



На правах рукописи

КОНДРАТЬЕВ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

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

Специальность 1.3.7 – Акустика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», на кафедре «Техносферная безопасность и вычислительная механика»

**Научный
руководитель:**

Тюрина Наталья Васильевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Техносферная безопасность и вычислительная механика» ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург

**Официальные
оппоненты:**

Элькин Юрий Иосифович – доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерно-экологические инновации и комплексная безопасность» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва

Светлов Валерий Валериевич – кандидат технических наук, начальник проектного отдела ООО «Центр экологической безопасности гражданской авиации», г. Москва

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва

Защита состоится «16» апреля 2026 г. в ___:00 на заседании диссертационного совета 24.2.272.02 в ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» и на сайте <https://voenmeh.ru/nauka/dissertacionnye-sovety/dissertacionnyj-sovet-24-2-272-02/>.

Автореферат разослан __.02.2026 г. Отзывы на автореферат направлять по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1, кафедра Е5 «Техносферная безопасность и вычислительная механика», e-mail: dissovetvoenmeh@yandex.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.272.02



В.К. Васильева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 значительный 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 диапазоне, 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. Заборов, 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. Арена, С. Редферн и другие. Выполненные ими работы представляют значительную 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 в помещениях 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 апробации разработанных решений в условиях производства.

Научная новизна исследования

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 и получена зависимость эффективности АЭ от акустических характеристик помещения, а также от формы 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. Получены данные о влиянии расположения АЭ в производственных помещениях и параметров АЭ (размеров, наличия звукопоглощающего материала) на акустическую эффективность АЭ, что позволяет проектировать АЭ в помещениях с улучшенными характеристиками снижения шума.

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

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

Основные положения, выносимые на защиту:

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

6. Установленные экспериментально 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 IX и X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от шума и вибрации», г. Санкт-Петербург, 26-28 апреля 2023 и 1-3 октября 2025, IX Всероссийской конференции «Акустика среды обитания», г. Москва, 23-24 мая 2024, III Петербургском научно-техническом форуме оборонных технологий «ВОЕНТЕХ», г. Санкт-Петербург, 4-5 марта 2025, III Международной научно-практической конференции «Молодежь. Техника. Космос», г. Байконур, 21-29 ноября 2025, 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 в цехе металлообработки ООО «ОмегаТех», где был установлен П-образный акустический экран и на потолке размещены штучные (функциональные) звукопоглотители, позволившие обеспечить нормативные уровни шума на рабочем месте

(акт внедрения от 19.12.2025). Отдельные результаты диссертационной работы используются 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» (акт внедрения от 01.09.2025).

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 соответствуют пунктам 6 и 8 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», «8. Акустика помещений, музыкальная акустика, акустика речи».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 108 наименований и трех приложений; изложена на 162 стр. машинописного текста (34 стр. приложений), в том числе, содержит 34 рисунка и 34 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность работы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе выполнен анализ состояния проблемы, дано описание объектов исследования, указаны особенности формирования звуковых полей в замкнутых объемах, рассмотрены методы расчета эффективности акустических экранов. Анализ научной литературы и нормативно-методических

документов показал, что для каждой отрасли требуется отдельное изучение характеристик шума на рабочих местах и в рабочих зонах.

Учитывая, что звуковое поле в помещении формируется прямым и отраженным звуком, а снижение шума акустическим экраном в помещении зависит от характеристик источника шума, взаимного расположения источника, рабочего места и акустического экрана, от объемно-планировочных решений помещения, а также от его акустических свойств, для решения поставленных задач необходимо иметь представительную выборку исходных акустических характеристиках производственных помещений, полученных в натуральных условиях.

Отмечена недостаточная точность оптико-дифракционной и других существующих теорий для расчета акустической эффективности АЭ в помещениях, необходимо, базируясь на положениях статистической и геометрической теории акустики, разработать новый метод расчета АЭ в помещениях и выполнить серию экспериментальных исследований, связанных как с определением точности предложенных расчетов, так и с определением влияния акустических свойств помещений и конструктивных особенностей АЭ на эффективность экранов. Основываясь на идее влияния акустических характеристик помещения и акустических экранов на эффективность АЭ, необходимо получить численные показатели этого влияния. На основании выполненного анализа сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе изложены методики экспериментальных исследований, результаты натурных измерений шума на рабочих местах и в рабочих зонах предприятий бумагопечатного и чеканного производств, а также результаты измерений и расчетов акустических свойств производственных помещений.

Измерения шума проведены на рабочих местах и в рабочих зонах (далее рабочих местах) четырех производственных предприятий в городах Санкт-Петербург, Москва и Пермь. Всего было обследовано 22 производственных цеха, измерения проведены в 435 точках измерений (ТИ).

При анализе было установлено, что уровни звука не превышают норму примерно на 10% рабочих мест и рабочих зон, в 70% зафиксированы превышения шума до 10 дБА, а в 20% - зарегистрированы существенные превышения от 11 до 22 дБА (Рисунок 1). Таким образом, проблема защиты от шума на исследуемых предприятиях является актуальной.

