

На правах рукописи



ФИЕВ КОНСТАНТИН ПАВЛОВИЧ

**КОНТРОЛЬ, ОЦЕНКА И СНИЖЕНИЕ АВИАЦИОННОГО ШУМА
В БЛИЗИ АЭРОПОРТОВ**

1.3.7 – Акустика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2025

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

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

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

Васильев Вадим Александрович – кандидат технических наук, главный специалист ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург.

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

Защита состоится «___» 03.2025 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. 214.

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

Автореферат разослан __.01.2025 г. Отзывы на автореферат направлять по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 1-ая Красноармейская ул., д. 1, каф. Е5.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Буторина Марина Вадимовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Повышенный шум остается одной из важных и сложных проблем охраны окружающей среды. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, здоровье населения на 17-20% зависит от состояния окружающей среды, включая шум, как один из доминирующих неблагоприятных факторов окружающей среды. На основании данных Роспотребнадзора количество жалоб на негативное воздействие шума ежегодно увеличивается. При этом, сравнивая воздействие различных видов транспорта, отметим, что наиболее трудно достичь снижения авиационного шума. Помимо негативного воздействия на организм человека, шум распространяется на значительные расстояния, что существенно затрудняет борьбу с ним и объясняется особенностями его затухания в пространстве.

Согласно результатам исследований, эквивалентные уровни звука на территории жилой застройки, расположенной вблизи аэропортов, а также в нормируемых помещениях на территории аэропортов могут превышать допустимые нормы на 5-15 дБА (или в 1,5-3 раза по субъективному ощущению громкости) в дневное время. В ночное время эти значения еще выше, поэтому в ряде зарубежных аэропортов полеты в ночное время запрещены. Приведенные примеры относятся к случаям, когда жилая застройка располагается на расстоянии нескольких километров от аэропорта. Значительно более серьезные цифры превышений (20-25 дБА и более) регистрируются, когда жилая застройка расположена в сотнях метров от взлётно-посадочной полосы (ВПП) аэропорта. Примеров аэропортов, вблизи которых расположена жилая застройка в нашей стране, множество, в том числе, аэропорт «Пулково» в г. Санкт-Петербурге, аэродром «Авиационно-ремонтный завод №123» в г. Старая Русса, аэропорт «Минеральные воды» в г. Минеральные воды и другие.

Для обеспечения допустимых уровней шума необходимо обеспечить эффективные контроль, оценку и снижение авиационного шума в жилой застройке, расположенной вблизи аэропортов, особенно при наиболее шумных операциях, таких как разбег и взлёт воздушных судов (ВС). В настоящее время достаточно полно изучен вопрос распространения шума в жилой застройке от автомобильных потоков и железнодорожных поездов, но специфика процессов образования авиационного шума в аэропорту и на территории вблизи расположенной жилой застройки, связанная с изменением положения ВС на ВПП и в воздушном пространстве, а также снижения шума зданиями и сооружениями в аэропорту, требует специального изучения. Для решения поставленных задач необходимо уточнить влияние основных режимов, траекторий движения и расстояния до ВС на уровень шума на нормируемых территориях, а также рассмотреть вопросы, связанные с особенностями экранирования авиационного шума в аэропортах.

Степень разработанности темы исследования. Проблему авиационного шума аэропортов изучали известные отечественные учёные:

М.В. Буторина, В.Ю. Захаров, М.О. Картышев, О.А. Картышев, В.В. Медведев, Н.К. Кирыюшкина, Н.И. Николайкин, М.А. Пинигин, В.Ф. Самохин, А.Г. Мунин, В.Е. Квитко, Б.В. Мельников, В.И. Токарев, Е.В. Власов, Е.М. Малков, А.В. Стерликов, Ю.Д. Халецкий, Д.П. Шумков, Г.А. Личутин, И.А. Сухорукова, Э.В. Сазонов, А.Е. Шашурин, Н.В. Тюрина, а также зарубежные ученые: L.M. Lilley, A.L. McPike, M.R. Fink, J.L. Peters, C.D. Zevitas, C.J. Roof, G.A. Wellenius и другие.

Научно-техническая гипотеза: разработка расчетной модели и расчетных формул для определения шума с учетом эффекта экранирования зданиями и сооружениями, расположенными вблизи взлетно-посадочной полосы аэропортов, позволит уточнить и упростить оценку уровней шума на селитебной территории и в нормируемых помещениях на территории аэропортов, а также разработать наиболее эффективные шумозащитные мероприятия.

Цель диссертационного исследования - изучение характера распространения авиационного шума при изменении режимов, трасс полётов и расстояний до ВС, разработка рекомендаций по защите от авиационного шума нормируемых объектов, расположенных вблизи ВПП, и оценка уровней авиационного шума с учетом экранирования его зданиями и сооружениями в аэропорту.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. определить параметры шумового загрязнения в районах Санкт-Петербурга и Ленинградской области, подвергающихся действию авиационного шума, вблизи аэропорта «Пулково», разработать требования к шумозащите;

2. определить акустическое воздействие, создаваемое различными типами воздушных судов, выделить наиболее шумные;

3. разработать методику мониторинга авиационного шума, учитывающую отклонение воздушных судов от установленных маршрутов взлета, проанализировать результаты мониторинга с целью определения шумовой нагрузки в точках измерений при изменении трасс полетов воздушных судов на примере аэропорта «Пулково»;

4. экспериментально уточнить закономерности снижения шума от воздушных судов с изменением расстояния, а также при различных режимах полетов;

5. используя теорию, основанную на методе последовательного преобразования звуковых полей, получить формулы расчетов экранирующего эффекта в жилой застройке и на территории аэропорта в течении разбега по ВПП;

6. выполнить исследования экранирующего эффекта сооружений и экспериментальную проверку полученных теоретических данных;

7. разработать общие рекомендации по снижению шума вблизи аэропортов.

Объект исследования: в качестве объекта исследования выбран аэропорт «Пулково», находящийся в г. Санкт-Петербург.

Предмет исследования: характеристики авиационного шума вблизи аэропорта и требования к его снижению, закономерности шумообразования, а также пути его распространения и снижения.

Научная новизна:

1. Исследовано влияние основных режимов и траекторий полёта воздушных судов, а также расстояния на шум вблизи аэропортов.

2. При принятом допущении об аппроксимации воздушного судна при разбеге линейным источником шума исследован экранирующий эффект сооружений, расположенных вблизи ВПП.

