. Жданов, А. Е. Оценка шумового режима и проектирование шумозащиты в производственных зданиях с учетом закономерностей распространения отраженной звуковой энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01/А. Е. Жданов. – М., 2007. – 23 с.

86. Бондаренко, В. А. Уточнение расчёта акустических экранов, устанавливаемых в производственном помещении / В. А. Бондаренко, И. В. Богуславский, С. С. Подуст // Вестник ДГТУ. – 2014. – №1 (76). – С. 93-97.
87. ГОСТ 31287-2005 (ИСО 17624:2004). Шум. Руководство по снижению шума в рабочих помещениях акустическими экранами. – Введ. 2007-01-01.
88. Антонов, А. И. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, И. Л. Шубин. – Москва–Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 274 с. – EDN FBLHNO.
89. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611868 Российская Федерация. Комплексная программа по расчету звуковых полей в помещениях и проектированию средств защиты от шума : № 2019610550: заявл. 22.01.2019: опубл. 05.02.2019 / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». – EDN PNEPHG.
90. Матвеева, И. В. Оценка звуковых полей помещений при проектировании объемно-планировочных и конструктивных решений производственных зданий с учетом защиты от шума: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / И. В. Матвеева. – М., 2000. – 21 с.
91. Яровая, Т. С. Оценка влияния перегородок неполной высоты на акустические параметры помещения / Т. С. Яровая, А. И. Антонов, И. В. Матвеева, Е. О. Соломатин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 122-133. – DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-1-122-133. – EDN YIOIGE.
92. Антонов, А. И. Оценка эффективности снижения отраженного шума за экраном при устройстве в помещении звукопоглощающей облицовки / А. И. Антонов, В. П. Гусев, О. А. Жоголева, В. И. Леденев // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2024. – № 5(1077). – С. 24-26. – EDN NWQJES.
93. Антонов, А. И. Оценка акустической эффективности системы звукопоглощающих кулис кессонного типа / А. И. Антонов, В. П. Гусев, В. И.

Леденев, И. В. Матвеева // Строительство и реконструкция. – 2025. - №4(120). – С. 3-13.

94. Расчеты акустической эффективности шумозащитных экранов на основе численного решения уравнения дифракции звука / А. И. Антонов, В. П. Гусев, В. И. Леденев [и др.] // Жилищное строительство. – 2024. – № 6. – С. 10-15.

95. Жоголева, О. А. Численная оценка зоны влияния звукопоглощающей облицовки потолка на снижение отраженного шума в помещениях / О. А. Жоголева, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума, Тамбов, 17–21 мая 2023 года. – Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2023. – С. 291-292.

96. СП 254.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от производственного шума: утв. приказом Минстроя России от 29.12.2016 № 1037/пр : введ. 2017-05-04. – М. : Минстрой России, 2016. – 95 с.

97. Шашурина А.Е. Научное обоснование и применение новых технических и технологических решений для снижения акустического загрязнения основными типами шумозащитных экранов: диссертация докт. техн. наук: 01.04.06/ Шашурина Александр Евгеньевич. –Санкт-Петербург, 2018. – 336с.

98. Шашурина А. Е. Определение эффективной высоты и акустических характеристик шумозащитного экрана / А. Е. Шашурина // Noise Theory and Practice. – 2018. – Т. 4, № 2(12). – С. 5-10.

99. Светлов, В. В. Оценка и снижение шума стационарных источников в жилой застройке: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.06/В. В. Светлов. – Санкт-Петербург, 2021. – 24 с.

100. Бужинский К. В. Практические решения по снижению шума чиллеров и драйкулеров / Бужинский К.В., Андрющенко А.К., Кондратьев С. А., Тюрина Н. В., Фиев К. П. // Noise Theory and Practice. – 2025. – №4(12). – С. 260-274.

101. Иванов, Н. И. 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. 12-19.

102. ГОСТ ИСО 9612-2016. Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. – Введ. 2017-07-01.

103. ГОСТ ИСО 3382-2-2013. Акустика. Измерение акустических параметров помещения. Часть 2. Время реверберации обычных помещений. – Введ. 2015-01-01.

104. ГОСТ Р 53188.1-2019 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Шумомеры. Часть 1. Технические требования. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019 год.

105. ГОСТ Р МЭК 60942-2009 Калибраторы акустические. Технические требования и требования к испытаниям (с Поправкой). официальное издание М.: Стандартинформ, 2010 год.

106. Кондратьев С.А., Тюрина Н.В., Фиев К.П. Исследование акустических свойств помещений промышленных предприятий// Noise Theory and Practice. -2025. -Т.11. -(3) – С. 178-187.

107. Кондратьев, С. А. Расчет эффективности акустических экранов, установленных в помещении/С. А. Кондратьев, Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина, А. Е. Шашурин//Сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от шума и вибрации», Санкт-Петербург, 01–03 октября 2025 года. –Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, 2025. – С. 246-252.

108. Кондратьев, С. А. Влияние формы и размеров акустического экрана на его эффективность / С. А. Кондратьев, Н. И. Иванов, Н. В. Тюрина // Noise Theory and Practice. – 2025. – Т. 11, № 3(42). – С. 121-132.

**Приложение А. Данные испытаний опытных АЭ в свободном звуковом
поле**

Таблица 1 – Данные испытаний опытных АЭ в свободном звуковом поле. Микрофон №1

№ измерения	Тип измерения	Микрофон №1									УЗ, дБА	
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
		31,5	63,0	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Измерение 1	АЭ 1м x 1м П-образный АЭ	54,6	69,6	91,9	97,6	86,1	93,0	93,2	92,3	87,4	101,2	
		57,6	69,6	91,8	97,7	86,0	93,0	93,2	92,4	87,2	101,2	
		54,7	69,4	92,0	97,6	86,1	93,0	93,3	92,4	87,1	101,2	
Измерение 2	АЭ 1м x 1м Г-образный АЭ	55,8	70,3	91,7	97,6	85,6	93,2	93,4	92,5	87,3	101,2	
		55,2	69,7	92,0	97,7	85,8	93,2	93,4	92,5	87,3	101,3	
		57,1	69,5	91,9	97,6	85,6	93,2	93,4	92,5	87,2	101,3	
Измерение 3	АЭ 1м x 1м Прямой АЭ	55,5	70,2	92,1	97,8	85,5	93,3	93,4	92,3	87,3	101,4	
		53,7	70,6	92,1	97,7	85,6	93,3	93,4	92,4	87,1	101,3	
		53,1	69,5	92,2	97,6	85,1	92,9	93,1	92,3	86,9	101,2	
Измерение 4	Свободное поле	52,5	70,3	92,5	98,0	85,3	93,1	93,2	92,3	87,1	101,4	
		53,0	69,4	91,7	97,4	84,6	92,8	92,9	92,2	87,0	101,0	
		54,8	69,6	92,2	97,8	84,8	92,9	93,0	92,2	87,1	101,2	
Измерение 5	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ	55,3	70,6	94,3	100,0	87,8	93,5	93,2	92,4	88,1	102,7	
		53,9	70,1	93,8	99,7	87,5	93,4	93,0	92,2	88,1	102,4	
		53,4	69,9	93,5	99,6	87,5	93,4	93,0	92,1	88,1	102,3	
Измерение 6	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (внешняя)	54,4	70,4	93,4	99,3	86,0	92,9	92,3	89,7	88,0	101,7	
		55,3	69,5	92,7	98,7	85,3	92,3	91,9	89,4	88,0	101,2	
		55,6	69,2	92,8	98,3	85,0	92,2	91,7	89,6	87,8	101,0	
Измерение 7	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ	53,1	68,5	91,8	97,0	85,6	91,0	91,0	85,5	83,9	99,7	
		54,4	68,1	91,2	96,7	85,4	91,3	90,5	85,6	83,5	99,4	
		56,0	68,6	91,1	96,3	85,2	91,3	90,2	85,8	84,2	99,2	