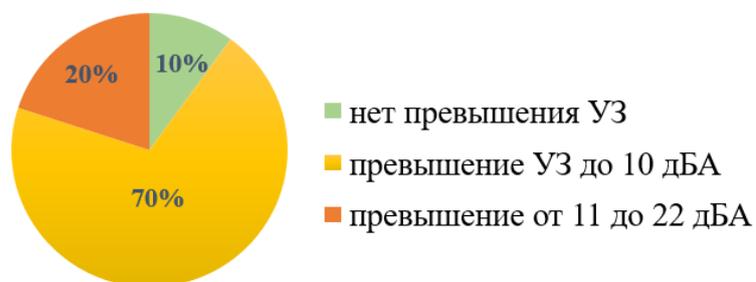


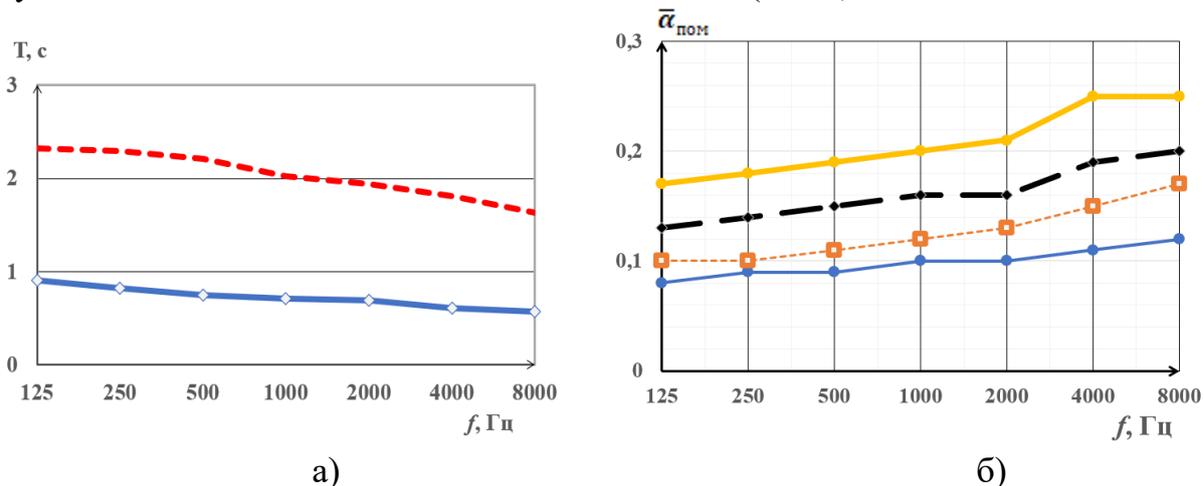
Рисунок 1 — Превышение эквивалентных уровней звука в производственных помещениях предприятий бумагопечатного и чеканного производств

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 частот в диапазоне 125-8000 Гц. Оба параметра имеют частотно-зависимый характер, демонстрируют рост значений при увеличении частоты. Полученные значения времени реверберации и средних коэффициентов звукопоглощения помещений бумагопечатного и чеканного производств представлены на рисунке 2.

Измеренные значения времени реверберации в производственных помещениях в частотном диапазоне 125-8000 Гц составили от 0,8-0,5 до 2,3-1,6 с (Рисунок 2а), вычисленные значения среднего коэффициента звукопоглощения в исследованных производственных помещениях (Рисунок 2б) составили 0,1-0,2 (за исключением небольшого числа спектров).

На основании анализа экспериментально полученных данных для того, чтобы можно было сравнивать производственные помещения друг с другом по акустическим свойствам, в качестве оценочного критерия их акустических свойств предложено использовать значение среднего коэффициента звукопоглощения помещений на частоте 1000 Гц ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$).



а) б)
Рисунок 2 — Значения времени реверберации (а) и средних коэффициентов звукопоглощения (б) помещений бумагопечатного и чеканного производств; а): 1, 2 — минимальное и максимальное время реверберации, соответственно; б): 1-4 — примеры средних коэффициентов звукопоглощения в исследованных помещениях

Экспериментально установлено, что в исследованных производственных помещениях средний коэффициент звукопоглощения на частоте 1000 Гц находится в пределах 0,1-0,2. Звуковое поле при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$ является диффузным и при акустических расчетах поправка, учитывающая нарушение диффузности, принимается равной 0. При увеличении значений $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ вводится поправка, учитывающая нарушение диффузности звукового поля, начиная с $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$.

Опираясь на результаты экспериментальных исследований с учетом характера звукового поля, предложена классификация производственных помещений по их акустическим свойствам (Таблица 1). В зависимости

от значения предложенного критерия и характера звукового поля помещения I класса характеризуются средним коэффициентом звукопоглощения помещения не более 0,2 ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} \leq 0,2$), звуковое поле в помещении - диффузное, помещение гулкое, звукопоглощающая облицовка отсутствует (поправка $10\lg\psi_{\text{пом}} = 0$ дБ). Помещения с акустической обработкой разной степени относятся ко II-IV классам, при этом II класс - $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$, звуковое поле квазидиффузное, 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, 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 реализуемым в производственном помещении звукопоглощением (поправка $10\lg\psi_{\text{пом}} = 3$ дБ).

Таблица 1 — Классификация производственных помещений по их акустическим свойствам

Класс помещения	Характер звукового поля	Поправка $10\lg\psi_{\text{пом}}$, дБ	Значение выбранного критерия $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$	Акустические характеристики помещения
I	Диффузное	0	$\leq 0,2$	Гулкое, не имеет акустической обработки
II	Квазидиффузное	1,5	0,3	Незначительная акустическая обработка
III	Квазидиффузное	2	0,4	Заметная акустическая обработка
IV	Слабодиффузное	3	0,5	Максимально возможная на практике акустическая обработка

Чем меньше средний коэффициент звукопоглощения помещения, тем больше влияние отраженного звука, а тем меньше эффективность АЭ. Улучшение акустических свойств помещений достигается внесением в помещение звукопоглощающих материалов и конструкций. Производственные помещения, имеющие значения выбранного критерия не более 0,2, то есть средний коэффициент звукопоглощения помещения на частоте 1000 Гц, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} \leq 0,2$, характеризуются существенным вкладом отраженного звука на формирование звукового поля в помещении и оказывает критическое значение на эффективность акустических экранов.

В третьей главе выполнен анализ результатов расчетов эффективности АЭ в помещении с использованием оптико-дифракционной теории по формулам ГОСТ 31287-2005 и сделан вывод об их недостаточной точности, представлены разработанные расчетные схемы и математические модели АЭ, описан метод расчета эффективности АЭ, разработанный на основании статистической геометрической теории акустики, представлены основные допущения и границы расчетов, проанализированы результаты расчетов по разработанным формулам в сравнении с экспериментальными данными.

Примером использования оптико-дифракционной теории для расчета АЭ является ГОСТ 31287-2005, в котором приведены расчетные формулы для оценки эффективности АЭ в рабочих помещениях для двух случаев расположения расчетной точки за АЭ: в зоне глубокой акустической тени АЭ (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. Расчеты по формуле ГОСТ 31287-2005 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 формулах ГОСТ 31287-2005.

В таблице 2 приведены результаты расчетов эффективности АЭ размером 2x2 метра по формулам ГОСТ 31287-2005 для условий отсутствия отражений и наличия отражений в помещении в сравнении с экспериментальными данными об эффективности акустического экрана, установленного в помещениях с различными акустическими свойствами (со средним коэффициентом звукопоглощения в диапазоне 0,2-0,5).