3. Получены формулы для расчета уровней шума с учетом экранирующего эффекта близрасположенных к ВПП сооружений, теоретически изучена связь снижения шума с конструктивными параметрами экранирующих сооружений.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. получены численные зависимости снижения шума вблизи аэропортов с увеличением расстояния;

2. разработана методика мониторинга авиационного шума, учитывающая отклонение воздушных судов от установленных маршрутов взлета, получены численные значения связи акустических характеристик с траекторией полёта;

3. экспериментально определен экранирующий эффект сооружений вблизи ВПП в зависимости от их размеров;

4. разработаны рекомендации по снижению шума вблизи аэропортов, в том числе, рекомендации по выбору траекторий полёта, обеспечивающих снижение шума вблизи аэропортов.

На защиту выносятся:

1. характеристики шума в жилой застройке вблизи аэропорта «Пулково», данные сравнения с санитарными нормами и требования к снижению шума;

2. экспериментальные данные об акустическом воздействии различных типов воздушных судов (ВС) на селитебную территорию;

3. установленные значения влияния режимов полета ВС на шум вблизи аэропорта;

4. закономерности снижения шума при увеличении расстояния от ВПП и аэропорта до расчетной точки;

5. методика определения влияния траекторий полета на шум в жилой застройке и результаты измерений шума в контрольных точках при изменении траекторий полета воздушных судов;

6. методика расчёта шума с учетом экранирующего эффекта близрасположенных к ВПП зданий и сооружений и результаты теоретического исследования полученных зависимостей;

7. рекомендации по снижению авиационного шума;

8. результаты апробации предложенных решений.

Методология и методы исследования. При выполнении настоящей работы в качестве методологической основы использованы результаты фундаментальных и прикладных исследований в области процессов распространения авиационного шума, применялись современные методы системного анализа, математического моделирования и статистической обработки данных. При проведении обширных экспериментальных исследований воздействия авиационного шума на различные районы города Санкт-Петербурга и Ленинградской области, получены статистически достоверные выборки результатов натурных измерений в более чем двадцати точках измерения.

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

Апробация результатов исследования:

Основные положения диссертационной работы, а также результаты проведенных научных исследований были обсуждены и представлены на заседаниях кафедр «Экология и БЖД», «Экология и производственная безопасность» БГТУ «ВОЕНМЕХ» в 2021, 2022 и 2024 годах.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях или конгрессах:

- VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», 21–23 марта 2017 г. Санкт-Петербург;
- Третья Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов "Акустика среды обитания", 18 мая 2018 г. Москва;
- VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», 19–21 марта 2019 г. Санкт-Петербург.
- IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», 26–28 апреля 2023 г. Санкт-Петербург.

Внедрение результатов исследования: рекомендованные автором мероприятия внедрены в аэропорту «Пулково» и в ООО «ПКФ Цифровые Приборы».

Личный вклад соискателя учёной степени в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в том, что автором выполнены: обзор литературных источников, теоретические и экспериментальные исследования. Диссертационная работа в полном объёме является самостоятельным исследованием. В работах, написанных в соавторстве, автор сформулировал принципы постановки задач, предложил обоснования и решения поставленных задач, описал проводимые

эксперименты и их результаты, сформулировал окончательные выводы по проведённым исследованиям.

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 4 публикации в журнале из списка, рекомендованных ВАК по итоговой категории (квартиль) «К2», одна статья - в журнале, индексируемом в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и 2 статьи в материалах конференций.

Соответствие научно-квалификационной работы паспорту научной специальности

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

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

Структура и объём работы: Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 112 наименований, 3 приложений; изложена на 274 страницах машинописного текста, в т. ч. содержит 38 таблиц, 61 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и основные задачи, научная новизна и практическая полезность исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализировано состояние проблемы, описан объект исследования.

Приведены нормы шума в жилой застройке, показаны масштабы и величина влияния авиационного шума на жилую застройку и основные характеристики шума аэропортов.

Проанализированы особенности расчетов авиационного шума, показаны их недостатки. Подробно рассмотрены пути и средства снижения авиационного шума, установлено, что дополнительного изучения требуют вопросы экранирования шума зданиями и сооружениями, расположенными на территории аэропортов.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований воздействия авиационного шума, на примере аэропорта «Пулково».

Для проведения контроля и оценки авиационного шума в жилой застройке вблизи аэропортов автором разработана методика измерений, согласно которой точки мониторинга авиационного шума выбираются в соответствии с расположением жилой застройки относительно трасс полётов.

Для формализации понятия «жилой застройки вблизи аэропортов» было предложено использовать в качестве критерия - значения технически

достижимых уровней - эквивалентного уровня звука на территории в дневное время большего или равного 60 дБА и значения для ночного времени - большего или равного 50 дБА.

Согласно результатам экспериментальных исследований автором установлены следующие территории и уровни негативного воздействия авиационного шума на жилую застройку города Санкт-Петербурга и Ленинградской области вблизи аэропорта «Пулково»: Лигово, Красносельского р-на (превышения по эквивалентному уровню звука (УЗ) до 15 дБА и по максимальному УЗ до 10 дБА в дневное и ночное время суток); Сосновая поляна, Красносельского р-на (превышения по эквивалентному УЗ до 13 дБА и по максимальному УЗ до 10 дБА в дневное и ночное время); Горелово (превышения по эквивалентному УЗ до 12 дБА и по максимальному УЗ до 10 дБА в дневное и ночное время суток); город Пушкин (превышения по эквивалентному УЗ до 7 дБА и по максимальному УЗ до 5 дБА ночное время суток); поселок Ленсоветовский, Пушкинского района (превышения по эквивалентному УЗ до 7 дБА и по максимальному УЗ до 5 дБА в дневное и ночное время суток); город Петергоф (превышения по эквивалентному УЗ до 7 дБА и по максимальному УЗ до 15 дБА в дневное и ночное время суток); д. Верхняя Колония, Ломоносовского района (превышения по эквивалентному УЗ до 5 дБА и по максимальному УЗ до 10 дБА в ночное время суток); п. Стрельна, Петродворцового района (превышения по эквивалентному УЗ до 9 дБА и по максимальному УЗ до 15 дБА в дневное и ночное время суток); п. Новоселье, Ломоносовского района (превышения по эквивалентному УЗ до 7 дБА и по максимальному УЗ до 10 дБА в дневное и ночное время суток); г. Колпино (превышения по эквивалентному УЗ до 7 дБА и по максимальному УЗ до 10 дБА в дневное и ночное время суток); д. Ольгино, Ломоносовского района (превышения по эквивалентному УЗ до 9 дБА и по максимальному УЗ до 5 дБА в ночное время суток); территория Авиагородка (превышения по эквивалентному УЗ до 13 дБА и по максимальному УЗ до 15 дБА в дневное и ночное время суток).

