

УДК 534.83:539.433

Расчетно-экспериментальные исследования акустики и акустической прочности летательных аппаратов: обзор

А.С. Ходина

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Overview: computational and experimental research in studying acoustics and acoustic strength of the flying vehicles

A.S. Khodina

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Необходимость совершенствования авиационной техники ставит перед инженерами сложные задачи, в решении которых все большее значение имеет математическое моделирование, расширяющее возможности проектирования летательных аппаратов. Шум оказывает негативное влияние на здоровье человека, поэтому одно из перспективных направлений модернизации авиационных конструкций связано со снижением его уровня в салоне летательного аппарата. Помимо того, что шум вызывает дискомфорт и оказывает пагубное влияние на организм, акустические нагрузки могут способствовать образованию усталостных трещин в конструкции планера, что недопустимо. Описаны основные подходы к изучению акустики и акустической прочности как экспериментальным путем, так и с использованием математического моделирования. Дан обзор методов снижения шума в салоне. Выявлены перспективные направления исследований в процессе проектирования и разработки расчетно-экспериментальных методов, позволяющих сократить количество натурных испытаний.

EDN: GOXWDA, <https://elibrary/goxwda>**Ключевые слова:** акустическая прочность, виброакустические нагрузки, звукоизоляция, натурные испытания, математическое моделирование

The need to improve aviation technology poses complex problems for the engineers. Mathematical simulation is becoming increasingly important in solving them as it expands possibilities in designing a flying vehicle. Noise is negatively effecting human health; therefore, one of the promising areas in modernizing the aviation structures is associated with reducing its level in the flying vehicle cabin. In addition to the fact that noise causes discomfort and has a detrimental effect on the body, acoustic loads could contribute to the fatigue cracks formation in the airframe structure, which is unacceptable. The paper describes main approaches to studying acoustics and acoustic strength both experimentally and using the mathematical simulation. It provides an overview of methods to reduce noise in a cabin. Promising research areas are identified. Literature analysis demonstrates the relevance of using numerical calculation in the design and development of the computation and experimental methods making it possible to reduce the number of full-scale testing.

EDN: GOXWDA, <https://elibrary/goxwda>**Keywords:** acoustic strength, vibroacoustic loads, sound insulation, full-scale testing, mathematical simulation

Авиационный шум негативно влияет на здоровье и комфорт пассажиров [1]. Снижение уровня шума стало приоритетной задачей авиационной отрасли в последние десятилетия. Важно отметить, что уменьшение уровня шума в авиации — сложный и многогранный процесс, обусловленный необходимостью создания максимально безопасного, высокоресурсного, экономически эффективного и комфортного воздушного судна в условиях конкуренции и динамично развивающегося рынка.

Научные исследования и разработки в области авиационной виброакустики, использование комбинаций различных технологий и методов снижения шума могут существенно улучшить качество перелетов, обеспечить более комфортные условия и безопасность для пассажиров во время полета.

Существуют различные эффективные способы снижения шума в летательных аппаратах (ЛА): использование шумопоглощающих покрытий и панелей; активное и адаптивное шумоподавление, позволяющее создавать антиволну шума; улучшение аэродинамических характеристик для уменьшения сопротивления воздуха; оптимизация конструкции двигателей, вентиляторов, компрессоров и т. д. Процесс улучшения сопровождается расчетно-экспериментальными исследованиями, связанными как с уровнем шума, так и с определением ресурса конструкции.

Цель работы — выявление тенденций и перспективных направлений в области акустики и акустической прочности воздушных судов на основе проанализированной, систематизированной и обобщенной информации. В обзоре рассмотрены различные аспекты проблемы, связанной с уменьшением уровня шума в ЛА при сохранении оптимальных прочностных и массовых характеристик.

Источники акустических нагрузок. Шум в салоне ЛА представляет собой комбинацию акустических возмущений от различных источников, к которым относятся: турбулентный пограничный слой на поверхности фюзеляжа [2–4]; система кондиционирования и вентиляции [5]; вибрационное воздействие двигателей [6]; акустическое воздействие силовой установки на фюзеляж [7]; авионика ЛА, различные системы и оборудование. Изменения характеристик самих источников возмущений являются затратными, поэтому наибольшее

внимание уделяется путям передачи вибраций и звука.

Экспериментальное исследование акустики. Восприятие звука человеком субъективно. Воздействие шума на него подчиняется закону Вебера — Фехнера, согласно которому слуховое ощущение громкости в первом приближении пропорционально логарифму звукового раздражения

$$L_p = 20 \lg \frac{\sigma_p}{\sigma_{p0}}, \text{ дБ},$$

где σ_p — уровень звукового давления, Па; σ_{p0} — пороговое значение звукового давления, $\sigma_{p0} = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Именно этот параметр звукового давления интересует исследователей при изучении шума в салоне. Допустимые максимальные значения зависят от типа и класса воздушного судна.