Таблица 2 — Данные расчётов эффективности АЭ по ГОСТ 31287-2005 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
$\Delta L_{\text{экp}}^{\text{пр}} = 10 \lg \left(3 + 40 \frac{z}{\lambda} \right)$, дБ	14	16	20	22	25	28	31
$\Delta L_{\text{экp}}^{\text{отp}} = 10 \lg \left(1 + 20 \frac{z}{\lambda} \right)$, дБ	10	13	16	19	22	25	28
$\Delta L_{\text{эксп}}$, дБ, при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$	1,5	2	2	3	5	5,5	4,0
$\Delta L_{\text{эксп}}$, дБ, при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$	2,5	4	5	6,5	8	10,5	11
$\Delta L_{\text{эксп}}$, дБ, при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$	3,5	5,5	8,5	10	13	15	16
$\Delta L_{\text{эксп}}$, дБ, при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$	4,5	8	11	13	17,5	19	20
$\Delta L_{\text{экp}}^{\text{отp}} - \Delta L_{\text{эксп}}$, дБ, при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$	5,5	5	5	6	5	6	8

Как следует из данных, представленных в таблице 2, превышение результатов расчета над экспериментальными данными для максимально облицованного звукопоглощением помещения (средний коэффициент звукопоглощения равен 0,5) составляет 5-8 дБ в диапазоне частот 125-8000 Гц, что неприемлемо для практических целей. Таким образом, сделан вывод, что формулы, основанные на оптико-дифракционной теории, не обеспечивают достаточную точность при расчете эффективности акустических экранов в производственных помещениях.

Для расчета эффективности АЭ в производственных помещениях необходима разработка нового метода, учитывающего не только расположение экрана относительно источника шума и защищаемого объекта, но и влияние на эффективность АЭ акустических свойств производственного помещения, а также формы и других параметров экрана.

Новый метод расчета основан на статистической геометрической теории акустики, с учетом того, что эффективность АЭ в помещении зависит от характеристик звукового поля в помещении, которые определяются взаимным влиянием полей прямого и отраженного звука, при этом доля прямого звука зависит, в основном, от характеристик источника шума, а также взаимного расположения источника, рабочего места и акустического экрана, а доля отраженного звука зависит, в основном, от объемно-планировочных решений помещения и акустических характеристик помещения.

С целью разработки нового метода расчета определены допущения и границы исследования с учетом зон влияния прямого и отраженного звука, а также величины граничного радиуса ($r_{гр}$), которые при наличии одного источника звука в помещении в соответствии с СП 254.1325800.2016 условно показаны на рисунке 3, как I – зона преимущественного действия прямого звука ($r \leq 0,5r_{гр}$), II – зона действия прямого и отраженного звука ($0,5r_{гр} < r < 2r_{гр}$), III – зона действия отраженного звука ($r \geq 2r_{гр}$).

В разработанном методе расчета приняты следующие допущения: помещение соразмерное, в помещении – один точечный источник шума, звуковое поле вблизи АЭ квазидиффузное, интерференционные явления не учитываются, звук дифрагирует к защищаемому объекту через свободное ребро АЭ, являющееся вторичным линейным источником шума (ИШ), отражение учтено с использованием метода мнимых источников, прохождение звука через АЭ не учитывается, АЭ принят звуконепроницаемой конструкцией, звукоизоляция экрана (ЗИэкp) существенно выше, чем его требуемая эффективность ($\Delta L_{экp}$), то есть выполняется условие: ($ЗИ_{экp} \gg \Delta L_{экp}$), звукопоглощение опорной поверхности между ИШ и РТ не учитывается. Метод расчета АЭ разработан 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 вкладом вторичных источников шума. Шум в расчетной точке определяется энергетическим суммированием вкладов от этих источников.

Математические модели АЭ разработаны для двух случаев расположения расчетной точки (РТ) относительно граничного радиуса и соответственно характера звукового поля, показанных на рисунке 3: в области прямого и отраженного звука ($0,5r_{гр} < r < 2r_{гр}$) и в области отраженного звука ($r \geq 2r_{гр}$). Расчетная схема АЭ в зоне действия прямого и отраженного звука приведена на рисунке 4.

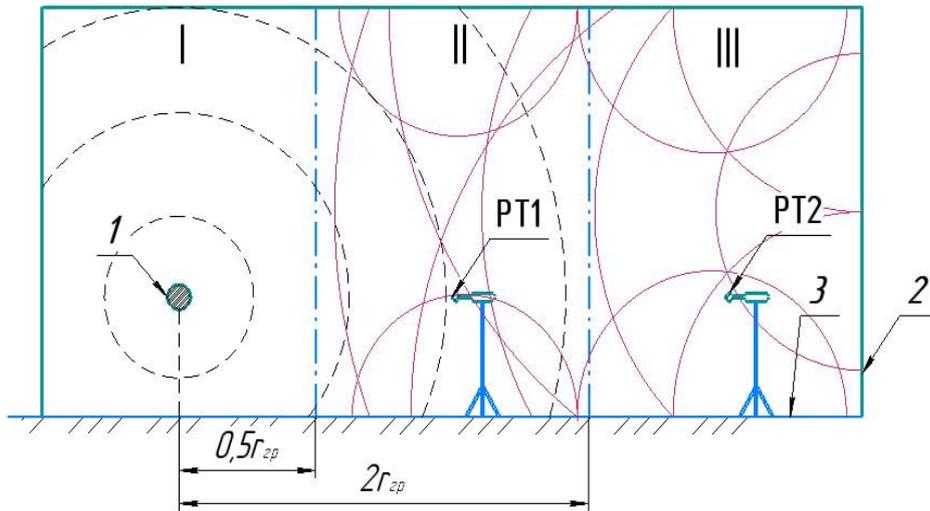


Рисунок 3 — Схема звукового поля в помещении: 1 – ИШ, 2 – помещение, 3 – опорная поверхность, черным пунктиром показано действие прямого звука, излучаемого источником шума, красным условно показан отраженный звук