Таким образом, измеренные значения УЗ на селитебной территории вблизи аэропорта «Пулково» лежат в диапазоне 60-68 дБА (дневное время) и 49-60 дБА (ночное время); превышения полученных значений над санитарными нормами согласно СанПиН 1.2.3685-2021 составляют 5-13 дБА для дневного времени суток и 4-15 дБА для ночного времени (таблица 1).

Как следует из анализа данных, приведенных в таблице 1, уровни звука в населенных пунктах, расположенных приблизительно на одинаковом удалении от ВПП, могут различаться на 10 дБА и более, что может быть объяснено двумя причинами: отклонением воздушных судов (ВС) от трасс полета, а также наличием экранирующих сооружений между ВПП и жилой застройкой.

Превышения УЗ на селитебной территории вблизи аэропортов над нормативными значениями зафиксированы в 73% случаев пролета воздушных судов (2326 из общего числа 3181 пролетов).

Таблица 1 - Оценка уровней авиационного шума в жилой застройке вблизи
аэропорта «Пулково»

№ п / п	Адрес жилой застройки	Уровни звука, дБА				Превышения УЗ, дБА, по СанПиН 1.2.3685-21			
		День		Ночь		День		Ночь	
		Экв.	Макс.	Экв.	Макс.	Экв.	Макс.	Экв.	Макс.
1	г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д.16к2 (перед фасадом), расстояние до ВПП - 920 м	63	80	54	75	8	до 10	9	15
2	г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д.16к2 (перед торцом), расстояние до ВПП - 920 м	68	-	60	-	13	-	15	-
3	г. Пушкин, ул. Партизана Германа, д.28, расстояние до ВПП - 4080 м	60	80	53	80	5	до 10	8	до 20
4	Посёлок Новоселье, ул. Полевая, д. 24, расстояние до ВПП - 8300 м	62	70	50	70	7	-	5	до 10
5	г. Санкт-Петербург, ул. Взлётная, д. 13, расстояние до ВПП - 850 м	61	80	58	75	6	до 10	13	до 15
6	г. Санкт-Петербург, пересечение ул. Летчика Пилотова и пр. Народного Ополчения, расстояние до ВПП - 5180 м	61	86	49	65	6	до 16	4	до 5

В **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований максимальных уровней звука различных типов воздушных судов, разработана методика мониторинга авиационного шума, учитывающая отклонение воздушных судов от установленных маршрутов взлета, на основании данных мониторинга шума в контрольных точках вблизи аэропорта «Пулково» установлена связь уровней шума на территории жилой застройки с траекторией полёта воздушных судов.

Акустическое воздействие воздушных судов определялось путем измерения максимальных уровней звука в 10 точках контроля на территории жилой застройки, расположенной в западном и восточном направлениях от аэропорта «Пулково». В ходе проведения измерений были определены типы и акустические характеристики воздушных судов (рисунок 1). Максимальные уровни звука самолетов А319 в точках контроля были превышены в 54 из 75 пролетов над селитебными территориями в ночной период времени (72% превышений) и в 1 из 109 пролетов в дневной период времени. Максимальные уровни звука самолетов типа А320 в точках контроля были превышены в 39 из 58 пролетов над селитебными территориями в ночной период (67% превышений) и в 5 из 139 пролетов в дневное время (4% превышений). Максимальные уровни звука самолетов типа В735 в точках контроля были превышены в 10 из 12 пролетов над селитебными территориями в ночной период времени (84% превышений) и в 4 из 33 пролетов в дневное время (12% превышений). Максимальные уровни звука самолетов типа В73Н в точках контроля за один период измерений были превышены в 2 из 4 пролетов над селитебными территориями в ночной период времени суток (50% превышений) и 1 из 43 в дневное время (3% превышений).

Исходя из анализа экспериментальных результатов, сделан вывод о том, что самыми шумными типами воздушных судов являются самолёты А319, А320, В735 и В73Н. Основная часть превышений уровней звука самолетами типа А319, А320, В735 и В73Н была зафиксирована в ночной период времени суток.

Для обеспечения снижения шума на селитебной территории вблизи аэропортов автором разработана методика измерения авиационного шума, позволяющая без значительного объема исходных данных и привлечения сил органов управления воздушным движением количественно оценить масштабы различий расчетных и реальных значений авиационного шума на местности. Данная методика позволяет при наличии данных о ВС, отклонившихся от установленных маршрутов взлета, на основании результатов измерений шума на селитебной территории, аргументированно установить взаимосвязь влияния фактической линии пути (пролета ВС по определенной траектории) с изменением шума на селитебной территории, а также определить причину повышения уровней авиационного шума на приаэродромной территории. Критерием оценки траектории полетов ВС предлагается рассматривать разницу уровней шума в контрольной точке в 6

дБА. Если разница в максимальных значениях УЗ в двух точках измерения при пролете ВС превышает 6 дБА, считается, что фактически воздушное судно отклонилось от установленных процедур взлета. Разработанная методика может быть использована для любых аэропортов и аэродромов, находящихся в непосредственной близости от селитебных территорий.

Разработанная методика контроля авиационного шума апробирована путем мониторинга шума вблизи аэропорта «Пулково» с использованием измерительных станций производства ООО «ПКФ Цифровые Приборы», о чем составлены два акта внедрения, представленные в диссертации. За период мониторинга (более пяти лет) в выбранных контрольных точках на территории вблизи аэропорта «Пулково» было зафиксировано 1809 пролетов самолетов гражданской авиации, из них 73% самолетов отклонились от установленного маршрута взлета/посадки (рисунок 2), при этом количество превышений по шуму на селитебной территории также составило 73%. На основании анализа определено, что отклонившиеся от установленных маршрутов взлета ВС давали шумовое воздействие на 7-9 дБА больше на близлежащие селитебные территории, чем ВС, которые соблюдали установленные маршруты.