Продолжение таблицы 1

Измерение 8	АЭ 1,5м x 1,5м Г-образный АЭ	54,2	68,4	90,5	95,8	85,3	91,8	90,4	87,0	85,6	99,1
		55,1	67,9	90,6	96,0	85,1	91,6	90,1	87,1	86,1	99,2
		55,1	68,4	90,3	95,8	84,7	91,5	90,2	86,9	86,1	99,0
Измерение 9	АЭ 1,5м x 1,5м П-образный АЭ	53,4	68,0	90,6	96,3	86,1	92,1	90,6	86,8	85,8	99,5
		51,8	67,8	90,6	96,2	86,0	91,9	90,3	86,8	86,0	99,3
		51,1	67,4	89,9	96,1	85,8	91,8	90,4	86,8	85,7	99,2
Измерение 10	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ	54,4	68,3	92,0	97,0	85,3	91,6	90,1	86,8	86,0	99,8
		55,0	67,3	91,0	96,6	85,0	91,2	89,9	86,6	86,0	99,3
		52,6	68,0	91,1	96,4	84,9	91,0	90,0	86,6	86,1	99,3
Измерение 11	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	54,7	69,1	91,5	96,8	84,2	90,9	91,0	86,7	86,0	99,6
		55,9	68,2	91,8	96,3	83,9	90,5	90,9	87,0	86,1	99,4
		55,6	67,9	91,6	96,2	83,5	90,5	90,8	87,3	86,2	99,3
Измерение 12	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	59,8	69,7	91,6	96,1	84,3	91,0	90,8	86,3	85,9	99,3
		57,3	69,7	90,8	95,2	83,4	90,5	90,8	86,7	86,2	98,7
		57,0	69,2	90,3	95,0	83,3	90,6	90,8	86,8	86,2	98,6
Измерение 13	Свободное поле	54,7	68,8	90,5	95,8	83,9	91,5	89,6	87,6	85,8	99,0
		54,4	68,1	90,2	95,5	83,6	91,0	89,3	87,3	85,4	98,6
		53,5	67,9	90,1	95,6	83,3	91,0	89,4	87,3	85,3	98,6
Измерение 14	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ	53,9	67,3	89,5	94,3	84,5	90,4	88,9	83,4	81,3	97,6
		56,3	67,5	89,2	93,7	83,9	90,0	88,9	83,5	81,6	97,2
		55,2	67,2	89,6	93,9	83,9	90,2	88,8	83,9	81,5	97,4
Измерение 15	АЭ 2м x 2м Г-образный АЭ	54,7	67,7	91,1	96,0	85,5	91,1	87,9	83,7	84,0	98,7
		56,2	69,4	90,4	95,5	84,9	90,8	87,6	83,7	83,6	98,3
		56,1	67,8	90,8	95,7	85,0	90,8	87,5	83,5	83,3	98,4

Продолжение таблицы 1

Измерение 16	АЭ 2м x 2м П-образный АЭ	55,5	67,7	91,4	96,2	85,1	91,0	87,8	83,1	82,6	98,8
		55,2	67,5	91,0	96,1	84,8	90,8	87,5	83,0	82,6	98,6
		56,0	67,2	91,1	95,8	84,8	90,8	87,4	82,9	82,6	98,5
Измерение 17	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ	55,8	68,5	91,6	96,7	85,1	91,3	88,4	83,8	83,0	99,2
		56,6	67,6	91,3	96,7	84,8	90,9	88,1	84,0	83,4	99,0
		57,1	67,8	91,3	96,7	84,8	91,2	88,2	84,0	83,0	99,1
Измерение 18	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	51,8	67,6	91,3	96,1	83,4	89,0	88,5	82,8	82,0	98,4
		54,0	67,3	91,1	95,9	83,3	88,6	88,5	82,7	82,1	98,2
		54,0	67,3	91,1	95,7	83,3	88,5	88,4	83,6	81,7	98,1
Измерение 19	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	54,5	67,7	90,4	94,4	83,8	89,1	88,9	83,8	81,7	97,6
		53,8	67,6	90,4	94,4	83,5	89,1	88,4	83,2	81,6	97,5
		53,5	67,5	90,4	94,7	83,5	89,2	88,6	83,1	81,7	97,7
Измерение 20	Свободное поле	53,0	67,2	88,7	93,4	84,6	89,0	89,5	83,1	81,8	97,0
		54,2	67,2	88,5	93,3	84,4	89,0	89,7	82,8	81,5	96,9
		57,8	67,5	88,4	93,3	83,8	88,7	89,6	82,5	80,9	96,7

Таблица 2 – Данные испытаний опытных АЭ в свободном звуковом поле. Микрофон №2

№ измерения	Тип измерения	Микрофон №2									
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА	
		31,5	63,0	125	250	500	1000	2000	4000		
Измерение 1	АЭ 1м x 1м П-образный АЭ	55,4	72,7	85,3	87,9	80,3	78,4	77,6	74,3	69,2	90,8
		58,0	72,6	85,2	88,0	80,2	78,4	77,7	74,4	69,1	90,8
		55,4	72,5	85,3	87,9	80,3	78,4	77,6	74,5	69,2	90,8
Измерение 2	АЭ 1м x 1м Г-образный АЭ	56,5	72,3	90,3	92,0	85,0	78,3	76,8	76,8	69,1	94,9
		55,9	71,7	90,6	92,1	85,1	78,1	76,8	77,0	69,0	95,1
		57,7	71,5	90,5	92,0	84,9	78,2	76,8	77,0	69,0	95,0
Измерение 3	АЭ 1м x 1м Прямой АЭ	56,2	71,8	94,2	98,7	87,2	78,3	77,0	78,0	69,1	99,9
		54,4	72,1	94,1	98,6	87,2	78,3	76,9	78,1	69,0	99,8
		53,8	71,1	94,2	98,5	86,8	77,8	76,7	77,9	68,7	99,8
Измерение 4	Свободное поле	53,4	71,8	94,2	101,0	96,1	89,3	93,0	94,1	88,1	103,7
		53,7	70,9	93,5	100,5	95,6	88,9	92,8	93,9	88,0	103,2
		55,4	71,1	93,9	100,8	95,6	89,1	92,8	93,9	87,8	103,4
Измерение 5	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ	56,7	72,7	81,8	84,5	83,0	77,1	79,1	73,1	68,3	89,0
		55,0	72,1	81,4	84,3	82,8	76,9	79,0	73,1	68,2	88,8
		54,9	72,1	81,1	84,0	82,7	76,9	78,7	73,0	68,2	88,5
Измерение 6	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (внешняя)	56,2	72,9	81,6	84,5	83,1	78,7	78,1	73,4	67,4	89,0
		57,3	72,0	81,0	84,1	82,4	78,5	77,7	73,3	67,7	88,5
		56,6	71,8	81,2	84,1	82,4	77,1	77,4	72,8	67,3	88,4
Измерение 7	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ	54,1	70,5	90,6	92,0	79,5	81,1	76,3	74,2	69,9	94,8
		55,6	70,1	90,2	92,0	79,4	81,2	76,3	73,6	70,5	94,5
		57,0	70,6	90,2	91,9	79,3	81,0	76,3	73,3	71,7	94,5

Продолжение таблицы 2

Измерение 8	АЭ 1,5м x 1,5м Г-образный АЭ	56,0	70,5	84,7	85,1	76,5	80,1	78,0	72,4	68,7	89,4
		56,1	69,9	84,8	85,5	76,3	79,9	77,7	72,4	69,4	89,5
		56,3	70,5	84,7	85,6	76,1	79,8	77,8	72,7	69,2	89,5
Измерение 9	АЭ 1,5м x 1,5м П-образный АЭ	54,9	69,5	83,2	87,2	77,2	79,7	79,2	77,3	68,3	89,9
		53,2	69,5	83,0	87,3	77,0	79,3	78,8	77,1	68,2	89,8
		53,0	68,9	82,5	87,2	77,0	79,3	79,1	77,0	68,5	89,6
Измерение 10	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ	56,3	67,8	78,5	92,0	83,1	81,1	80,3	77,1	69,4	92,6
		56,4	67,9	78,0	91,7	83,0	80,7	79,9	77,0	69,3	92,3
		54,5	67,6	78,1	91,5	83,0	80,6	79,8	77,1	69,1	92,2
Измерение 11	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	56,7	68,6	77,8	91,9	83,2	81,1	78,8	75,3	68,0	92,4
		57,6	67,6	78,0	90,8	82,6	80,8	78,7	75,3	67,9	91,6
		57,4	67,0	77,8	91,3	82,7	80,8	78,7	75,3	68,2	91,9
Измерение 12	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	60,5	71,4	90,2	91,5	78,6	81,7	75,4	73,0	68,7	94,3
		58,0	71,6	89,9	91,4	78,5	81,4	75,1	72,7	68,1	94,1
		57,8	71,0	89,6	91,3	78,6	81,3	74,8	72,1	69,0	93,9
Измерение 13	Свободное поле	55,3	71,6	93,7	100,3	94,4	88,7	95,1	93,4	88,4	103,2
		54,7	71,0	93,3	100,0	94,1	88,5	94,8	93,2	88,4	102,9
		53,9	70,8	93,3	99,9	93,8	88,4	94,8	93,1	88,4	102,8
Измерение 14	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ	56,8	68,4	84,5	84,4	82,7	77,7	74,4	69,9	67,9	89,4
		58,8	68,7	84,3	84,0	82,4	77,4	74,2	69,9	67,2	89,1
		58,0	68,3	84,6	84,1	82,4	77,4	74,3	70,0	67,2	89,2
Измерение 15	АЭ 2м x 2м Г-образный АЭ	57,9	66,8	77,7	79,3	81,0	75,5	71,4	69,1	67,2	85,3
		59,8	69,9	77,2	78,8	80,7	75,2	71,3	68,9	67,2	85,0
		60,1	66,8	77,3	78,9	80,9	75,3	71,2	68,8	67,3	85,0