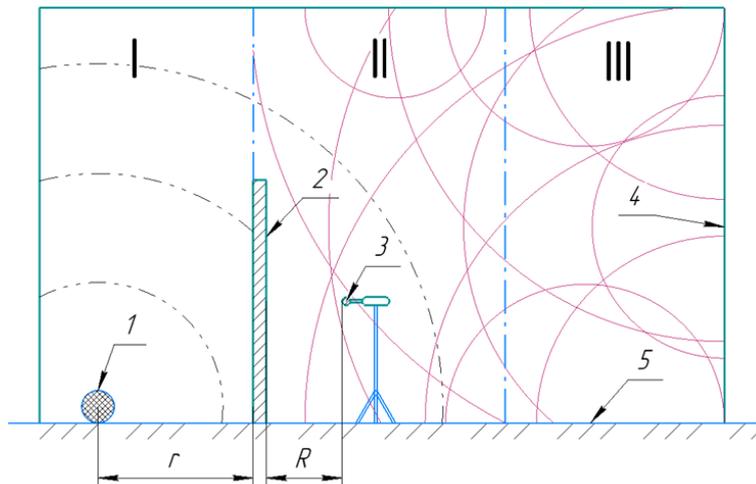


Рисунок 4 — Расчетная схема эффективности АЭ в зоне действия прямого и отраженного звука: 1 — источник шума, 2 — акустический экран, 3 — расчётная точка, 4 — помещение, 5 – опорная поверхность, черным пунктиром условно показано действие прямого звука, излучаемого источником шума, красным условно показан отраженный звук

В развитие метода последовательного преобразования звуковых полей, разработаны математические модели снижения звука акустическими экранами в помещении с учетом влияния прямого и отраженного звука. Акустическая эффективность АЭ определена следующим образом:

$$\Delta L_{\text{экр}} = 10 \lg \frac{I_{\text{РТ}}^{6/\varepsilon}}{I_{\text{РТ}}^{c/\varepsilon}}, \text{ дБ} \quad (1)$$

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

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

Интенсивность звука в РТ без АЭ определяется следующим образом:

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

где $W_{ист}$ — акустическая мощность источника шума (ИШ), Вт;
 r — расстояние от ИШ до АЭ, м;
 R — расстояние от АЭ до РТ, м (расстояния показаны на рисунке 4).

Интенсивность звука в РТ при наличии АЭ определяется по следующей разработанной формуле:

$$I_{РТ}^{с/э} = \frac{W_{ист} l_{экp} \cdot 1(1 - \alpha_{экp}) l_{экp} \lambda \beta_{дифр}^{экp}}{\pi r^2 \cdot \pi h_{экp} l_{экp} \cdot \pi l_{экp} R} \cdot \arctg \frac{l_{экp}}{2h_{экp}} \cdot \arctg \frac{l_{экp}}{2R}, \quad \text{Вт/м}^2 \quad (3)$$

λ — длина звуковой волны, м; $\beta_{дифр}^{экp}$ — коэффициент дифракции АЭ;
 $h_{экp}$ — высота АЭ, м; $l_{экp}$ — длина АЭ, м;
 $\alpha_{экp}$ — частотно-зависимый коэффициент звукопоглощения АЭ.

Вывод формулы выполняется при условии, что РТ расположена в зоне действия прямого и отраженного звука ($0,5r_{гр} < r < 2r_{гр}$). После упрощений и подстановки (2) и (3) в (1), а также с учетом экспериментальных поправок, учитывающих влияние отраженного звука в помещении ($\Delta L_{пом}^f$) и формы акустического экрана (ΔL_{ϕ}^f), получим:

$$\Delta L_{экp} = 10lg \frac{r^2 R}{(r+R)^2 r_0} + 10lg \frac{h_{экp}}{\lambda} - 10lg(1 - \alpha_{экp}) - 10lg \beta_{дифр}^{экp} - 10lg \left(\arctg \frac{l_{экp}}{2h_{экp}} \right) - 10lg \left(\arctg \frac{l_{экp}}{2R} \right) + 10lg \pi^2 - \Delta L_{пом}^f + \Delta L_{\phi}^f, \quad \text{дБ}, \quad (4)$$

где $r_0 = 1$ м;

В разработанном методе расчета эффективности АЭ в зоне действия прямого и отраженного звука учтены влияние акустических свойств помещения (экспериментальная поправка), расположение АЭ в пространстве, длина волны и коэффициент дифракции, форма АЭ (экспериментальная поправка), высота и длина АЭ, а также звукопоглощающие свойства АЭ.

По разработанной формуле (4) для плоского акустического экрана размером 2х2 м был выполнен расчет эффективности, результаты которого в сравнении с экспериментальными данными показаны в таблице 3. Сравнение результатов расчета и эксперимента показало, что отклонение данных не превышает ± 2 дБ, что обеспечивает достаточную точность для проведения инженерных расчетов при проектировании акустических экранов.

Таблица 3 — Сравнение результатов расчёта эффективности АЭ с данными экспериментов

Параметр, формула	Параметры, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\Delta L_{\text{экp}}$, дБ (расчет)	4	8,2	12	15	19	20,3	22,6
$\Delta L_{\text{экp}}$, дБ (эксперимент)	6	10	14	16	20	22	23
Отклонение данных, дБ	-2	-1,8	-2	-1	-1	-1,7	-0,4

Для случая нахождения РТ в области отраженного звукового поля ($r \geq 2r_{\text{гр}}$) разработана следующая формула определения эффективности АЭ:

$$\Delta L_{\text{экp}}^{\text{пом}} = 10 \lg \left[\frac{1}{2\pi(r+R)^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha}_{\text{пом}})}{\psi_{\text{пом}} A_{\text{пом}}} \right] - 10 \lg \left[\frac{(1-\alpha_{\text{экp}}) \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{экp}} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp}}} \cdot \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R}}{2\pi^3 r^2 h_{\text{экp}} R} + \frac{4(1-\bar{\alpha}'_{\text{пом}})}{\psi'_{\text{пом}} A'_{\text{пом}}} \right], \text{ дБ} \quad (5)$$

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

$\psi_{\text{пом}}$, $\psi'_{\text{пом}}$ — коэффициент, показывающий отклонение звукового поля от диффузного до и после установки АЭ;

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

Результаты расчета эффективности АЭ по формуле (5) в сравнении с результатами экспериментов показали приемлемую точность (Таблица 4).

Таблица 4 — Результаты расчётов акустической эффективности АЭ в помещении в области отраженного звука

Параметр	Значения в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Эффективность АЭ (расчет), дБ	1,3	1,6	1,8	1,8	1,8	1,8	1,6
Эффективность АЭ (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

В четвертой главе приведены описание опытного стенда и методики проведенных экспериментальных исследований эффективности АЭ в помещении и в свободном звуковом поле, анализ полученных экспериментальных данных, а также разработанные рекомендации и результаты внедрения.

Для проведения экспериментальных исследований создан опытный стенд, состоящий из набора акустических экранов, различных по площади, наличию звукопоглощения и форме, применялся искусственный ненаправленный источник звука постоянной звуковой мощности и прецизионная аппаратура для измерений уровней звукового давления, уровней звука и времени реверберации в помещениях.