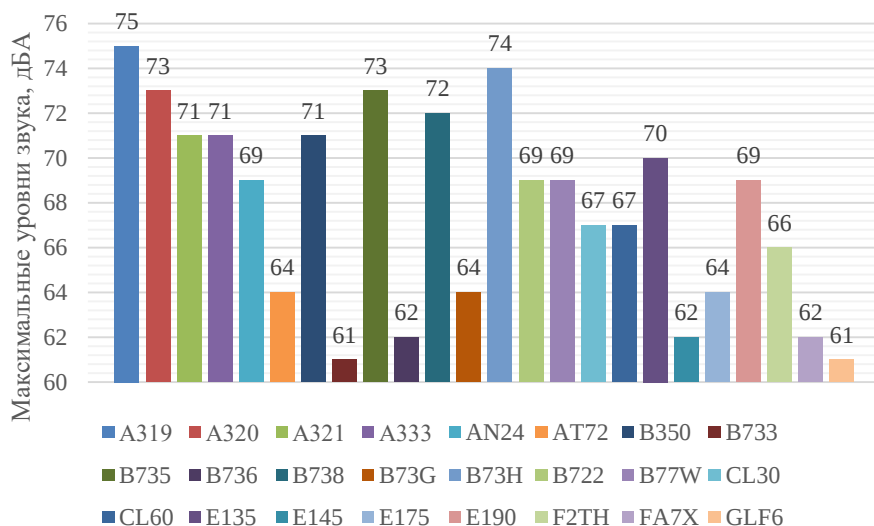


Рисунок 1 – Максимальные уровни звука, зафиксированные на селитебной территории вблизи аэропортов при пролете разных типов воздушных судов

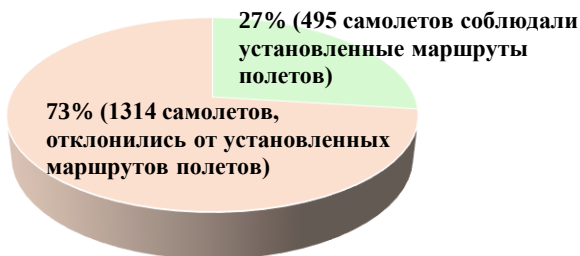


Рисунок 2 – Статистические данные мониторинга об отклонении воздушными судами от установленных маршрутов взлета и посадки

При анализе данных о влиянии режимов полета на уровни шума в точках контроля, расположенных в пределах 400 метров от взлетно-посадочной полосы (ВПП), выполнены исследования на трех этапах **взлёта** воздушного судна (разбег, отрыв и разгон с подъемом), а также на трех этапах **посадки** воздушного судна (выдерживание, приземление и пробег). Получены следующие результаты:

- при **взлете** ВС на этапе «разбег» (рисунок 3) происходит рост шумового воздействия, так как ВС увеличивает скорость движения по ВПП с «начала разбега» до «отрыва». УЗ увеличиваются с 75 до 85 дБА (на 10 дБА). На этапе «отрыв» отмечен спад УЗ, который показывает, что шумовое воздействие от ВПП при контакте с ВС было прекращено, а при их отделении друг от друга происходит снижение УЗ с 85 дБА до 79 дБА (на 6 дБА). На этапе «разгон с подъемом» наблюдается рост УЗ, обусловленный тем, что самолет увеличивает скорость, переходя в набор высоты, а УЗ возрастает с 79 до 80 дБА (на 1 дБА);

- при **посадке** при переходе с этапа «выдерживание» к этапу «приземление» происходит рост шумового воздействия с 66 до 73 дБА (на 7 дБА), т. к. при контакте ВС с ВПП добавляется шум от торможения шасси и взаимодействия шасси с ВПП. На этапе «пробег» зафиксирован спад УЗ с 73 до 65 дБА (на 8 дБА), который обусловлен постепенным снижением скорости движения ВС по ВПП;

- разница уровней звука, излучаемых на этапе «взлет» по сравнению с этапом «посадка» достигает от 9 до 15 дБА (рисунок 4). Данная разница обусловлена тем, что при взлете и посадке основным источником шума является силовая установка, мощность которой при взлете максимально усиливается, а при посадке снижается, чтобы замедлить ВС и после соприкосновения с ВПП использовать реверс и интерцепторы (воздушные тормоза), которые снижают скорость ВС и длину пробега, что тем самым снижает шумовое воздействие.

С целью анализа закономерностей снижения шума с расстоянием и уточнения физической природы снижения авиационного шума, автором проведены экспериментальные исследования, в ходе которых было проанализировано снижение шума с увеличением расстояния от ВПП и с увеличением расстояния до аэропорта (рисунок 5). При увеличении расстояния от ВПП было выявлено снижение УЗ на 3 дБА при первом удвоении (от 100 до 200 м), снижение на 4-5 дБА при втором удвоении (от 200 до 400 м) и 5-7 дБА при третьем удвоении (от 400 до 800 м). Таким образом, согласно полученным данным сделан вывод о том, что фронт звуковой волны ИШ меняется от цилиндрического к квазичилиндрическому, а затем к сферическому, и эта закономерность прослеживается как для эквивалентных, так и для максимальных УЗ. Это означает, что при расчётах снижения шума для объектов, расположенных вблизи ВПП, необходимо источник шума – ВС в процессе разбега по ВПП принимать линейным источником шума на расстояниях до 500 м.

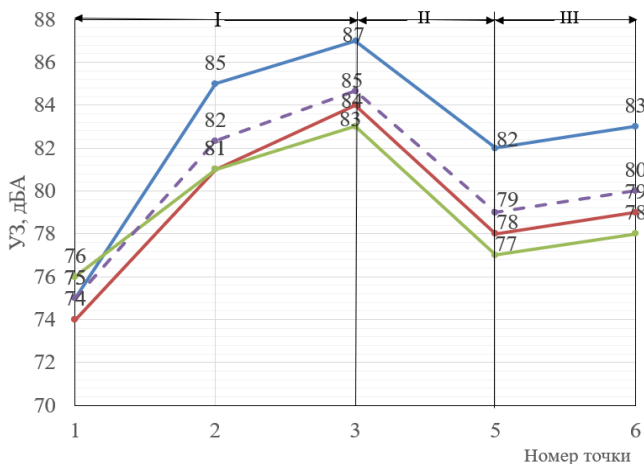


Рисунок 3 – Уровни звука воздушных судов при взлете на этапах:

I – разбег, II – отрыв, III – разгон с подъемом
(пунктиром показаны усредненные данные)

На рисунке 6 показаны результаты измерений эквивалентных уровней авиационного шума в ночное время в точках контроля, расположенных на значительных расстояниях от аэропорта (от 5 км до 25 км), где также отмечено превышение фактических уровней шума над нормативными значениями, вызванное воздействием авиационного транспорта.