Продолжение таблицы 2

Измерение 16	АЭ 2м x 2м П-образный АЭ	59,6	63,3	76,2	80,5	76,4	73,5	72,2	69,5	65,9	83,8
		59,4	63,9	76,2	81,1	76,9	74,2	72,8	70,2	66,5	84,2
		58,6	64,8	76,7	81,8	77,4	74,6	72,9	70,6	66,9	84,8
Измерение 17	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ	59,0	65,6	75,8	84,7	78,9	77,7	75,6	71,6	68,2	86,8
		59,3	66,6	76,2	84,8	78,5	77,2	75,3	71,3	68,1	86,7
		59,9	65,6	75,6	84,6	78,6	77,4	75,4	71,3	68,0	86,6
Измерение 18	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	53,8	63,3	76,1	85,2	78,9	77,0	75,1	69,6	65,0	86,9
		55,5	63,2	75,8	84,7	78,9	76,9	75,0	69,7	65,2	86,5
		55,5	63,8	75,8	84,4	78,9	76,8	74,8	69,7	65,2	86,3
Измерение 19	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	55,0	68,4	84,4	84,0	82,8	74,6	73,1	69,2	67,6	89,1
		54,8	68,1	83,9	83,4	82,5	74,3	72,1	69,8	67,2	88,6
		54,1	68,0	83,8	83,4	82,4	74,4	72,0	69,7	67,1	88,5
Измерение 20	Свободное поле	53,8	70,6	92,5	99,3	91,8	91,6	93,2	88,6	86,8	101,8
		54,9	70,4	92,3	99,1	91,4	91,4	93,2	88,6	86,6	101,6
		58,7	70,7	92,3	99,1	91,6	91,4	93,1	88,7	86,4	101,6

Таблица 3 – Данные испытаний опытных АЭ в свободном звуковом поле. Микрофон №3

№ измерения	Тип измерения	Микрофон №3									УЗ, дБА	
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
		31,5	63,0	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Измерение 1	АЭ 1м x 1м П-образный АЭ	54,9	71,1	89,2	92,5	79,5	73,6	76,6	72,1	66,1	94,2	
		57,4	71,1	89,1	92,5	79,5	73,5	76,6	72,2	66,2	94,1	
		55,0	70,9	89,3	92,4	79,6	73,5	76,5	72,1	66,3	94,1	
Измерение 2	АЭ 1м x 1м Г-образный АЭ	56,0	70,8	91,4	94,5	80,3	74,2	76,1	72,3	67,4	96,2	
		55,4	70,1	91,7	94,7	80,6	74,0	76,1	72,3	67,2	96,4	
		57,2	70,1	91,6	94,5	80,4	74,2	76,2	72,4	67,4	96,2	
Измерение 3	АЭ 1м x 1м Прямой АЭ	55,7	70,1	92,8	96,7	87,0	78,5	75,0	72,1	68,3	98,2	
		54,1	70,5	92,7	96,6	87,1	78,5	75,0	72,1	68,2	98,2	
		53,3	69,4	92,8	96,5	86,7	78,1	74,6	72,0	68,2	98,1	
Измерение 4	Свободное поле	52,7	69,7	92,1	99,0	94,1	88,9	86,8	89,5	82,3	101,2	
		53,0	68,7	91,4	98,5	93,5	88,6	86,6	89,4	82,3	100,7	
		55,0	68,9	91,8	98,8	93,5	88,7	86,5	89,3	82,3	100,9	
Измерение 5	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ	55,7	71,1	87,7	90,3	80,8	74,0	76,6	72,8	69,1	92,6	
		53,9	70,5	87,2	90,0	80,3	73,7	76,4	72,7	69,2	92,2	
		53,5	70,5	86,9	89,7	80,4	73,7	76,1	72,7	69,2	91,9	
Измерение 6	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (внешняя)	54,3	71,3	87,2	89,8	81,7	73,9	75,5	72,1	65,3	92,1	
		55,7	70,4	86,6	89,2	81,1	73,5	74,9	72,0	65,5	91,6	
		55,8	70,3	86,9	88,9	80,5	73,3	75,3	71,6	65,7	91,5	
Измерение 7	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ	53,2	69,1	89,2	92,0	78,1	79,5	76,5	75,1	70,7	94,0	
		54,6	68,7	88,8	92,0	77,9	79,5	76,3	75,1	69,5	93,8	
		56,1	69,1	88,8	91,8	78,0	79,4	76,1	75,0	70,3	93,8	
Измерение 8	АЭ 1,5м x 1,5м Г-образный АЭ	54,4	69,5	86,0	87,8	76,1	79,8	76,3	74,6	67,4	90,8	
		55,6	69,0	86,2	88,1	75,9	79,6	76,1	74,5	68,1	90,9	
		55,9	69,5	86,0	88,2	76,0	79,6	76,2	74,3	67,6	90,9	

Продолжение таблицы 3

Измерение 9	АЭ 1,5м x 1,5м П-образный АЭ	54,3	68,9	84,7	89,2	80,0	80,5	79,2	74,3	69,4	91,3
		52,3	68,7	84,5	89,0	79,7	80,2	78,9	74,3	69,6	91,1
		51,5	68,3	84,0	88,9	79,7	80,1	78,8	74,1	69,6	90,9
Измерение 10	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ	55,5	67,7	83,3	88,8	82,0	79,2	77,8	74,8	69,3	90,8
		55,7	67,3	82,6	88,5	81,9	78,8	77,5	74,8	69,1	90,4
		53,8	67,4	82,8	88,4	81,9	78,9	77,4	74,7	69,0	90,4
Измерение 11	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	56,0	68,0	82,6	88,6	82,0	79,1	77,0	74,0	67,3	90,5
		57,0	67,4	83,0	87,8	81,4	79,0	76,8	74,0	67,0	90,1
		56,8	66,9	82,7	88,1	81,3	78,8	76,7	74,0	67,0	90,1
Измерение 12	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	60,0	70,1	88,7	91,6	77,3	80,0	75,8	73,2	70,3	93,6
		57,8	70,2	88,4	91,4	77,2	79,7	75,6	73,5	69,4	93,4
		57,6	69,8	88,1	91,4	77,2	79,7	75,5	73,9	68,8	93,2
Измерение 13	Свободное поле	54,8	69,5	91,5	98,2	92,6	86,0	93,7	92,1	82,7	101,2
		54,2	68,9	91,1	97,9	92,3	85,6	93,3	91,9	82,9	100,9
		53,5	68,6	91,1	97,9	92,0	85,5	93,3	91,9	83,1	100,9
Измерение 14	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ	54,6	67,5	84,6	83,9	81,4	76,6	71,2	71,0	64,4	88,9
		56,8	67,9	84,4	83,6	81,1	76,1	71,4	71,4	65,4	88,7
		56,1	67,5	84,8	83,6	81,1	76,2	71,6	71,4	65,5	88,8
Измерение 15	АЭ 2м x 2м Г-образный АЭ	55,6	66,7	80,8	79,2	80,2	75,3	71,6	70,5	62,9	85,9
		57,2	69,6	80,3	78,6	79,8	75,1	71,3	70,5	63,1	85,5
		56,7	66,7	80,4	78,9	79,8	75,1	71,4	70,6	62,9	85,6
Измерение 16	АЭ 2м x 2м П-образный АЭ	56,2	64,8	79,2	83,5	76,8	74,5	74,6	71,2	64,3	86,1
		56,1	64,4	78,7	83,4	76,6	74,4	74,3	71,1	64,5	85,8
		57,1	64,9	78,7	83,1	76,8	74,4	74,5	71,1	64,6	85,7
Измерение 17	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ	58,2	65,0	76,6	82,2	77,2	76,0	75,8	72,5	65,5	85,3
		58,5	65,2	76,7	82,2	76,8	75,7	75,6	72,4	65,5	85,3
		58,9	64,8	76,5	81,9	76,9	75,6	75,7	72,3	65,2	85,1

Продолжение таблицы 3

Измерение 18	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	53,1	63,4	76,0	82,0	77,2	75,2	74,1	70,6	63,3	84,8
		54,9	63,3	75,8	81,9	77,2	75,3	73,9	70,6	63,3	84,7
		54,9	63,8	76,1	81,7	77,1	75,2	73,8	70,5	63,3	84,6
Измерение 19	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	54,5	67,4	84,5	83,3	81,2	74,3	73,3	72,2	65,8	88,6
		54,4	67,1	84,0	82,7	80,9	73,7	72,5	71,7	65,5	88,1
		53,8	67,1	83,8	82,8	80,7	73,8	72,7	71,7	65,5	88,0
Измерение 20	Свободное поле	53,2	68,7	90,6	97,1	91,0	86,8	92,2	87,6	83,1	99,8
		54,3	68,5	90,3	96,9	90,8	86,7	92,0	87,4	83,2	99,6
		58,4	68,9	90,3	96,8	90,8	86,6	92,0	87,3	83,2	99,6