Испытания проводились в опытном помещении с различными задаваемыми акустическими характеристиками, а также в свободном звуковом поле. Испытывались АЭ трех типоразмеров (1x1 м; 1,5x1,5 м; 2x2 м), плоские, Г-образные, П-образные и полузамкнутые с нанесенным по площади АЭ звукопоглощающим материалом (ЗПМ) и без ЗПМ. Все измерения проводились как с установленным АЭ, так и без него.

Путём поэтапного внесения звукопоглощающей облицовки (ЗПМ) в опытное помещение его акустические свойства изменялись. Акустические свойства опытного помещения определялись расчётом на основании результатов измерений времени реверберации при различной эквивалентной площади звукопоглощения, материал для акустической обработки помещений — минеральная вата.

За оценочный показатель (критерий) принято значение среднего коэффициента звукопоглощения на частоте 1000 Гц ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$). Всего выполнено 4 этапа измерений (для плоских АЭ) с акустической обработкой помещения ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$): на этапе 1 — 0,2, на этапе 2 — 0,3, на этапе 3 — 0,4 и на этапе 4 — 0,5. Значение критерия 0,2 было выбрано в соответствии с результатами исследований акустических свойств исследованных производственных помещений, а значение критерия 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 (по мнению автора). Для исследования эффективности АЭ при отсутствии влияния отраженного звука также выполнены серии испытаний АЭ в свободном звуковом поле.

Эффективность АЭ в помещении и в свободном звуковом поле определялась в следующих точках: ТИ1 располагалась в зоне глубокой акустической тени (на расстоянии 0,5 м от АЭ), ТИ 2 располагалась на расстоянии 2м от АЭ. Примеры схем измерения и фотофиксация экспериментальных исследований эффективности акустических экранов представлены на рисунках 5 и 6.

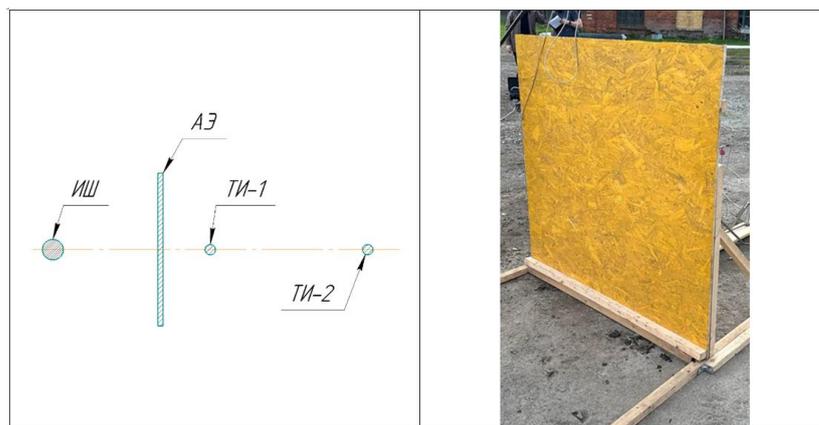


Рисунок 5 — Измерение эффективности плоского АЭ

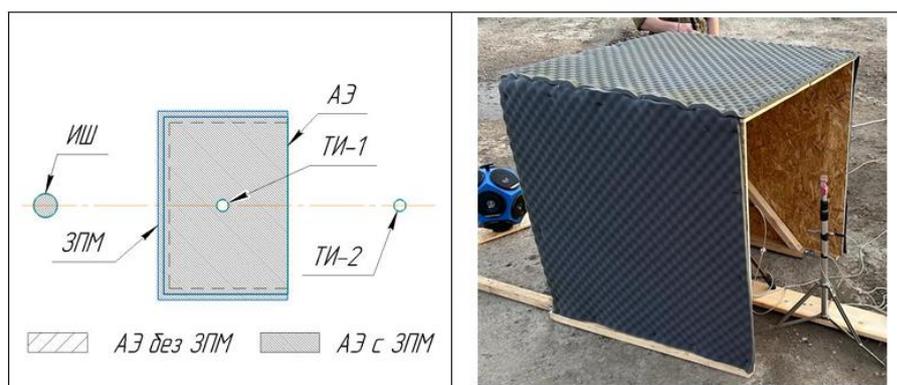


Рисунок 6 — Измерение эффективности полузамкнутого АЭ с звукопоглощающей облицовкой на внешнем контуре

Эффективность АЭ размерами 2х2 м (Рисунок 7) при различных $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ составила: при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$: 1,5-6 дБ (5 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$: 2,5-11 дБ (7,5 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$: 3,5-16 дБ (10 дБА); при $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$: 4,5-20 дБ (12,5 дБА).

Как следует из полученных экспериментальных данных, эффективность АЭ в значительной степени зависит от акустических свойств помещения, определяемых выбранным критерием ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$). При каждом увеличении критерия, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$, на 0,1 эффективность АЭ возрастает, в среднем, на 2,5 дБА. Эффективность АЭ в акустически необработанном помещении ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}=0,2$), в зависимости от размеров АЭ составляет 2,5-5 дБА. При наивысшем значении критерия ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}=0,5$), эффективность того же АЭ достигает 7-12,5 дБА. При этом, как следует из данных, представленных на рисунке 7, при наивысшем значении среднего коэффициента звукопоглощения 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.

Установлено, что эффективность экрана увеличивается на 1–3 дБ в рассматриваемом частотном диапазоне (в среднем, на 2 дБА) за счёт нанесения на поверхность акустического экрана эффективного звукопоглощающего материала (ЗПМ).