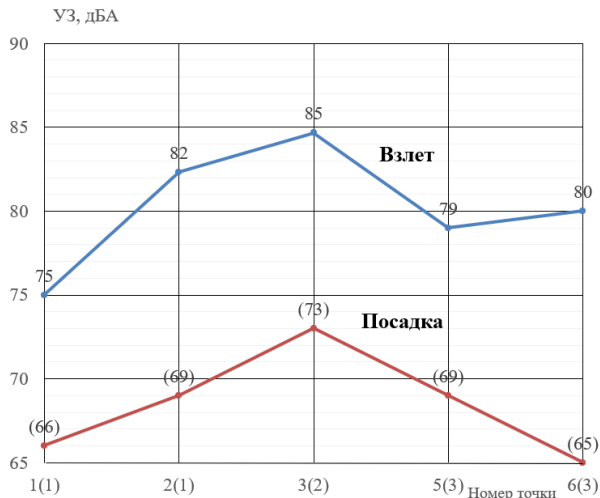


Рисунок 4 – Сравнение уровней звука при взлете и посадке воздушных судов

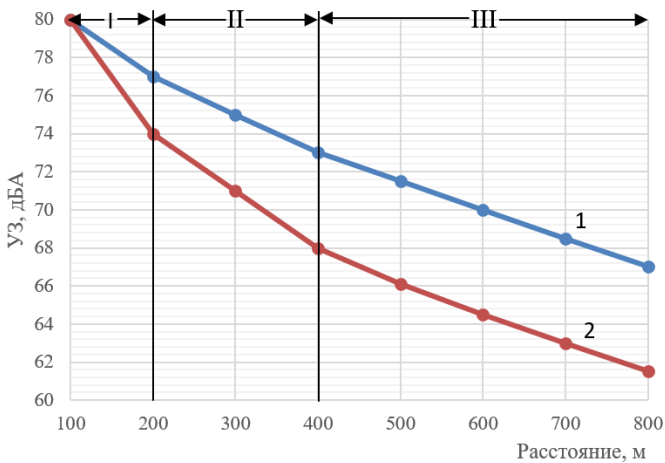


Рисунок 5 – Характер снижения УЗ с увеличением расстояния от ВПП:

1 – эксперимент; 2 – расчет (воздушное судно принято точечным излучателем звука); I – участок экспериментальной кривой, где фронт звуковой волны цилиндрический (снижение УЗ на 3 дБА); II – участок экспериментальной кривой, где фронт звуковой волны квазичилиндрический (снижение УЗ на 4 – 5 дБА); III – участок экспериментальной кривой, где фронт звуковой волны сферический (снижение УЗ на 6 – 7 дБА)

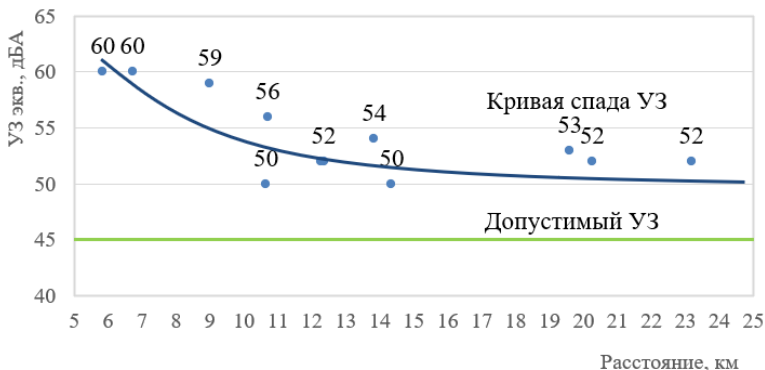


Рисунок 6 – Измеренные эквивалентные уровни звука в ночное время на значительном расстоянии от аэропортов (зеленой линией показана норма шума (45 дБА), синей линией - аппроксимация снижения УЗ с удалением от аэропорта)

В четвёртой главе приведены разработанные автором формулы расчета уровней шума с учетом экранирующего эффекта зданиями и сооружениями аэропорта, а также результаты теоретических исследований снижения шума за счет экранирования при разбеге ВС по взлетно-посадочной полосе (ВПП).

Согласно полученным экспериментальным данным наибольшие уровни авиационного шума отмечаются при разбеге самолетов по ВПП. При этом повышенные уровни шума отмечаются как в близрасположенной жилой застройке, так и в служебных зданиях на территории аэропортов. В качестве мер снижения шума предложено использовать шумозащитное остекление нормируемых помещений и учитывать экранирующий эффект зданий, находящихся на территории аэропортов, на пути распространения звука от ВПП до нормируемых по шуму объектов, а также специальных сооружений, размещенные вдоль ВПП (например, акустических экранов).

Для расчета акустической нагрузки, возникающей при разбеге воздушного судна по ВПП, на селитебную территорию вблизи аэропортов и нормируемые по шуму помещения автором разработана методика расчета шума с учетом экранирующего эффекта зданий и сооружений. Вывод формул выполнен методом последовательного преобразования звуковых полей. Расчётная схема показана на рисунке 7.

В разработанном методе расчета приняты следующие допущения:

1. источником шума (ИШ) является не только воздушное судно, но и часть взлётно-посадочной полосы, по которой он движется, за счёт отражения звука от поверхности ВПП;

2. источник шума аппроксимирован как линейный, фронт звуковой волны которого до определённых расстояний имеет характер цилиндрический или квазичилиндрический;

3. длина экранирующего сооружения (ЭС) равна длине ИПП.

С учетом принятых допущений предложенная формула для расчета шума в зоне жилой застройки, расположенной вблизи аэропорта, имеет следующий вид:

$$L_{\text{PT}} = L_{\text{ист}} - 10 \lg \frac{h_{\text{эс}}}{\lambda} + 10 \lg (1 - \alpha_{\text{эс}}) - 10 \lg \frac{b_{\text{эс}}}{\lambda} + 2 \text{ПД} + 10 \lg (1 - \alpha_{\text{б}}) - 10 \lg \frac{R_{\text{эс}} R_{\text{PT}}}{R_{\text{ист}} R_0} + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 - 10 \lg \frac{\pi^3}{2}, \text{ дБ} \quad (1)$$

где: $L_{\text{ист}}$ – уровни звукового давления, определенные на расстоянии $R_{\text{ист}}$ от ВПП, дБ; $l_{\text{эс}}$ – длина экранирующего сооружения, м; $h_{\text{эс}}$ – высота экранирующего сооружения, м; $\alpha_{\text{эс}}$ – коэффициент звукопоглощения фасада экранирующего сооружения, обращенного к ВПП; $b_{\text{эс}}$ – ширина экранирующего сооружения, м; $\alpha_{\text{б}}$ – коэффициент звукопоглощения верхней части ЭС шириной $b_{\text{эс}}$; λ – длина звуковой волны, м; $R_0 = 1$ м; ПД – показатель дифракции верхних «свободных» ребер экранирующего сооружения, получаемый экспериментально; K_1, K_2, K_3, K_4 – числовые поправки, дБ, зависящие от отношения $l_{\text{эс}}$ к величине одного из следующих факторов – расстояния от ИПП до ЭС ($R_{\text{эс}}$), высоты ЭС ($h_{\text{эс}}$), ширины ЭС ($b_{\text{эс}}$), расстояния от ЭС до РТ (R_{PT}).