Таблица 4 – Данные испытаний опытных АЭ в свободном звуковом поле. Микрофон №4

№ измерения	Тип измерения	Микрофон №4									УЗ, дБА	
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
		31,5	63,0	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Измерение 1	АЭ 1м x 1м П-образный АЭ	54,6	69,4	89,2	93,3	82,5	78,7	75,5	70,5	65,5	87,3	
		56,9	69,0	89,1	93,3	82,3	78,5	75,3	70,5	65,8	87,2	
		54,8	68,9	89,3	93,4	82,5	78,6	75,4	70,5	65,9	87,3	
Измерение 2	АЭ 1м x 1м Г-образный АЭ	55,8	69,0	90,1	93,8	83,0	75,6	73,2	69,4	65,3	87,3	
		55,3	68,5	90,3	93,9	83,2	75,6	73,1	69,5	65,1	87,4	
		56,4	68,3	90,1	93,8	82,9	75,5	73,1	69,4	65,4	87,2	
Измерение 3	АЭ 1м x 1м Прямой АЭ	55,5	68,5	91,6	95,5	86,7	77,4	72,8	69,5	64,3	89,2	
		54,2	68,6	91,3	95,3	86,6	77,2	72,5	69,5	64,3	89,1	
		53,0	67,9	91,7	95,3	86,3	76,9	72,4	69,5	64,4	89,0	
Измерение 4	Свободное поле	52,4	67,7	90,2	97,2	92,4	86,8	84,6	86,3	80,6	94,9	
		51,4	68,3	89,0	96,8	91,9	86,3	84,7	86,2	81,0	94,5	
		53,8	67,4	89,5	96,7	91,9	86,4	84,5	86,3	81,0	94,6	
Измерение 5	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ	55,0	68,9	88,5	92,5	80,6	73,0	72,5	70,4	64,3	85,8	
		53,4	68,2	88,1	92,4	80,2	72,7	72,6	70,6	64,7	85,6	
		53,0	68,5	87,7	92,0	80,1	72,4	72,7	70,4	64,7	85,3	
Измерение 6	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ (внешняя)	54,0	68,8	88,3	92,1	80,0	74,3	73,0	68,9	62,4	85,5	
		55,4	68,6	87,8	91,9	79,8	74,2	72,7	69,2	62,5	85,3	
		55,6	68,4	87,8	91,7	79,4	73,8	72,1	68,6	63,3	85,0	
Измерение 7	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ	52,9	67,6	87,4	90,5	76,8	75,7	76,3	71,1	69,3	84,9	
		54,5	67,2	86,8	90,5	76,5	75,8	76,1	71,3	69,9	84,8	
		56,0	67,9	87,0	90,5	76,8	75,4	76,1	71,8	70,1	84,9	

Продолжение таблицы 4

Измерение 8	АЭ 1,5м x 1,5м Г-образный АЭ	54,1	68,1	85,4	88,0	74,7	76,4	77,1	71,9	69,2	83,9
		55,4	67,9	85,6	88,2	74,4	76,2	76,9	72,0	69,1	83,9
		55,2	68,3	85,5	88,4	74,6	76,3	76,8	72,1	68,9	84,0
Измерение 9	АЭ 1,5м x 1,5м П-образный АЭ	53,2	67,3	84,1	87,2	77,7	79,1	77,2	72,2	68,4	84,5
		51,9	67,4	84,3	87,2	77,5	78,8	77,0	72,1	68,4	84,4
		51,2	67,0	83,7	87,1	77,3	78,9	77,0	71,9	68,6	84,3
Измерение 10	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ	54,8	66,4	84,2	86,5	78,1	78,6	75,7	71,2	67,6	83,8
		54,5	66,3	83,8	86,4	78,2	78,3	75,4	71,2	67,6	83,7
		52,9	66,2	83,5	86,4	78,1	78,2	75,5	71,3	67,7	83,6
Измерение 11	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	56,0	66,7	83,3	86,1	77,8	78,1	74,4	70,6	66,0	83,2
		56,5	66,2	83,7	86,1	77,6	77,8	74,3	70,6	65,9	83,1
		55,7	65,9	83,5	86,0	77,5	77,7	74,3	70,6	65,9	83,0
Измерение 12	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	59,9	69,1	86,6	90,3	76,6	76,5	75,5	71,8	68,4	84,7
		57,6	69,3	86,4	90,0	76,6	76,0	74,9	72,1	68,7	84,4
		56,9	68,8	86,3	90,1	76,5	76,0	74,6	72,1	70,2	84,4
Измерение 13	Свободное поле	54,5	67,6	89,9	96,6	91,1	84,1	90,1	87,5	80,9	95,7
		53,5	67,1	89,5	96,4	91,0	83,8	89,9	87,4	80,9	95,5
		52,9	66,6	89,6	96,4	90,7	83,8	89,9	87,4	81,0	95,4
Измерение 14	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ	54,4	66,3	84,0	84,3	79,8	74,3	70,3	69,2	66,3	81,6
		56,6	67,3	83,9	84,0	79,5	74,1	70,1	68,2	66,5	81,3
		55,6	66,6	84,3	84,1	79,6	74,1	70,4	67,8	66,9	81,4
Измерение 15	АЭ 2м x 2м Г-образный АЭ	55,1	66,3	82,2	82,0	77,6	75,2	70,4	68,1	64,7	80,5
		57,0	68,1	81,5	81,3	77,3	75,1	70,3	67,8	64,8	80,2
		55,9	65,8	82,0	81,7	77,4	75,0	70,5	67,8	64,7	80,3

Продолжение таблицы 4

Измерение 16	АЭ 2м x 2м П-образный АЭ	56,6	63,5	80,6	83,7	74,9	76,2	73,3	67,3	64,6	81,1
		55,3	64,1	80,3	83,7	74,7	76,0	73,5	67,2	64,4	81,0
		56,6	64,2	80,5	83,5	74,8	75,9	73,1	67,2	64,4	80,9
Измерение 17	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ	57,9	64,2	79,1	80,1	74,0	76,4	73,3	68,1	64,4	80,4
		57,8	64,2	79,1	80,4	73,7	76,2	73,0	68,0	64,3	80,3
		58,6	64,1	78,9	80,3	73,8	76,2	73,1	68,0	64,5	80,3
Измерение 18	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	52,7	63,0	78,4	79,6	74,4	76,0	72,8	66,5	62,4	80,0
		54,4	62,9	78,2	79,2	74,1	75,9	72,6	66,4	62,7	79,8
		54,5	63,6	78,3	79,4	74,3	75,8	72,6	66,0	62,5	79,8
Измерение 19	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	52,8	66,6	83,8	83,7	79,6	73,2	71,6	69,2	65,8	81,3
		54,5	66,2	83,6	83,3	79,4	72,6	70,9	69,5	65,4	80,9
		54,9	66,2	83,2	83,2	79,0	72,7	71,0	69,4	65,4	80,8
Измерение 20	Свободное поле	54,1	67,0	89,2	95,5	89,5	83,1	91,8	92,0	80,7	97,2
		55,1	67,2	88,9	95,4	89,2	83,0	91,7	92,1	80,7	97,1
		58,8	67,2	88,9	95,3	89,3	82,8	91,5	92,3	80,6	97,1

Таблица 5 – Данные испытаний опытных АЭ в свободном звуковом поле. Микрофон №5

№ измерения	Тип измерения	Микрофон №5									УЗ, дБА	
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
		31,5	63,0	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Измерение 1	АЭ 1м x 1м П-образный АЭ	54,8	68,1	88,7	93,1	82,8	77,7	73,3	68,4	69,6	86,9	
		56,9	67,7	88,6	93,1	82,6	77,6	73,2	68,1	69,5	86,9	
		55,0	67,7	88,8	93,2	82,8	77,7	73,3	68,5	69,9	87,0	
Измерение 2	АЭ 1м x 1м Г-образный АЭ	55,9	67,9	89,3	93,5	83,7	77,2	72,2	69,0	68,1	87,2	
		55,4	67,4	89,5	93,6	84,0	77,2	72,2	69,1	68,1	87,4	
		56,4	67,1	89,3	93,5	83,8	77,1	72,2	69,1	68,1	87,2	
Измерение 3	АЭ 1м x 1м Прямой АЭ	55,7	67,4	90,8	94,8	86,1	78,0	72,1	70,8	65,4	88,7	
		54,5	67,5	90,5	94,6	86,0	77,8	72,0	70,8	65,5	88,5	
		53,2	66,9	90,9	94,6	85,6	77,5	71,9	70,6	65,4	88,4	
Измерение 4	Свободное поле	52,5	66,5	89,0	96,1	91,6	86,2	82,6	83,0	81,1	93,6	
		51,1	67,2	87,9	95,7	91,1	85,7	82,7	83,0	81,9	93,3	
		53,8	66,2	88,4	95,5	91,1	85,9	82,6	82,9	81,6	93,2	
Измерение 5	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ	55,1	67,7	88,3	92,3	82,1	74,4	71,0	67,9	62,6	85,8	
		53,5	67,0	87,8	92,1	81,8	74,3	71,0	68,1	63,2	85,6	
		53,0	67,3	87,5	91,7	81,7	74,1	71,0	68,1	63,2	85,3	
Измерение 6	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Полностью внешняя)	54,1	67,7	88,1	92,0	81,7	73,7	70,6	65,2	61,5	85,4	
		55,7	67,4	87,7	91,9	81,5	73,2	70,6	65,5	61,9	85,2	
		55,8	67,3	87,7	91,7	81,1	74,2	69,4	64,9	60,9	85,1	