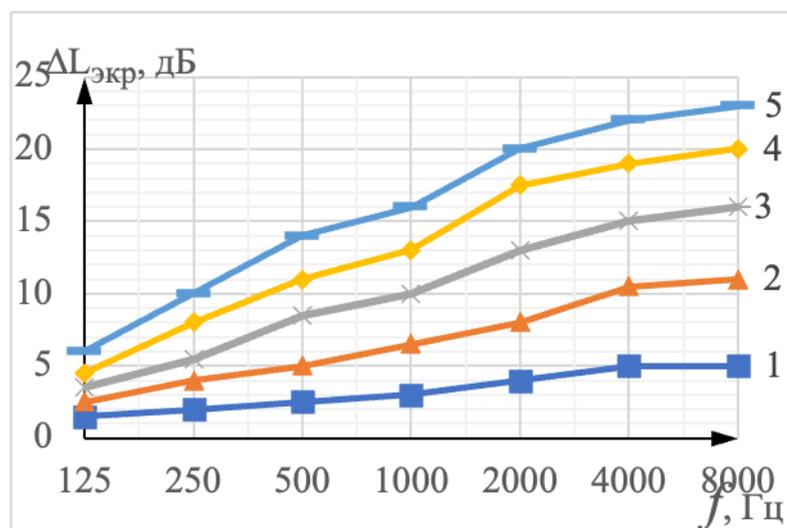


Рисунок 7 — Акустическая эффективность АЭ размерами 2x2 м в опытном помещении с различными акустическими свойствами (1-4) и в свободном звуковом поле (5): 1 - $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$; 2 - $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$; 3 - $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$; 4 - $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$

Для учета влияния помещения на эффективность АЭ на основании выполненных экспериментов для всех типоразмеров АЭ получены значения поправок в формулу расчёта эффективности АЭ (4) в зависимости от среднего коэффициента звукопоглощения помещения, $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$, представленные в таблице 5.

Таблица 5 — Экспериментальные поправки в формулу расчета эффективности АЭ, учитывающие влияние отраженного звука в помещении ($\Delta L_{\text{пом}}^f$)

Размеры АЭ, м	Акустические свойства помещения $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$	Поправка, дБ, в значения акустической эффективности АЭ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Поправка, дБА
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	
		1x1	0,2	2,5	4,0	5,5	7,5	10,0	
1,5x1,5	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
	0,2	3,0	5,5	7,0	9,0	11,5	13,0	13,0	9,0
2x2	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
	0,2	3,0	6,0	9,0	11,0	16,0	16,0	17,0	10,0
2x2	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

Влияние размеров АЭ на их акустическую эффективность представлено на рисунке 8.

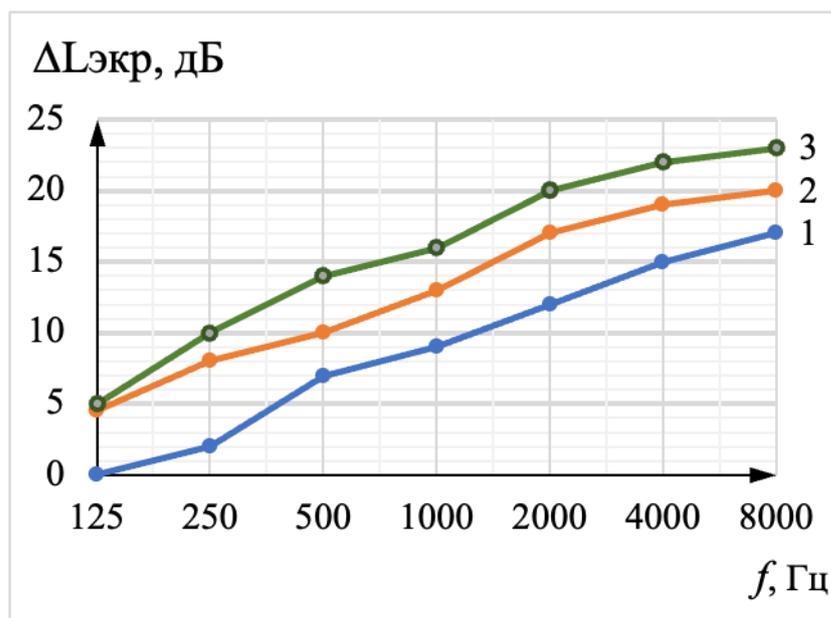


Рисунок 8 — Измеренные значения эффективности АЭ различных размеров: 1 — АЭ размером 1x1 м, 2 — АЭ размером 1,5x1,5 м; 3 — АЭ размером 2x2 м

На основании анализа экспериментальных результатов установлено, что в зоне глубокой акустической тени (ТИ 1) в диапазоне частот 125-8000 Гц получены следующие значения эффективности АЭ (Рисунок 8): для АЭ 1x1м — 3-17 дБ (8 дБА); для АЭ размером 1,5x1,5м — эффективность 4,5-20 дБ (12 дБА); для АЭ размером 2x2 м - эффективность 6-23 дБ (15 дБА). Таким образом, при каждом удвоении площади АЭ его эффективность возрастает, в среднем, на 2-3 дБА. Значение эффективности АЭ в точке 2 на 2 дБ (дБА) ниже из-за уменьшения угла дифракции.

Сравнение эффективности АЭ различной формы (плоского, Г-образного, П-образного и полужамкнутого) размером 1x1 м в зоне глубокой акустической тени представлено на рисунке 9.

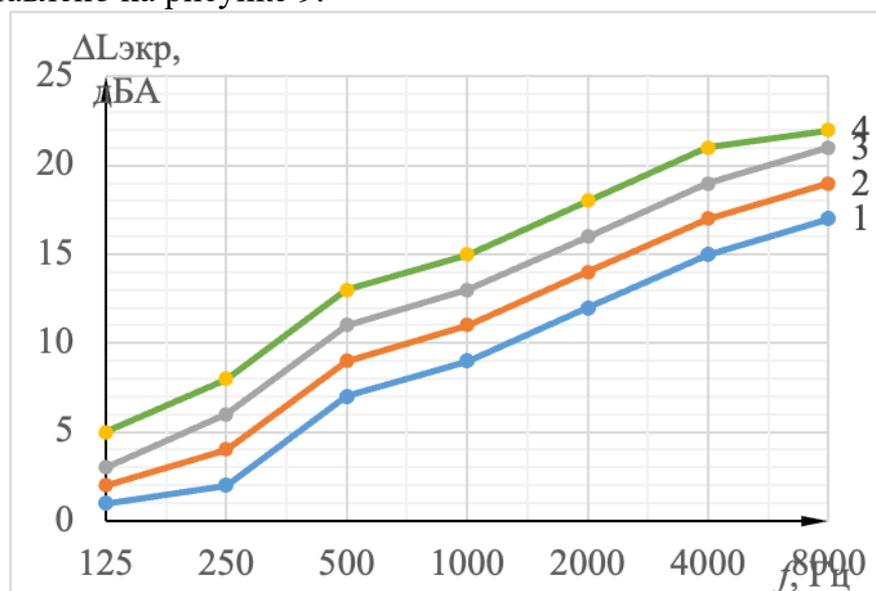


Рисунок 9 — Сравнительная эффективность АЭ размером 1x1 м различной формы: 1 — плоский АЭ; 2 — Г-образный АЭ; 3 — П-образный АЭ; 4 — полужамкнутый АЭ

Как следует из полученных результатов, эффективность Г-образных АЭ на 1-2 дБ (1 дБА) выше, чем плоских, эффективность П-образных на 2-4 дБ (3 дБА) выше, чем эффективность плоских, а эффективность полузамкнутых АЭ на 4-6 дБ (6 дБА) выше, чем эффективность плоских АЭ. Для учета формы АЭ получены экспериментальные поправки в формулу расчета эффективности АЭ (1), представленные в таблице 6.