Для снижения уровня шума в салоне и определения акустической прочности планера необходимо проводить экспериментальные исследования различной направленности. Можно выделить три глобальных направления испытаний.

Первый тип испытаний позволяет измерить уровень шума и вибраций в ЛА, а также установить основные источники шума и вибраций. Аналогичные испытания после внесения изменений в конструкцию или добавления шумоизоляции предоставляют возможность оценить эффективность методов снижения шума.

В статье [8] выполнена оценка акустики кабины вертолета IAR PUMA 330, рассчитанного на шестнадцать пассажиров и трех членов экипажа. Длина воздушного судна составляет 18,22 м, высота — 5,14 м, диаметр несущего винта — 15,08 м, максимальная взлетная масса — 7400 кг, крейсерская скорость — 263 км/ч. ЛА оснащен двумя турбовальными установками TURMO IV-C со свободной турбиной мощностью 1175 кВт (1576 л.с.).

Первоначально проведены наземные акустические испытания вертолета в полетной конфигурации с выключенными двигателями на заводской взлетно-посадочной полосе. Два генерирующих шум громкоговорителя устанавливали в направлении к двери вертолета, а весь дверной проем внутри салона сканировали с помощью датчика интенсивности 50AI GRAS. Три микрофона 40AQ размещали внутри вертолета, один — в его передней части, второй —

посередине, третий — сзади. Акустические сигналы регистрировали с помощью многоканальной системы сбора данных Sirius с частотой дискретизации 50 000 измерений в секунду.

На втором этапе измерения проводили с включенными двигателями, когда вертолет находился в фиксированной точке над землей (зависал), а затем при летных испытаниях, в ходе которых выполняли все маневры, осуществляемые во время эксплуатации вертолета. В семи зонах использовали шестнадцать микрофонов диффузионного поля типа 40AQ с предусилителем 26CA, которые устанавливали на специальные металлические опоры, прикрепленные к рамам вертолета.

В результате измерений установлено, что минимальный уровень звукового давления (97,2 дБ) возникает в хвостовой части вертолета, максимальный (106,5 дБ) — в зоне трансмиссии. Таким образом, основным источником шума этого вертолета является трансмиссия, а зоной пропускания звука — область дверей. Полученные данные позволяют сделать акцент на соответствующих зонах конструкции при акустическом проектировании.

Второй тип испытаний связан с разработкой заключений о летной годности и включает в себя анализ акустических нагрузок на конструкцию воздушного судна в целом и его отдельные компоненты.

Например, для определения акустических нагрузок на элементах механизации на базе ЛИ и ДК ОАО «ОКБ им. А.С. Яковлева» проведены наземные гонки двигателя PW1400G-JM на самолете MC-21-300 [9]. Испытания выполнены при различных режимах работы двигателя и уровнях отклонения механизации. С помощью приемников пульсаций давления LQ-2-500-25A выявлено, что в режиме без отклонения механизации наибольшие суммарные уровни пульсаций давления возникают на пилоне, а отклонение механизации сопровождается резким перераспределением акустических нагрузок на закрылке и нижней поверхности крыла.

В связи с необходимостью перехода на турбовентиляторные двигатели с большой степенью двухконтурности, обладающие хорошими показателями шума на местности, уровень низкочастотных составляющих структурного шума в салоне, сближающихся со спектром собственных частот ЛА, может превысить норму и вызвать вопросы о безопасности полетов [10]. Расширение вибрационного спектра со сдвигом

в область низких частот способствует разработке нового типа креплений двигателей, так как современная виброзащита обладает недостаточной эффективностью, особенно в зоне низких частот.

Третий тип испытаний предназначен для оценки звукопоглощающих свойств материалов и геометрических параметров конструкций, способствующих снижению шума, а также для изучения их прочностных характеристик.

Традиционные конструкционные материалы обладают достаточной прочностью, однако имеют недостаточные шумопоглощающие свойства, что приводит к необходимости использования дополнительных материалов, увеличивающих массу ЛА. Внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкцию планера позволяет снизить массу, но, в свою очередь, остро ставит вопрос долговечности изделий из ПКМ, в том числе при воздействии акустических нагрузок. Необходимым этапом становится получение кривых усталости на основе усталостных испытаний материалов, которые впоследствии можно использовать для валидации математических моделей [11].