Продолжение таблицы 5

Измерение 7	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ	53,3	67,0	86,7	89,9	76,6	75,3	77,0	71,3	70,1	84,7
		54,7	66,6	86,1	89,8	76,1	75,2	76,5	71,8	69,8	84,5
		56,1	67,3	86,2	89,9	76,4	75,1	76,4	72,6	69,7	84,6
Измерение 8	АЭ 1,5м x 1,5м Г-образный АЭ	54,3	67,5	85,0	88,1	74,2	74,8	77,9	72,4	64,8	83,9
		55,7	67,4	85,1	88,2	74,2	74,6	77,6	72,1	65,1	83,8
		55,5	67,7	85,0	88,4	74,2	74,6	77,7	72,2	66,0	83,9
Измерение 9	АЭ 1,5м x 1,5м П-образный АЭ	53,3	66,8	84,0	86,8	75,5	76,4	79,3	75,7	66,0	84,7
		52,2	66,9	84,1	86,8	75,3	76,1	79,2	75,7	66,0	84,6
		51,4	66,4	83,5	86,9	75,1	76,1	79,3	75,6	66,0	84,6
Измерение 10	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ	55,0	66,0	84,2	86,8	75,4	76,3	78,5	75,0	65,7	84,3
		54,6	65,9	83,7	86,6	75,4	76,0	78,2	75,0	65,9	84,0
		53,0	65,8	83,5	86,6	75,6	76,0	78,2	74,9	65,8	84,1
Измерение 11	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ общивкой (Лицевая сторона)	56,2	66,5	83,2	86,2	75,3	75,7	77,5	74,1	65,6	83,5
		56,7	66,0	83,7	86,3	75,1	75,5	77,4	74,0	65,8	83,5
		56,0	65,7	83,5	86,2	74,9	75,4	77,2	73,8	65,8	83,3
Измерение 12	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ с ЗПМ общивкой (Лицевая сторона)	60,0	68,8	85,9	89,9	76,8	75,3	75,8	71,1	68,4	84,3
		58,1	69,1	85,7	89,6	76,8	74,9	75,2	71,9	68,2	84,1
		57,3	68,4	85,6	89,7	76,7	75,0	75,3	71,9	67,7	84,1
Измерение 13	Свободное поле	54,9	66,9	89,1	96,0	90,7	83,9	87,3	87,1	80,0	94,5
		53,8	66,4	88,7	95,8	90,6	83,7	87,2	87,0	80,3	94,4
		53,3	65,8	88,8	95,7	90,2	83,6	87,2	87,0	80,3	94,3
Измерение 14	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ	54,9	66,0	83,6	85,1	79,3	71,7	73,4	71,4	66,2	81,9
		57,1	67,2	83,5	84,8	79,1	71,7	73,6	71,3	66,5	81,8
		56,0	66,4	83,8	84,9	79,0	71,6	73,8	71,3	66,9	81,9

Продолжение таблицы 5

Измерение 15	АЭ 2м x 2м Г-образный АЭ	55,3	66,1	82,5	83,4	76,7	73,1	74,0	70,1	63,1	81,0
		57,4	68,1	81,8	82,8	76,4	73,0	73,9	70,1	63,0	80,7
		56,3	65,7	82,3	82,9	76,5	73,0	73,9	70,1	62,8	80,8
Измерение 16	АЭ 2м x 2м П-образный АЭ	56,9	63,6	81,1	83,8	73,6	75,0	73,4	67,7	62,6	80,6
		55,4	64,1	80,9	83,8	73,6	75,0	73,4	67,6	62,9	80,6
		56,9	64,1	81,1	83,6	73,6	74,7	73,3	67,5	62,9	80,5
Измерение 17	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ	58,0	64,3	80,1	80,6	73,5	73,7	73,8	67,5	63,7	79,7
		58,0	64,2	80,2	80,8	73,2	73,5	73,6	67,5	63,4	79,6
		58,7	64,0	80,0	80,7	73,3	73,5	73,7	67,8	63,4	79,6
Измерение 18	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	53,0	63,1	79,5	79,9	73,8	74,2	73,1	66,4	61,2	79,4
		54,6	63,1	79,4	79,4	73,5	74,0	72,8	66,5	61,5	79,1
		54,6	63,8	79,3	79,6	73,5	73,9	72,8	66,5	61,2	79,1
Измерение 19	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	53,0	66,3	83,5	84,6	79,1	72,7	73,1	69,6	64,8	81,6
		54,9	65,9	83,4	84,1	78,9	72,1	72,6	69,6	64,2	81,2
		55,4	66,0	83,1	84,2	78,7	72,1	72,6	69,8	63,7	81,2
Измерение 20	Свободное поле	53,3	66,6	88,7	95,1	88,8	81,9	91,3	88,5	81,1	95,7
		54,4	66,8	88,4	95,0	88,6	82,0	91,3	88,4	80,9	95,7
		59,2	66,6	88,4	94,8	88,7	81,7	91,1	88,4	80,9	95,6

Таблица 6 – Данные испытаний опытных АЭ в свободном звуковом поле. Микрофон 6

№ измерения	Тип измерения	Микрофон №6									УЗ, дБА	
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
		31,5	63,0	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Измерение 1	АЭ 1м x 1м П-образный АЭ	54,7	65,8	86,9	91,9	81,9	78,2	71,2	68,9	59,5	85,9	
		56,8	65,5	86,8	91,8	81,6	78,1	71,2	69,0	60,2	85,8	
		55,1	65,5	87,0	91,9	81,8	78,1	71,2	69,1	59,8	85,9	
Измерение 2	АЭ 1м x 1м Г-образный АЭ	55,8	65,9	87,3	92,1	82,6	78,1	70,9	67,1	63,6	86,2	
		55,2	65,3	87,5	92,3	82,9	78,2	70,9	67,3	63,6	86,3	
		56,3	65,2	87,4	92,1	82,7	78,1	71,0	67,3	63,6	86,2	
Измерение 3	АЭ 1м x 1м Прямой АЭ	55,3	65,3	88,7	93,2	83,9	78,3	70,3	68,1	62,5	87,1	
		54,5	65,4	88,4	93,1	83,9	78,0	70,2	68,2	62,7	87,0	
		53,3	64,8	88,8	93,1	83,5	77,7	70,1	68,1	62,7	86,9	
Измерение 4	Свободное поле	52,2	64,3	86,6	93,9	89,7	85,4	80,6	77,6	77,3	91,5	
		50,2	64,8	85,3	93,6	89,3	84,8	80,8	77,6	78,1	91,2	
		53,7	64,3	86,0	93,4	89,2	85,0	80,5	77,4	77,6	91,1	
Измерение 5	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ	55,1	65,6	86,7	91,2	82,3	75,1	71,0	67,2	61,6	85,2	
		53,5	64,8	86,2	91,0	81,8	75,0	71,2	67,1	62,5	85,0	
		52,7	65,0	85,9	90,6	81,8	74,8	71,0	67,2	62,1	84,7	
Измерение 6	АЭ 1м x 1м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (внешняя)	54,0	65,7	86,7	90,9	82,0	74,5	69,7	64,9	61,6	84,8	
		55,5	65,4	86,2	90,8	81,8	74,1	69,6	65,3	62,1	84,6	
		55,7	65,2	86,3	90,6	81,4	75,0	71,1	64,6	60,2	84,6	
Измерение 7	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ	53,3	65,2	85,0	87,9	75,0	73,1	73,1	70,2	64,8	82,3	
		54,6	64,7	84,4	87,8	74,6	73,1	72,8	70,0	64,4	82,1	
		55,9	65,6	84,5	87,8	74,9	73,0	73,4	70,0	65,2	82,3	

Продолжение таблицы 6

Измерение 8	АЭ 1,5м x 1,5м Г-образный АЭ	54,1	65,8	83,6	86,8	73,8	74,0	72,7	71,7	64,4	81,8
		55,5	65,7	83,8	86,8	73,7	73,8	72,3	71,1	64,2	81,7
		55,1	65,8	83,6	87,1	73,7	73,6	72,2	70,4	63,5	81,7
Измерение 9	АЭ 1,5м x 1,5м П-образный АЭ	52,9	65,0	82,9	85,5	72,1	73,4	75,9	69,5	64,5	81,7
		52,2	65,2	83,0	85,5	71,7	73,1	75,7	69,5	64,2	81,6
		51,0	64,5	82,3	85,4	71,6	73,2	75,7	69,4	64,2	81,5
Измерение 10	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ	54,9	64,4	82,7	85,9	72,4	70,1	73,1	68,4	62,5	80,6
		54,4	64,5	82,3	85,6	72,5	70,0	73,0	68,6	62,6	80,4
		52,7	64,4	81,9	85,7	72,7	70,2	73,0	68,6	62,9	80,4
Измерение 11	АЭ 1,5м x 1,5м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	55,8	65,2	81,8	85,5	72,1	69,1	72,3	67,9	62,4	80,0
		56,4	64,5	82,3	85,5	71,8	69,0	72,2	68,0	62,2	80,0
		55,7	64,3	81,9	85,3	71,6	68,9	72,2	68,0	62,0	79,8
Измерение 12	АЭ 1,5м x 1,5м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	59,2	67,2	84,1	87,8	75,5	73,2	73,5	70,3	66,1	82,4
		58,2	68,2	83,9	87,6	75,4	72,8	73,2	69,7	65,0	82,1
		56,9	67,2	83,8	87,6	75,3	72,7	73,0	69,7	65,3	82,1
Измерение 13	Свободное поле	54,9	65,0	86,7	93,9	89,1	82,6	83,5	85,4	79,3	92,3
		53,9	64,4	86,3	93,7	88,9	82,3	83,4	85,2	79,3	92,2
		53,3	63,8	86,5	93,7	88,6	82,3	83,4	85,3	79,4	92,1
Измерение 14	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ	54,8	64,6	81,2	85,1	78,1	68,7	74,1	70,1	62,3	81,3
		57,0	65,9	81,2	84,8	77,8	69,0	74,0	70,0	62,6	81,1
		55,6	65,0	81,5	85,1	77,9	69,2	74,0	70,1	62,8	81,2
Измерение 15	АЭ 2м x 2м Г-образный АЭ	54,9	65,1	80,9	83,3	77,1	68,4	72,0	67,2	60,0	79,7
		57,2	67,4	80,2	82,9	76,9	67,9	71,9	67,3	59,6	79,4
		56,1	64,5	80,8	83,1	76,9	67,9	72,0	67,5	60,0	79,5