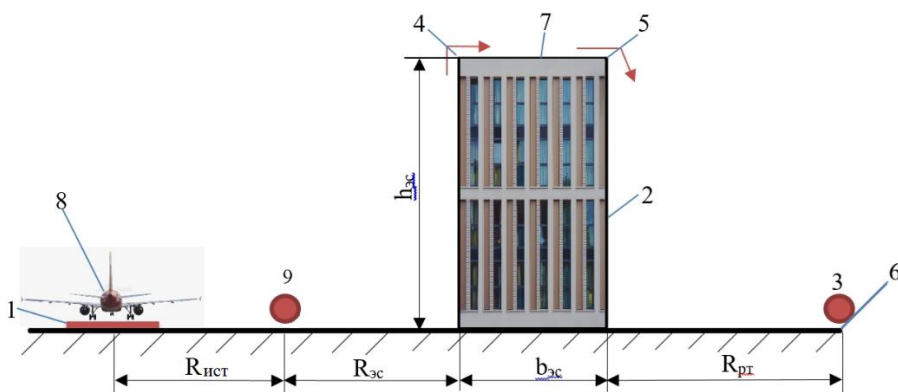


Рисунок 7 – Схема расчёта экранирующего сооружения при разбеге самолета по ВПП: 1 – ВПП, 2 – экранирующее сооружение (ЭС), 3 – РТ, расположенная в зоне жилой застройки, 4,5 – левое и правое свободные ребра экранирующего сооружения, соответственно, 6 – опорная поверхность, 7 – верхняя часть экранирующего сооружения, 8 – самолет; 9 – точка измерений шума самолета на ВПП; - дифракция звука

Расчет шума в зоне глубокой акустической тени зданий на территории аэропорта выполняется для того, чтобы определить экранирующий эффект здания по отношению к его противоположно расположенному фасаду. Таким образом, прогнозируются ожидаемые уровни шума на частично защищенной от шума территории вблизи этого здания. Расчетная схема приведена на рисунке 8.

Дополнительные допущения при расчете:

1. в качестве исходной характеристики принимаются значения УЗД, полученные на территории, прилегающей к фасаду здания, обращенному к ВПП;

2. расчет экранирующего эффекта выполняется в РТ, расположенной на противоположном фасаде рассматриваемого здания (экранирующего сооружения).

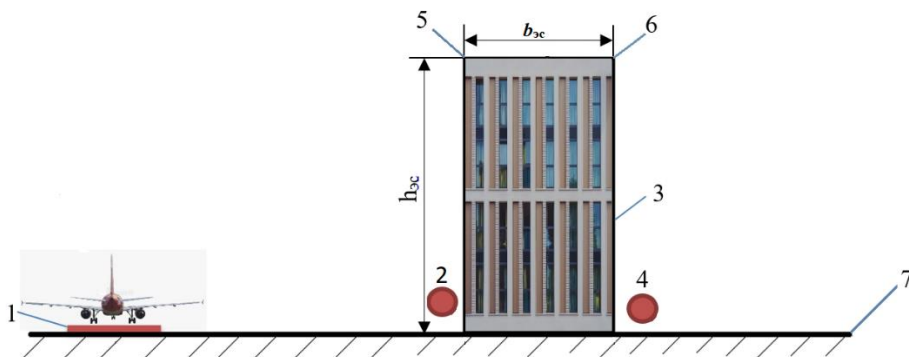


Рисунок 8 – Схема расчёта экранирующего эффекта здания в зоне глубокой акустической тени: 1 – ВПП, 2 – точка вблизи фасада здания, ориентированного на ВПП, выбирается для получения исходных данных для расчета, 3 – здание (ЭС), 4 – РТ, 5 и 6 – свободные ребра ЭС; 7 – опорная поверхность

С учетом указанных допущений разработана следующая формула для расчета шума в зоне глубокой акустической тени экранирующего сооружения:

$$L_{РТ} = L_n - 10 \lg \frac{h_{эс}}{\lambda} - 10 \lg \frac{b_{эс}}{\lambda} + 10 \lg(1 - \alpha_{эс}) + 10 \lg(1 - \alpha_b) + \\ + 2ПД + K_1 + K_2 - 10 \lg \frac{\pi^3}{4}, \text{ дБ} \quad (2)$$

где: L_n – уровни звукового давления на фасаде здания со стороны ВПП, дБ, получаемые экспериментально; K_1 , K_2 – числовые поправки, дБ,

зависящие от отношения длины ЭС ($l_{эс}$) к одному из следующих факторов - высота ЭС ($h_{эс}$), ширина ЭС ($b_{эс}$), дБ.

В ходе выполненных теоретических исследований установлены следующие закономерности: характер изменения УЗД с ростом частоты состоит в увеличении эффекта экранирования на 3 дБ на октаву, зависимость эффективности в дБА от высоты и ширины экранирующего сооружения - нелинейная.

В пятой главе приведены рекомендации по снижению шума в аэропортах и апробация предложенных решений. Был определен экранирующий эффект зданий и сооружений в зависимости от их расположения и размеров, составивший от 18 до 25 дБА (на фасадах зданий, противоположных ВПП). Проверка расчетных формул показала, что отклонение расчетных данных от экспериментальных находится в пределах ± 3 дБ (таблица 2).

Таблица 2 - Данные измерений и расчетов у фасада здания, противоположного ВПП, в зоне «глубокой акустической тени»

Результаты расчетов и измерений	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Эквивалентный УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Результаты расчета по формуле (2)	64	69	69	65	52	47	33	25	59
Результаты расчета по ГОСТ 31295.2	58	70	67	65	55	49	29	21	64
Результаты измерений	66	71	69	63	55	46	35	27	60

По результатам выполненных исследований, а также с учетом предшествующего опыта, автором разработаны рекомендации по снижению шума вблизи аэропортов (рисунок 9), включающие организационные меры (введение ограничений на эксплуатацию самолетов, введение ограничений на взлеты и посадки воздушных судов, использование «правила периметра», введение платы за отклонение от установленных трасс пролета воздушных судов, ограничение интенсивности полетов, смещение точки взлета (посадки) воздушного судна относительно кромки ВПП, запрет полетов в ночной период времени), технические решения (установка акустических экранов, устройство шумозащитного остекления в близлежащих жилых домах, применение оконного заполнения с повышенной звукоизоляцией в нормируемых по шуму зданиях на территории аэропорта, использование

экранирующего эффекта зданий и других сооружений вдоль ВПП) и организационно-технические мероприятия (выделение маршрутов с минимальными уровнями шума, буксировка ВС (без включения силовой установки), разработка проектов СЗЗ, установка систем мониторинга шума, установка малозумных стандартных маршрутов взлета/посадки (трасс полета).