Таблица 6 — Экспериментальные поправки на влияние формы АЭ (ΔL_{ϕ}^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

На основании анализа полученных результатов 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, а также применение в конструкции АЭ элементов, увеличивающих его эффективность (размеры, форма, ЗМП).

Акустическая обработка производственных помещений. Для увеличения эффективности АЭ на рабочих местах в помещениях, рекомендуется предварительно проводить акустическую обработку помещений путем увеличения среднего звукопоглощения в помещении. 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 ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2$) эффективность АЭ (например, размерами 2x2 м) в зоне прямого звука (РТ находится на расстоянии не более 0,5 м от АЭ) 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), то есть практически вдвое. Даже, если $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$ (практически максимально достижимая величина в производственном цеху), АЭ в помещении имеет значение акустической эффективности, в среднем, на 3 дБА ниже, чем в условиях свободного звукового поля. Важно учитывать, что акустическая эффективность АЭ в помещении всегда ниже, чем в свободном звуковом поле, при расчетах эффективности использовать поправку на влияние помещения.

Расположение АЭ в помещении относительно граничного радиуса. 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. Необходимо стремиться располагать АЭ, а также выбирать локацию объекта защиты на расстояниях от источника шума, меньших величины граничного радиуса. В случае расположения объекта защиты за пределами граничного радиуса эффективность АЭ снижается не менее чем на 2-4 дБА.

Выбор параметров АЭ. Эффективность АЭ возрастает с увеличением размеров АЭ. Возрастание площади АЭ вдвое не менее чем на 2-3 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, в среднем, на 2 дБА. Эффективность П-образного в плане АЭ на 3 дБА выше эффективности плоского АЭ, а эффективность полузамкнутого на 6 дБА выше, чем эффективность плоского АЭ. Применение звукопоглощения в конструкции акустического экрана (звукопоглощающий материал расположен по всей плоскости АЭ) увеличивает его акустическую эффективность не менее чем на 2 дБА.

На основании проведенных исследований выполнена апробация предложенных решений (Рисунок 10). Для снижения шума компрессора на рабочем месте в цехе металлообработки ООО «ОмегаТех» установлен П-образный АЭ размером 2,5х4 м, и размещены на потолке штучные (функциональные) звукопоглотители (Рисунок 10а).

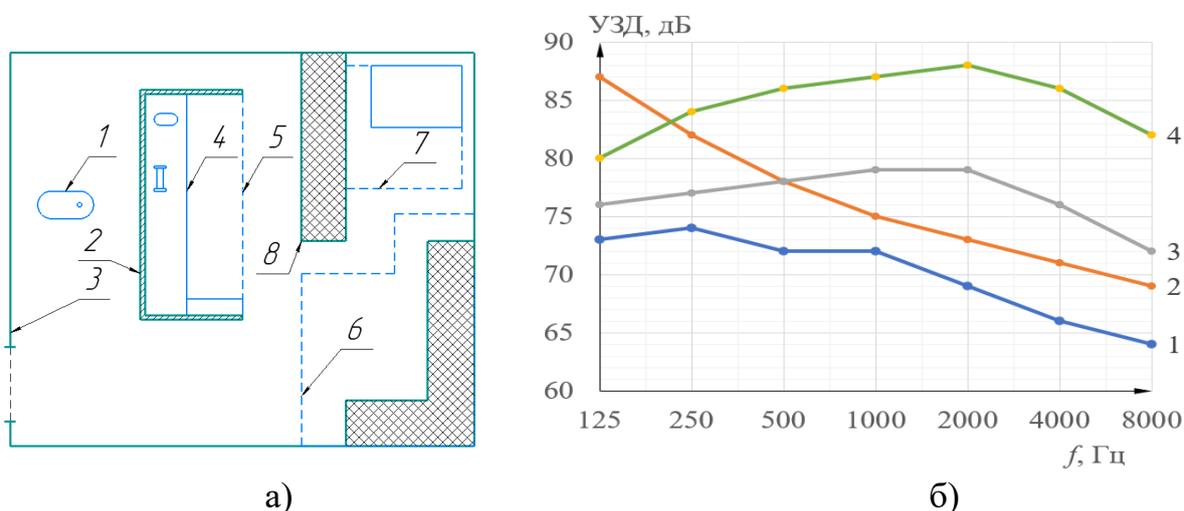


Рисунок 10 — Схема цеха металлообработки с установленным АЭ и штучными звукопоглотителями (а) и спектры шума на рабочем месте (б);
 а) 1 — источник шума (компрессор), 2 — АЭ, 3 — помещение цеха, 4 — рабочее место, 5, 7 — рабочая зона, 6 — складская зона, 8 — рабочие шкафы;
 б) 1 — УЗД на рабочем месте после реализации шумозащитных мероприятий, 2 — норма шума, 3 — УЗД после установки АЭ, без звукопоглотителей, 4 — спектр шума на рабочем месте до применения шумозащитных мероприятий

До применения шумозащитных мероприятий на рабочем месте были зафиксированы превышения уровней звукового давления на 2-15 дБ в диапазоне частот 125-8000 Гц (Рисунок 10б). Установкой акустического экрана в цехе без акустической обработки помещения было достигнуто снижение шума на рабочем месте 4-10 дБ в диапазоне частот 125-8000 Гц, что не позволило достичь нормативных требований, сохранилось превышение шума над нормативом 4-6 дБ в диапазоне частот 1000-8000 Гц. После выполнения акустической обработки помещения с помощью штучных (функциональных) звукопоглотителей, размещенных в цехе на потолке, удалось достичь увеличения среднего коэффициента звукопоглощения, обеспечив $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}=0,4$, после чего уровни звукового давления на рабочем месте были дополнительно снижены до нормативных требований по шуму на рабочем месте.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основании экспериментальных исследований уровней звука на рабочих местах в 22 производственных цехах установлено, что эквивалентные уровни звука не превышают норму примерно на 10% рабочих мест, в 70% зафиксированы превышения шума до 10 дБА, а в 20% зарегистрированы превышения от 11 до 22 дБА. Таким образом, проблема защиты от шума на производственных предприятиях является актуальной.