Продолжение таблицы 6

Измерение 16	АЭ 2м x 2м П-образный АЭ	56,7	62,6	79,9	82,7	74,8	67,7	72,4	65,7	59,7	78,8
		55,0	63,2	79,7	82,5	74,7	67,6	72,1	65,6	59,7	78,7
		56,5	63,2	79,7	82,2	74,8	67,6	72,0	66,2	60,0	78,6
Измерение 17	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ	57,4	63,6	79,4	81,2	74,7	67,6	70,8	66,9	60,1	78,0
		57,6	63,8	79,4	81,3	74,3	67,2	70,6	66,8	60,1	77,8
		57,9	63,4	79,2	81,3	74,5	67,3	70,8	66,4	59,3	77,9
Измерение 18	АЭ 2м x 2м Полузамкнутый АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	52,6	62,1	78,8	80,5	74,3	68,6	68,1	64,2	59,0	77,0
		54,2	62,2	78,8	80,4	74,2	68,3	67,9	64,3	58,9	76,8
		53,9	63,0	78,6	80,3	74,2	68,2	68,1	64,6	58,4	76,9
Измерение 19	АЭ 2м x 2м Прямой АЭ с ЗПМ обшивкой (Лицевая сторона)	52,6	64,8	81,5	84,5	77,8	70,0	72,2	69,8	62,7	80,7
		54,7	64,4	81,3	84,4	77,5	69,4	71,3	68,8	62,5	80,2
		55,4	64,5	80,7	84,5	77,2	69,5	71,2	68,9	62,7	80,2
Измерение 20	Свободное поле	53,0	64,7	86,6	93,2	86,9	81,5	85,1	84,9	77,0	91,8
		54,6	65,5	86,3	93,1	86,7	81,6	85,0	84,8	77,2	91,7
		58,4	64,7	86,3	93,0	86,8	81,4	84,8	84,9	77,1	91,7

Приложение Б. Данные испытаний АЭ в опытном помещении

Таблица 1 – Данные испытаний АЭ в опытном помещении. Микрофон 1

№ измерения	Тип измерения	Микрофон 1									УЗ, дБА	
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
		31,5	63,0	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Измерение 1	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	47,9	79	99,7	101,8	93,6	92,8	94,1	91,9	86,2	100,41	
		48,4	78,3	100	102	93,3	92,4	94	91,8	86,1	100,30	
		47,6	78,8	99,4	102	93,3	92,5	94	91,8	86	100,31	
Измерение 2	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	43,8	79,2	96,6	102	93,1	91,7	92,7	90,7	84,9	99,51	
		42,3	78,9	96,4	102	93,2	91,4	92,5	90,7	84,8	99,41	
		41,4	79,1	96,2	101,7	93,2	91,4	92,4	90,7	84,9	99,31	
Измерение 3	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	39,2	79	95,7	101,2	94,4	92,2	92,9	90,5	85,7	99,62	
		38,9	78,3	95,9	100,9	94	92,1	92,6	90,5	85,7	99,40	
		40,1	78	95,8	101,1	94,1	92,1	92,6	90,6	85,8	99,48	
Измерение 4	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	47,4	78,8	99,1	100,3	91,6	90,7	92,1	90	84,8	98,56	
		48	78,7	99,2	100,3	91,4	90,5	92	89,9	84,7	98,46	
		47,8	78,2	99,1	100,2	91,2	90,5	91,9	90,1	84,8	98,43	
Измерение 5	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	45,1	78	95,9	101	91,6	89,1	90,9	89,7	83,6	98,00	
		44,2	78,3	96	100,9	91,7	89	90,7	89,6	83,7	97,91	
		43,8	77,9	95,5	100,7	91,7	89	90,8	89,6	83,7	97,87	
Измерение 6	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	42,3	77,3	95,2	100,6	92,6	90,3	90,7	89,5	83,2	98,09	
		43,4	77,6	95,4	100,7	92,6	90,5	90,7	89,4	83,4	98,14	
		47	77,3	95,7	100,1	92,5	90,5	90,6	89,4	83,3	97,96	
Измерение 7	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,42$	41,5	74,3	87,3	93	86,2	85	85	83,7	79,6	92,01	
		40	74,3	87	92,6	85,9	85	85	83,6	79,4	91,87	
		40,7	74,4	87	92,9	86	84,9	84,9	83,6	79,4	91,89	

Продолжение таблицы 1

Измерение 8	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	44,5	74,7	90,8	95,3	88,3	86,3	87,2	85,7	80,7	93,98
		45,4	74,8	91,1	95,1	87,9	86,3	87,1	85,7	80,7	93,87
		45	74,6	91,2	95,4	88,2	86,1	87	85,6	80,7	93,88
Измерение 9	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	47,9	74,9	95,4	99,4	89,2	87	88,4	86,9	81,9	95,84
		47,9	75,2	95,4	99,4	89	86,7	88,2	86,8	81,9	95,72
		48	74,9	95,4	99,1	88,8	86,8	88,3	86,8	82	95,64
Измерение 10	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	47,3	75,3	95,3	97,2	88,3	86,5	86,7	85,3	79,9	94,31
		47,9	74,3	94,8	97,1	88,1	86,2	86,5	85	79,7	94,09
		48	74,5	94,8	96,9	88,1	86,3	86,4	85	79,7	94,03
Измерение 11	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	45,4	74,4	90,4	93,6	84,7	84,7	84,8	83,2	79,6	91,79
		44,3	74,3	90,5	93,5	84,6	84,6	84,8	83,1	79,4	91,72
		45,8	74,4	90,4	93,3	84,6	84,6	84,8	83,2	79,4	91,69
Измерение 12	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	42	74,9	85,7	91	84	83,1	84,5	82,5	80,3	90,74
		41,7	74,4	85,6	91	83,9	83	84,3	82,4	80,2	90,62
		41,7	74,8	85,3	91,3	83,7	82,8	84,1	82,3	80,2	90,54
Измерение 13	Экран 2,5x 4 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	41,3	73,6	88,3	91,6	84	84	84,2	83	78,4	90,93
		41,3	73,9	88,4	91,8	84	84,1	84,2	82,9	78,5	90,97
		41,4	73,4	88,7	91,7	83,8	83,9	84,2	82,9	78,3	90,89

Таблица 2 – Данные испытаний АЭ в опытном помещении. Микрофон 2

№ измерения	Тип измерения	Микрофон 2									УЗ, дБА	
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
		31.5	63.0	31.5	63.0	31.5	63.0	31.5	63.0	31.5		
Измерение 1	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	45,9	79,5	98,3	102,4	94,4	94	93,7	91,2	86,8	100,61	
		46,1	78,8	98,3	102,3	94,1	93,8	93,4	91,2	86,6	100,43	
		45,5	79,4	97,8	102,6	94,1	93,7	93,5	91,2	86,6	100,49	
Измерение 2	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	42,3	78,8	95,5	102,1	92,8	92,7	93,2	91,6	87,2	100,04	
		40,4	78,4	95,5	101,9	92,7	92,6	93	91,6	87,3	99,91	
		40,3	78,7	95,4	102,1	92,9	92,5	93	91,6	87,3	99,96	
Измерение 3	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	38,6	77,3	95,8	101,2	93,3	94,1	92,8	91,3	86,5	100,03	
		38,4	76,8	96	100,9	93	93,9	92,5	91,2	86,4	99,80	
		39,5	76,6	95,9	101,3	92,8	93,9	92,5	91,2	86,6	99,86	
Измерение 4	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	45,2	79,1	96,8	100,1	92,1	90,8	91,4	89,3	85,2	98,23	
		44,8	78,9	97,2	100,3	91,9	90,7	91,3	89,2	85,4	98,21	
		45,5	78,4	96,9	100	91,7	90,6	91,3	89,3	85,4	98,11	
Измерение 5	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	42,5	77,6	94,9	100,8	90,8	90,4	91,2	89,2	84,8	98,08	
		42	77,8	95,2	100,8	91	90,3	90,9	89	84,8	97,97	
		41,8	77,4	94,6	100,6	91	90,3	91	89	84,8	97,94	
Измерение 6	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	41	76,4	95,5	100,4	92,1	90,9	91,3	89,4	85,1	98,28	
		41,6	76,8	95,6	100,6	92	91	91,2	89,4	85,2	98,31	
		45,2	76,3	96	100,2	92	91,1	91,2	89,4	85,2	98,25	
Измерение 7	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,42$	41,4	73,2	88,3	92,1	86,1	86	85,3	84,3	80,8	92,34	
		40,4	73,1	87,8	91,8	86	86,2	85,3	84,1	80,7	92,29	
		40,4	73,2	88	92,2	86	86	85,1	84,1	80,8	92,24	