Подробно описаны технические и другие меры по обеспечению малозумных трасс полета: выбор точек мониторинга шума, требования к программам мониторинга, требования к акустической аппаратуре и персоналу; Показано, что выполнение предложенных требований (на примере аэропорта «Пулков») обеспечивает снижение акустической нагрузки в близрасположенной к аэропорту жилой застройке на 7-9 дБА.

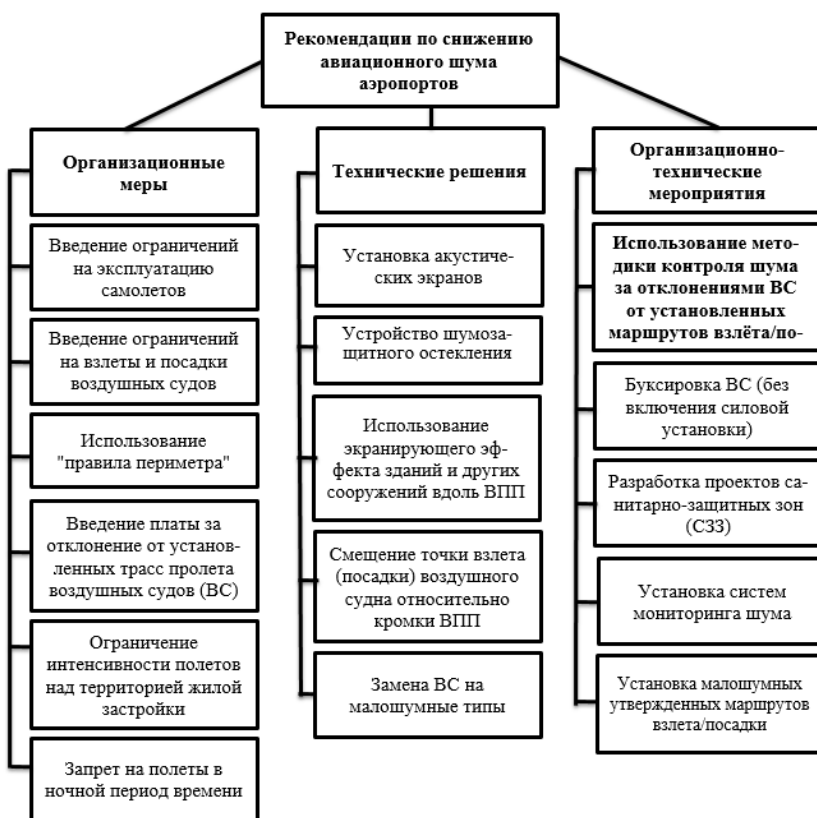


Рисунок 9 – Рекомендации по снижению авиационного шума аэропортов

Основные выводы и результаты

1. Согласно результатам экспериментальных исследований авиационного шума вблизи аэропорта «Пулково» эквивалентные УЗ в жилой застройке вблизи аэропорта составили 60-68 дБА в дневное время и 49-60 дБА в ночное время. Превышения полученных значений над санитарными нормами составили 5-13 дБА для дневного времени и 4-15 дБА - для ночного времени, что подтверждает актуальность проблемы снижения авиационного шума в жилой застройке вблизи аэропортов. В точках контроля за рассматриваемый период измерений уровни шума были превышены в 73% случаев (2326 событий из 3181 пролетов воздушных судов над селитебной территорией);

2. Для формализации понятия жилой застройки «вблизи аэропортов» автором предложено рассматривать территорию, на которой эквивалентный уровень звука в дневное время больше или равен 60 дБА, а в ночное время больше или равен 50 дБА.

3. Акустическое воздействие различных типов воздушных судов определялось путем измерения авиационного шума в 10 точках контроля на территории жилой застройки, расположенной вблизи аэропорта в западном и восточном направлении. В ходе проведения замеров были определены типы и акустические характеристики воздушных судов. Исходя из анализа, получен вывод, что самыми шумными типами воздушных судов являются самолёты А319, А320, В735 и В73Н.

4. Установлено, что наибольший шум излучается воздушными судами (ВС) при разбеге самолетов по взлетно-посадочной полосе (ВПП), причем в процессе шумообразования кроме ВС участвует ВПП, представляемая набором точечных, мнимых источников шума. При увеличении скорости разбега, а также мощности двигателей ВС, шум возрастает примерно на 10 дБА, а УЗ в контрольных точках возрастает до 85 дБА, при посадке УЗ в контрольных точках на 10-15 дБА ниже, чем при взлете, изменяясь примерно с 73 до 66 дБА при режиме приземления. Один из путей снижения шума при разбеге по ВПП – экранирование зданиями и сооружениями.

5. Проанализирован характер снижения уровней звука в момент разбега воздушных судов по взлетно-посадочной полосе с удвоением расстояния от ВПП в пределах 100–800 м. Установлено, что уменьшение УЗ при увеличении расстояния от ВПП в границах аэропортов определяется в основном дивергенцией звука, которая носит сложный характер. Установлено снижение УЗ на 3 дБА (характерное для цилиндрической звуковой волны) при удвоении расстояния от ВС до точки измерения от 100 до 200 м; снижение УЗ на 4-5 дБА при удвоении расстояния с 200 до 400 м (квазичилиндрический фронт звуковой волны); снижение УЗ на 5-7 дБА при увеличении расстояния с 400 до 800 м (характерное для сферической звуковой волны). При увеличении расстояния от аэропорта до 25 км зафиксировано снижение УЗ приблизительно на 15 дБА, это предполагает, что на больших расстояниях сферическая звуковая волна переходит в

плоскую, а снижение УЗ определяется, в основном, молекулярным затуханием звука в воздухе.