Экспериментальные исследования конструктивно-подобных образцов соединения типа обшивка — стрингер с заданными внутренними дефектами от ударных повреждений с приложением виброакустических нагрузок способствуют созданию расчетных математических моделей развития повреждений в конструкциях из ПКМ. Исследованы девять образцов Т-образных элементов конструкции из ПКМ на основе углеродного и стеклянного волокон с различными ударными повреждениями от ударника диаметром 25 мм с энергией 20, 10 и 5 Дж. Выявлено постепенное снижение резонансной частоты от начала циклического нагружения до разрушения образца. Накапливаемая в ходе усталостных вибрационных испытаний энергия расходуется на раскрытие трещины (расслоения), образованной в результате удара [12].

Характер звукового воздействия на конструкцию имитировали путем приложения к образцам вибрационного нагружения. Во время испытаний каждый исследуемый образец оснащали одним датчиком вибрации и четырьмя тензодатчиками. Дополнительный датчик вибрации устанавливали на вибрационном столе для измерения задаваемого вибрационного воздействия.

Испытания, позволяющие определять оптимальные конструктивные решения [13–16], проводят на специализированной установке АК-11 (ЦАГИ). Уменьшение вибраций конструкции при ее облицовке вибропоглощающим материалом достигается увеличением энергетических потерь в покрытиях вследствие высокого внутреннего трения. Например, результаты натурных испытаний на установке АК-11 свидетельствуют об эффективности облицовки фюзеляжной панели вибропоглощающим материалом с металлическим армирующим слоем [17].

Материал такой облицовки состоит из вибропоглощающего слоя (термопластичного полиуретана ВТП-1В толщиной 1,5 мм) и армирующего слоя (алюминиевого сплава Д16-АТ толщиной 0,5 мм). Эксперименты проводили на типовой цилиндрической фюзеляжной панели в диффузном звуковом поле при различных вариантах размещения вибродемпфирующего материала. После нескольких десятков испытаний обнаружено, что облицовка улучшает звукоизоляцию тестовой панели в частотном диапазоне 250...800 Гц на 3...5 дБ, а наилучшие показатели достигаются при облицовке одновременно стрингеров, шпангоутов и шпаций.

Экспериментальное исследование современных типов акустических конструкций. В работе [18] описано исследование трех типов композитных конструкций с круглой микроперфорацией: комбинированной акустической конструкции, состоящей из двух параллельных микроперфорированных панелей (МПП) с разной перфорацией; МПП с пористым акустическим материалом в воздушной задней полости; МПП с «суперматериалом» из фононных кристаллов типа тонкой пластины, помещенным в заднюю полость. Структура таких конструкций показана на рис. 1, а их параметры — в табл. 1.

Фононные кристаллы — искусственно созданный материал с периодической структурой и массивом включений в масштабе длины волны. В однородных материалах длина волны звука линейно зависит от периода колебаний, однако в фононном кристалле зависимость становится нелинейной из-за интерференции звуковых волн. В фононном кристалле возникает зона частот, где волна частично отражается, а частично рассеивается в материале.

В качестве пористого материала использована меламиновая губка, представляющая со-

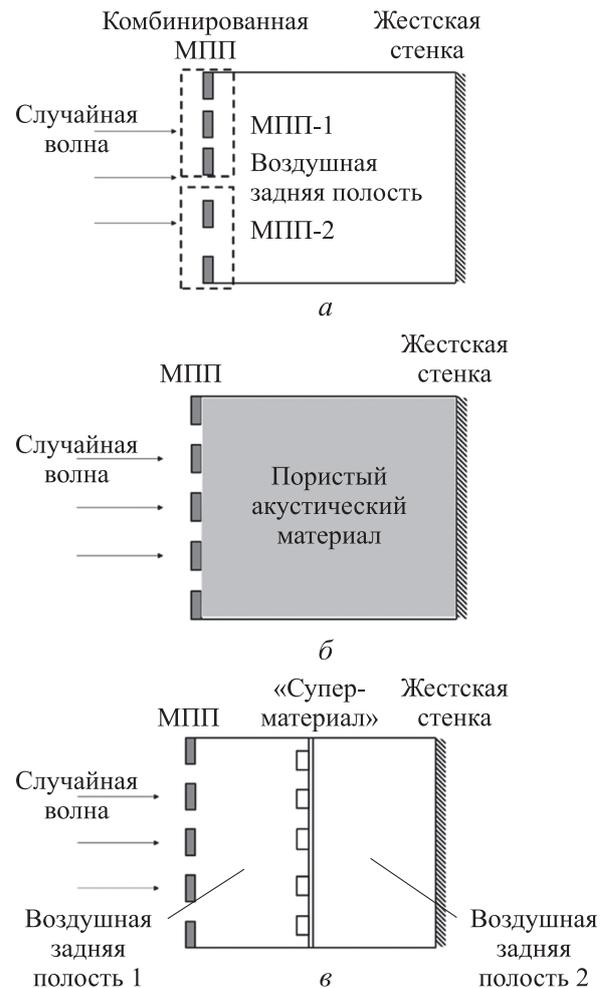


Рис. 1. Структура комбинированной МПП (а), МПП с пористым материалом (б) и МПП с «суперматериалом» (в)