Продолжение таблицы 2

Измерение 8	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	43,7	73,9	89,5	95,2	87,4	87,3	86,6	85,6	81,6	93,89
		44,5	74,2	89,6	94,9	87,2	87	86,5	85,4	81,6	93,69
		44,2	74,1	90,1	95,3	87,2	86,9	86,5	85,3	81,5	93,73
Измерение 9	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	46,5	74,7	92,7	97,9	89,6	88,4	88,1	85,7	82,9	95,44
		46,5	74,8	92,8	98	89,4	88,2	87,9	85,5	82,8	95,32
		46,7	74,5	92,8	97,6	89,2	88,3	87,9	85,4	82,7	95,20
Измерение 10	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	46,1	74,6	93,7	96,1	88,9	87,3	87,1	85,2	80,6	94,33
		46,6	73,6	93,2	96	88,6	86,9	87	85,1	80,7	94,14
		46,8	73,8	93,1	95,7	88,6	87	87	85	80,6	94,08
Измерение 11	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	44,5	73,2	89,2	94,4	85,3	84,6	84,9	84,7	81,3	92,39
		43	73,2	89	94,5	85,3	84,6	84,9	84,7	81,3	92,41
		44,9	73,5	89,1	94,2	85,3	84,7	85	84,6	81,3	92,37
Измерение 12	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	41,4	73,3	86,8	91,5	85	84,7	85,1	82,9	81,1	91,54
		41,2	73	86,7	91,4	84,7	84,4	84,7	82,7	80,9	91,26
		42	73,2	86,4	91,7	84,6	84,4	84,7	82,6	80,9	91,28
Измерение 13	Экран 2,5x 4 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	42,6	72	87,3	90,9	85	85,4	84,5	83,4	80,7	91,52
		42,2	72,4	87,3	91,2	84,8	85,3	84,5	83,2	80,8	91,48
		42,3	71,8	87,8	91,2	84,7	85,2	84,4	83,1	80,8	91,41

Таблица 3 – Данные испытаний АЭ в опытном помещении. Микрофон 3

№ измерения	Тип измерения	Микрофон 3									УЗ, дБА	
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
		31.5	63.0	31.5	63.0	31.5	63.0	31.5	63.0	31.5		
Измерение 1	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	49,6	80,3	95	101,1	92,9	92,9	93,1	91,7	86,5	99,84	
		48,9	79,7	95,3	101,2	92,6	92,5	92,9	91,6	86,3	99,67	
		47,4	80,1	95	101,4	92,6	92,6	92,9	91,7	86,3	99,75	
Измерение 2	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	46,4	78,3	92,4	100,4	92,4	92,8	93,3	91,7	87,8	99,75	
		42,9	77,9	92,3	100,3	92,4	92,7	93,1	91,7	87,8	99,65	
		42,1	78,1	92,3	100,2	92,5	92,6	92,9	91,8	87,7	99,59	
Измерение 3	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	42,4	75,6	93,3	99,8	92,3	92,9	92,3	91,1	86,5	99,21	
		41,7	75,2	93,7	99,9	92,1	92,6	92	91,1	86,6	99,07	
		42,8	75,1	93,4	100,2	92,1	92,6	92	91,1	86,6	99,12	
Измерение 4	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	46	79,7	94,9	99,4	91,1	91,4	90,9	91	85,1	98,28	
		46,7	79,6	95,2	99,5	91	91,3	90,9	90,9	85,1	98,25	
		46,8	79,4	94,9	99,4	90,8	91,3	90,9	91	85,2	98,24	
Измерение 5	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	47,5	77,1	91,7	98,4	89,9	91	91	89,1	84,7	97,51	
		44,3	77,3	91,8	98,4	90	90,8	90,8	88,9	84,7	97,38	
		44,4	77,2	91,4	98,2	89,7	90,9	90,8	88,9	84,7	97,34	
Измерение 6	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	44,7	75,2	93,8	98,6	91	89,6	90,9	89,1	85,5	97,40	
		45,1	75,6	93,9	98,2	90,8	89,7	90,9	89,1	85,5	97,33	
		47,5	74,9	94,2	98,4	90,7	89,7	90,9	89,1	85,3	97,34	
Измерение 7	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,42$	43,9	71,2	88,8	93	86	85,6	86,4	83,3	81,4	92,55	
		43,8	70,8	88,5	92,6	85,8	85,6	86,4	83,2	81,5	92,46	
		42,7	71,1	88,5	92,9	85,8	85,6	86,3	83,3	81,6	92,49	

Продолжение таблицы 3

Измерение 8	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	44,6	72,8	87,6	93,9	85,7	86,4	85,9	83,3	83	92,80
		47	73,2	87,6	93,5	85,4	86,1	85,8	83,2	83	92,59
		45,1	73,3	87,9	93,9	85,5	86,1	85,7	83,1	83	92,63
Измерение 9	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	46,5	74,7	90,9	95,9	89,2	87,5	87,2	85,4	83,2	94,50
		46,3	74,6	90,8	96	89,1	87,2	86,9	85,3	83,1	94,35
		46,5	74,3	91	95,7	88,8	87,2	87	85,2	83,1	94,26
Измерение 10	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	46	73,8	91	94,2	86,8	85,3	85,6	85,7	81,5	93,05
		46,5	72,9	90,4	94,1	86,5	85	85,4	85,5	81,3	92,83
		46,6	73,3	90,5	93,9	86,4	85	85,4	85,5	81,2	92,78
Измерение 11	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	45,1	71,8	87,1	92,3	82,5	85,4	84,1	83,3	81,2	91,43
		44,5	71,7	87,2	92,5	82,5	85,5	84	83,3	81,2	91,46
		45,3	72,2	87,2	92,1	82,4	85,4	84,1	83,2	81,2	91,37
Измерение 12	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	43,5	70,5	88,2	87,8	84,8	83	83,6	83,5	81,2	90,53
		43,8	70,6	87,9	87,5	84,6	82,8	83,3	83,4	81,1	90,33
		45,5	70,5	87,6	87,7	84,5	82,6	83,4	83,4	81,2	90,33
Измерение 13	Экран 2,5x 4 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	44,4	69,4	86,4	91,2	83,8	85,2	85,8	82,7	81,4	91,71
		43,7	69,8	86,4	91,5	83,6	85	85,7	82,6	81,5	91,64
		43,7	69,3	87	91,5	83,6	85	85,7	82,7	81,6	91,67

Таблица 4 – Данные испытаний АЭ в опытном помещении. Микрофон 4

№ измерения	Тип измерения	Микрофон 4									УЗ, дБА	
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
		31.5	63.0	31.5	63.0	31.5	63.0	31.5	63.0	31.5		
Измерение 1	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	56,7	81,5	95,4	98,2	91,2	91,7	92,2	90,2	84,9	98,4	
		57,2	81,4	94,8	98,3	91,0	91,5	92,1	90,1	84,7	98,2	
		55,2	80,7	94,6	98,2	91,0	91,5	92,1	90,2	84,9	98,3	
Измерение 2	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	54,9	80,4	93,3	100,7	93,3	91,3	92,6	90,1	84,4	99,0	
		51,0	80,2	93,2	100,5	93,1	91,0	92,7	90,2	84,4	98,9	
		49,9	80,5	93,4	100,7	93,4	91,1	92,5	90,2	84,5	98,9	
Измерение 3	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	51,3	79,9	93,6	98,7	92,7	91,9	92,9	90,3	84,5	98,8	
		50,1	78,6	93,2	98,7	92,4	91,8	92,9	90,3	84,5	98,8	
		50,8	78,8	93,4	98,9	92,3	91,7	92,7	90,2	84,7	98,7	
Измерение 4	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	54,6	80,4	92,1	94,3	89,1	89,9	90,9	88,6	84,1	96,5	
		53,7	80,8	92,5	94,5	88,9	89,9	90,8	88,6	84,0	96,5	
		53,8	80,6	92,2	94,4	88,9	89,9	90,8	88,6	84,2	96,5	
Измерение 5	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	56,4	78,9	91,9	98,5	89,4	90,0	91,0	88,5	84,0	97,1	
		51,8	79,3	92,1	98,4	89,4	89,9	90,9	88,4	84,1	97,1	
		52,4	79,5	91,8	98,4	89,3	90,0	90,9	88,4	84,0	97,1	
Измерение 6	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	54,6	78,3	93,1	98,6	90,9	88,5	90,3	88,1	83,6	96,8	
		54,1	78,6	93,4	98,6	90,9	88,6	90,3	88,1	83,5	96,8	
		55,8	78,0	93,7	98,6	90,7	88,5	90,3	88,1	83,6	96,7	
Измерение 7	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,42$	51,0	74,4	91,9	95,3	84,3	83,8	84,0	82,2	80,7	91,8	
		51,5	74,8	91,6	94,8	84,2	83,8	83,9	82,1	81,0	91,6	
		49,9	74,2	91,6	95,1	84,1	83,7	83,9	82,1	81,0	91,7	