6. Разработана методика измерений авиационного шума, учитывающая влияние траекторий полетов на шум аэропорта. Данная методика позволяет при наличии данных о ВС, отклонившихся от стандартных маршрутов взлета, и данных о шуме на ближайшей к аэропорту селитебной территории, аргументированно установить, что является причиной повышения уровней шума на приаэродромной территории. Из полученных данных мониторинга авиационного шума следует, что отклонившиеся от установленных маршрутов взлета воздушные суда увеличивали шумовое воздействие на нормируемые объекты на 7-9 дБА;

7. При выводе формул, учитывающих экранирующий эффект сооружений, были приняты допущения, основным из которых является аппроксимация источника шума (воздушного судна в момент разбега по взлетно-посадочной полосе), линейным источником, фронт звуковой волны которого цилиндрический или квазичилиндрический. Вывод формул выполнен методом последовательного преобразования звуковых полей;

8. В полученных формулах учтены пространственный угол излучения, расстояние от воздушного судна до экранирующего сооружения (ЭС) и от ЭС до расчетной точки, ширина, высота, и показатель дифракции ЭС, а также звукопоглощающие свойства его фасада.

9. Выполненными теоретическими исследованиями установлено, что характер изменения спектра шума за экранирующим сооружением имеет закономерность увеличения эффективности по закону 3 дБ на каждую октавную полосу частот. Закономерность увеличения эффективности ЭС в дБА по высоте или ширине имеет нелинейный характер, в частности, получено, что увеличение эффективности на 3 дБА достигается только при удвоении рассматриваемого параметра (например, ширины с 5 до 10 м или высоты с 20 до 40 м), при небольших увеличениях рассматриваемых параметров, например, ширины с 10 до 15 м или высоты с 20 до 25 м отмечается, что изменение эффективности не превышает 1 дБА;

10. По результатам выполненных исследований автором разработаны рекомендации по снижению шума в аэропорту и вблизи аэропорта, включающие организационные меры (введение ограничений на эксплуатацию самолетов, введение ограничений на взлеты и посадки воздушных судов, использование «правила периметра», введение платы за отклонение от установленных трасс пролета ВС, ограничение интенсивности полетов, смещение точки взлета/посадки воздушного судна относительно входной кромки ВПП, запрет полетов в ночной период времени), технические решения (установка АЭ в местах испытаний двигателей, установка шумозащитного остекления, использование экранирующего эффекта зданий и других сооружений вдоль ВПП) и организационно-технические мероприятия (использование методики контроля шума за отклонениями ВС от установленных маршрутов взлёта/посадки, буксировка ВС (без включения силовой установки), разработка проектов СЗЗ,

применение систем мониторинга шума, разработка и внедрение малолетных стандартных маршрутов взлета/посадки;

11. Разработана методика контроля шума по обеспечению малолетных трасс пролета: на примере аэропорта «Пулково» описаны требования к выбору точек мониторинга шума, требования к программам мониторинга, требования к акустической аппаратуре и персоналу и другие детали методики; показано, что выполнение предложенных рекомендаций обеспечивает снижение акустической нагрузки в близрасположенной к аэропорту жилой застройке на 7-9 дБА;

12. На основании экспериментальных исследований определен экранирующий эффект зданий, который в зависимости от расположения и размеров сооружения, составил от 18 до 25 дБА, получена удовлетворительная сходимость результатов расчета и экспериментальных данных.

Внедрение результатов исследования:

Результаты диссертационной работы «Контроль, оценка и снижение авиационного шума вблизи аэропортов» использованы в аэропорту «Пулково» при выполнении работ по разработке и внедрению методики измерения авиационного шума, учитывающей влияние отклонения воздушных судов от стандартных маршрутов взлета на шумовые контуры, а также была проведена апробация предложенной методики, позволившей оценить вклад воздушных судов, отклонившихся от стандартных маршрутов взлета, в шумовую нагрузку на селитебную территорию и разработать мероприятия по снижению воздействия авиационного шума на селитебную территорию, что подтверждается актом о внедрении результатов диссертационной работы.

Компанией ООО «ПКФ Цифровые Приборы» была использована методика мониторинга, которая позволяет учитывать влияние отклонения воздушных судов от стандартных маршрутов взлета на создаваемую акустическую нагрузку на селитебной территории, авиационного шума измерительными станциями, которые производит данная компания. Данные станции мониторинга внедрены на территории аэропорта «Пулково», а рекомендации, предложенные в диссертационной работе, внедрены в процедуры измерения авиационного шума вблизи аэропортов, что также подтверждается актом о внедрении результатов диссертационной работы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Фиев, К. П. Учет погрешностей при построении карт шума / М.В. Буторина, А.В. Осетров, В.В. Светлов, К.П. Фиев // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6, №4. – с. 81-89.

2. Фиев, К.П. Мониторинг авиационного шума и выявление типов воздушных судов, оказывающих воздействие на селитебную территорию, вблизи аэропорта/ К.П. Фиев // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7 №2. – с. 139-150.

3. Фиев, К. П. Характер снижения авиационного шума с увеличением расстояния от летательного аппарата / К.П. Фиев, Н.И. Иванов, Н.В. Тюрина // Noise Theory and Practice. – 2024. – Т. 10 №2. – с. 88-100.

4. Фиев, К.П. Расчет и исследование экранирующего эффекта сооружений при разбеге самолетов гражданской авиации / К.П. Фиев, М.В. Буторина, Н.В. Тюрина // Noise Theory and Practice. – 2024. – Т. 10, №3. – с. 96-108.

Статьи, опубликованные в журнале, индексируемом в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.

5. Fiev, K. Calculation of the noise contours of a civil aviation airport // Konstantin Fiev, Aleksandr Shashurin, Marina Butorina, Nickolay Ivanov / AKUSTIKA, Paper No.325/2021 – April 2021 – p. 33-37 – DOI: 10.36336/akustika20213933.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

6. Фиев, К.П. Методика измерений уровней АШ с целью оценки его влияния на приаэродромную территорию при отклонении фактической линии пути от установленных процедур взлета // В.В. Светлов и К.П. Фиев/ Защита от повышенного шума и вибрации: Сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 2016 года / под редакцией Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью "Айсинг", 2016. – с. 357 - 360.

7. Фиев, К.П. Методика измерения авиационного шума, учитывающая влияние отклонения воздушных судов от стандартных маршрутов взлёта / К.П. Фиев, В.В. Светлов// статья в сборнике трудов третьей Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания». – 2018. – АСО-2018. Москва. – с. 234 – 240.

Издательство Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова. 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1.
Подписано в печать 14.01.2025. Формат 60х90/16. Бумага документная.
Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 10

Отпечатано в типографии БГТУ.
190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1