2. Изучены механизмы формирования звуковых полей и акустические свойства помещений промышленных предприятий. Измеренные значения времени реверберации в производственных помещениях в частотном диапазоне 125-8000 Гц составили от 0,8-0,5 до 2,3-1,6 с (Рисунок 2а), вычисленные значения среднего коэффициента звукопоглощения в исследованных производственных помещениях (Рисунок 2б) составили 0,1-0,2 (за исключением небольшого числа спектров). Разработана классификация производственных помещений в зависимости от их акустических свойств - значения предложенного критерия $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$, среднего коэффициента звукопоглощения на частоте 1000 Гц, и характера звукового поля в помещении: I класс: $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} \leq 0,2$, звуковое поле диффузное, помещение гулкое, звукопоглощение отсутствует; II класс: $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,3$, звуковое поле квазидиффузное, помещение обладает слабым звукопоглощением; III класс: $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,4$, звуковое поле квазидиффузное, помещение оборудовано заметным звукопоглощением; IV класс: $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,5$, звуковое поле слабодиффузное, помещение оборудовано максимально возможным в производственном помещении звукопоглощением.

3. Выполненный расчёт эффективности АЭ в помещениях по формулам ГОСТ 31287-2005, основанным на положениях оптико-дифракционной теории, показал неприемлемое отклонение расчётных данных от данных эксперимента.

4. Разработаны расчетные схемы и математические модели акустических экранов, расположенных в помещении в зоне прямого и отраженного звука, учитывающие процессы дивергенции, дифрагирования, отражения звука и звукопоглощения. На основании статистической геометрической теории акустики разработан метод расчета эффективности АЭ,

позволяющий учесть акустические свойства помещения, расположение АЭ в пространстве, высоту и длину АЭ, его звукопоглощающие свойства, коэффициент дифракции, длину волны. В математическую модель эффективности АЭ в области прямого и отраженного звука введены экспериментальные поправки на влияние формы АЭ и на влияние отраженного звука в помещении. В математической модели АЭ в области отраженного звука влияние помещения учтено с помощью среднего коэффициента звукопоглощения, эквивалентной площади звукопоглощения и коэффициента нарушения диффузности звукового поля до и после установки АЭ. Экспериментальная проверка показала приемлемую точность результатов расчётов, выполненных с использованием разработанного метода.

5. Для проведения экспериментальных исследований разработана методика испытаний и создан опытный стенд, состоящий из набора АЭ различных по площади, форме и звукопоглощению, измерения проведены прецизионной аппаратурой для измерений значений УЗД, УЗ и времени реверберации в помещениях, с использованием искусственного ненаправленного источника звука постоянной звуковой мощности. Испытания проводились в опытном помещении с изменяемыми акустическими характеристиками и в свободном звуковом поле. Испытывались АЭ трех типоразмеров (1x1 м; 1,5x1,5 м; 2x2 м), 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 $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000} = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$. Установлено, что при каждом увеличении $\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$ на 0,1, эффективность АЭ возрастает, в среднем, на 2,5 дБА. При нанесении на поверхность АЭ звукопоглощающих материалов (ЗПМ) его эффективность возрастает, в среднем, на 2 дБА. При каждом удвоении площади АЭ эффективность возрастает на 2-3 дБА. Эффективность Г-образных АЭ на 1-2 дБ (1дБА) выше, чем плоских П-образных, выше на 2-4 дБ (3 дБА), а полузамкнутых АЭ - выше на 4-6 дБ (6 дБА).

6. На основании выполненных экспериментов для всех типоразмеров АЭ и типов помещений получены значения поправок в разработанную формулу расчета эффективности АЭ в зоне действия прямого и отраженного звука в помещении: поправка, учитывающая влияние отраженного звука в помещении и поправка, учитывающая влияние формы АЭ.

7. 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 выбором элементов конструкции АЭ, увеличивающих его эффективность (размеры, форма, ЗМП).

8. Предложенные решения внедрены на рабочем месте в цехе металлообработки. Для снижения шума компрессора выполнена акустическая обработка помещения с помощью штучных звукопоглотителей, размещенных на потолке, а также установлен П-образный акустический экран размером 2,5x4 м. До применения шумозащитных мероприятий требуемое снижение

шума на рабочем месте составляло 2-15 дБ в частотном диапазоне 250-8000 Гц (15 дБА). При установке АЭ в цехе снижение шума на рабочем месте составило 7-10 дБ в частотном диапазоне 250-8000 Гц, но шум превышал нормы на 4-6 дБ в диапазоне частот 1000-8000 Гц. Для снижения отраженного шума в помещении применены штучные звукопоглотители, акустической обработкой помещения был обеспечен средний коэффициент звукопоглощения на частоте 1000 Гц ($\bar{\alpha}_{\text{пом}}^{1000}$) равный 0,4, что позволило достичь при том же акустическом экране дополнительного снижения уровней звукового давления на 3-10 дБ в частотном диапазоне 125-8000 Гц и обеспечить соблюдение нормы шума во всем частотном диапазоне.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в журналах, входящих в Перечень научных журналов ВАК (категория К2):

1. Кондратьев С. А. 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.
2. Кондратьев С. А. Исследование акустических свойств помещений промышленных предприятий / Кондратьев С. А., Тюрина Н. В., Фиев К. П. // Noise Theory and Practice. – 2025. – №3(11). – С. 178-187.
3. Кондратьев С. А. Влияние формы и размеров акустического экрана на его эффективность / Кондратьев С. А., Иванов Н. И., Тюрина Н. В. // Noise Theory and Practice. – 2025. – №3(11). – С. 121-132.
4. Кондратьев С. А. 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.
5. Кондратьев С. А. Практические решения по снижению шума чиллеров и драйкулеров / Бужинский К.В., Андриющенко А.К., Кондратьев С. А., Тюрина Н. В., Фиев К. П. // Noise Theory and Practice. – 2025. – №4(12). – С. 260-274.

Доклады и тезисы докладов на конференциях:

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

Издательство Балтийского государственного университета
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

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

Подписано в печать __.02.2026. Объем 1,4 усл. п. л. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Тираж 100 экз. Заказ № _____