Продолжение таблицы 4

Измерение 8	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	50,7	75,1	90,8	94,7	85,4	85,4	84,6	85,3	81,2	92,7
		52,7	75,4	90,9	95,0	85,1	85,3	84,4	85,3	80,8	92,7
		52,0	75,0	91,2	94,6	85,3	85,3	84,5	85,3	80,8	92,6
Измерение 9	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	51,4	76,3	90,0	94,1	86,8	86,3	84,9	86,4	80,0	93,2
		51,1	76,5	90,0	93,9	86,7	86,0	84,6	86,4	79,9	93,0
		50,7	76,0	90,1	93,9	86,5	86,1	84,7	86,4	79,9	93,0
Измерение 10	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	50,4	75,2	88,9	92,6	84,6	85,0	83,9	84,6	80,4	91,7
		51,1	75,2	88,8	92,6	84,4	84,7	83,8	84,6	80,3	91,7
		50,7	75,0	88,6	92,5	84,4	84,8	83,7	84,7	80,3	91,6
Измерение 11	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	50,4	74,3	90,3	92,4	83,7	83,2	82,9	84,0	79,1	90,9
		51,9	73,7	90,6	92,5	83,7	83,3	82,9	83,9	79,0	90,9
		50,7	74,3	90,6	92,5	83,6	83,2	82,9	84,0	79,0	90,9
Измерение 12	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	50,7	72,8	90,8	91,9	81,9	80,5	82,7	80,0	78,3	89,3
		51,4	73,5	90,6	92,0	81,8	80,3	82,5	79,8	78,3	89,2
		53,0	73,1	90,3	92,1	81,7	80,3	82,4	79,8	78,6	89,2
Измерение 13	Экран 2,5x 4 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	51,3	74,8	82,2	93,3	83,6	81,8	83,3	81,1	76,1	90,2
		51,6	74,2	82,7	93,4	83,3	81,8	83,3	80,9	76,3	90,1
		51,3	74,1	82,9	93,5	83,3	81,7	83,4	80,9	76,3	90,2

Таблица 5 – Данные испытаний АЭ в опытном помещении. Микрофон 5

№ измерения	Тип измерения	Микрофон 5									УЗ, дБА	
		Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
		31.5	63.0	31.5	63.0	31.5	63.0	31.5	63.0	31.5		
Измерение 1	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	56,68	81,45	95,37	98,2	91,16	91,66	92,24	90,18	84,86	98,35	
		57,21	81,37	94,8	98,27	91	91,48	92,09	90,14	84,67	98,24	
		55,21	80,69	94,62	98,17	91,03	91,48	92,14	90,16	84,9	98,26	
Измерение 2	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	54,9	80,38	93,3	100,74	93,34	91,29	92,63	90,14	84,44	99,03	
		50,96	80,17	93,21	100,54	93,11	91	92,66	90,2	84,43	98,93	
		49,92	80,53	93,35	100,7	93,36	91,09	92,47	90,15	84,5	98,95	
Измерение 3	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	51,3	79,85	93,56	98,72	92,72	91,89	92,86	90,26	84,46	98,82	
		50,1	78,55	93,15	98,71	92,43	91,82	92,86	90,33	84,49	98,78	
		50,84	78,75	93,44	98,91	92,25	91,72	92,66	90,21	84,69	98,69	
Измерение 4	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	54,57	80,39	92,08	94,31	89,06	89,93	90,87	88,59	84,14	96,54	
		53,67	80,77	92,46	94,49	88,9	89,87	90,79	88,55	84,04	96,49	
		53,81	80,61	92,15	94,39	88,91	89,86	90,84	88,57	84,16	96,50	
Измерение 5	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	56,38	78,91	91,93	98,54	89,41	89,96	91,02	88,49	83,98	97,15	
		51,84	79,3	92,14	98,38	89,44	89,91	90,85	88,44	84,1	97,05	
		52,35	79,45	91,78	98,43	89,3	89,98	90,88	88,44	84,02	97,07	
Измерение 6	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,33$	54,61	78,29	93,13	98,58	90,85	88,53	90,3	88,14	83,56	96,77	
		54,07	78,55	93,43	98,55	90,86	88,55	90,34	88,13	83,54	96,78	
		55,81	77,96	93,65	98,57	90,73	88,54	90,29	88,06	83,57	96,74	
Измерение 7	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,42$	50,95	74,44	91,85	95,34	84,28	83,82	84	82,18	80,71	91,79	
		51,52	74,79	91,62	94,8	84,16	83,77	83,93	82,14	80,98	91,60	
		49,9	74,22	91,64	95,05	84,11	83,67	83,94	82,13	80,95	91,65	

Продолжение таблицы 5

Измерение 8	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	50,66	75,11	90,82	94,74	85,43	85,39	84,6	85,34	81,16	92,71
		52,66	75,35	90,94	95,02	85,1	85,29	84,39	85,34	80,83	92,67
		52,03	75,02	91,18	94,57	85,27	85,26	84,49	85,29	80,75	92,58
Измерение 9	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	51,4	76,25	90	94,13	86,77	86,27	84,85	86,42	80,04	93,15
		51,08	76,47	90,02	93,94	86,7	85,98	84,58	86,39	79,93	92,99
		50,67	76,01	90,11	93,88	86,47	86,07	84,71	86,39	79,86	92,99
Измерение 10	Экран 1x1 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	50,41	75,15	88,87	92,63	84,64	84,98	83,86	84,55	80,36	91,73
		51,09	75,22	88,79	92,55	84,43	84,73	83,84	84,64	80,29	91,66
		50,73	75,04	88,59	92,49	84,4	84,77	83,67	84,68	80,27	91,63
Измерение 11	Экран 1,5x1,5 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	50,42	74,28	90,32	92,39	83,74	83,22	82,86	83,95	79,07	90,86
		51,91	73,72	90,55	92,49	83,7	83,29	82,86	83,92	79,01	90,88
		50,71	74,32	90,59	92,47	83,57	83,22	82,89	83,97	78,95	90,87
Измерение 12	Экран 2x2 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,5$	50,72	72,84	90,84	91,93	81,91	80,46	82,72	79,96	78,3	89,32
		51,39	73,48	90,59	92	81,78	80,34	82,5	79,75	78,32	89,21
		53,04	73,14	90,25	92,09	81,71	80,25	82,43	79,83	78,56	89,21
Измерение 13	Экран 2,5x 4 м, $\bar{\alpha}_{\text{ном}}^{1000} = 0,42$	51,27	74,81	82,15	93,34	83,59	81,81	83,28	81,08	76,12	90,16
		51,63	74,19	82,67	93,41	83,33	81,8	83,3	80,91	76,34	90,14
		51,33	74,1	82,9	93,47	83,29	81,72	83,35	80,91	76,29	90,15

Приложение В. Акты внедрения



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 Кондратьева Сергея Алексеевича, старшего преподавателя кафедры «Экология и производственная безопасность» ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», внедрены и используются в учебном процессе для обучения студентов по направлению подготовки бакалавриата 20.03.01 «Техносферная безопасность».

Результаты исследований Кондратьева С.А. легли в основу ряда разделов лекций, а также нашли применение в практических работах по дисциплинам «Основы вибраакустики» и «Разработка шумовиброзащитных мероприятий».

Проректор по образовательной деятельности

А.В. Суслин

Начальник учебного управления

М.В. Прудникова

И.о. заведующего кафедрой Е5
«Экология и производственная
безопасность»

А.Ю. Олейников

Ст. преподаватель кафедры Е5
«Экология и производственная
безопасность»

С.А. Кондратьев

«УТВЕРЖДАЮ»



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «ОмегаТех»

В.С. Кирилкин

«10» декабря 2025 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Комиссия в составе представителей ООО «ОмегаТех» и БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова составила настоящий акт о том, что полученные материалы диссертационного исследования соискателя ученой степени кандидата технических наук Кондратьева Сергея Алексеевича, использованы при проведении мероприятий для снижения шума на рабочем месте слесаря механосборочных работ.

Использование результатов диссертационного исследования Кондратьева С.А. позволило определить ключевые акустические характеристики помещения (цех металлообработки), согласно выведенным в работе формулам разработать и установить технические средства (акустический экран, звукоглощающие панели) и тем самым снизить шум на рабочем месте слесаря механосборочных работ до нормы.

Представители ООО «ОмегаТех»:

Заместитель генерального директора –
технический директор

А.А. Пимкин

Заместитель генерального директора
по коммерческим вопросам

Ф.А. Никоноров

Представители БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова:

Д.т.н., доц., профессор кафедры Е5
«Техносферная безопасность и
вычислительная механика»
Ст. преподаватель кафедры Е5
«Техносферная безопасность и
вычислительная механика»

Н.В. Тюрина

С.А. Кондратьев