Таблица 1

Параметры композитных конструкций с микроперфорацией

Параметр	Значение
<i>Комбинированная МПП</i>	
Диаметр пор МПП-1/МПП-2/, мм	0,40/0,57
Толщина панели, мм	1,0
<i>МПП с пористым материалом</i>	
Диаметр пор, мм	0,52
Толщина панели, мм	1,0
<i>МПП с «суперматериалом»</i>	
Диаметр пор, мм	0,53
Глубина первой/второй воздушной полости, мм	10/10
Толщина тонкой пластины, мм	0,2



Рис. 2. Фрагмент структуры «суперматериала»

бой пористый пенопластовый акустический материал с открытыми порами, а в качестве «суперматериала» — прямоугольная алюминиевая пластина с небольшими цилиндрическими железными блоками, фрагмент структуры которого показан на рис. 2.

Анализ результатов испытаний показал, что комбинированная акустическая структура панели с микроперфорацией и МПП с пористым материалом обеспечивают общее ослабление уровня звукового давления в салоне в среднем на 8...10 дБ в широком диапазоне частот 500...2000 Гц с амплитудой более 20 дБ. Микроперфорированная панель с акустическим «суперматериалом» обеспечивает низкочастотное звукопоглощение (до 50 %) в интервале частот 300...450 Гц. Также получены высокие показатели шумоподавления в диапазонах средних и высоких частот.

На основе описанных экспериментов можно заключить, что их использование эффективно снижает шум.

Исследование акустики методом математического моделирования. Акустическая и вибрационная нагрузки передаются двумя путями: по воздуху и структурным элементам, формируя акустическое поле в салоне ЛА, состоящее из комбинации прямых и отраженных акустических волн. Критерии шумового контроля и уровень акустического давления зависят от частоты, вследствие того, что значения длины волны при низких и высоких частотах различаются.

Например, малая длина волны на высоких частотах позволяет снижать уровень шума за счет внутренней структуры материала, что уже неэффективно для низких частот с длинными волнами. Для численного решения акустических задач применяют различные методы математического моделирования: метод конечных

элементов (МКЭ), метод статистического энергетического анализа (СЭА).

При решении задачи с помощью МКЭ к структурной сетке дополнительных требований не предъявляют, однако чтобы изучать акустику в салоне, необходимо создать специальную акустическую сетку, имитирующую воздух.

Размер такой сетки зависит от диапазона рассматриваемых частот. Согласно эмпирическому правилу, максимальный размер элемента акустической сетки

$$\frac{f_{\max} h}{v} < \frac{1}{6},$$

где f_{\max} — максимальная рассматриваемая частота, Гц; h — неизвестное значение максимального размера элемента, мм; v — скорость звука в среде, мм/с.

На длину волны должно приходиться не менее шести элементов [19]. С увеличением частоты размер элемента уменьшается, что повышает технические требования к вычислительным машинам. Поэтому МКЭ используют только в области низких частот (до 320 Гц). Например, для воздуха в нормальных условиях максимальный размер элемента акустической сетки при частоте 320 Гц составляет 177 мм, при 1000 Гц — 57 мм, а при 8000 Гц (часто рассматриваемых в натурных испытаниях ЛА) — 7 мм.

Учитывая объем, который должен быть заполнен воздухом, моделирование с помощью МКЭ в области высоких частот представляет собой нетривиальную задачу. Также существуют ограничения, связанные с отсутствием возможности учета потока в жидкостной среде для решения акустических задач. При наличии потока требуется другая формулировка волнового уравнения, которая изменяет распространение акустического возмущения в зависимости от типа потока (стационарного или нестационарного).

При наличии потока могут иметь значение аэроакустические явления, в некоторых ситуациях обтекание конструкции потоком может привести к образованию завихрений. Стандартные конечно-элементные комплексы не учитывают эти эффекты. Использование программного обеспечения для расчета гидродинамики (Computational Fluid Dynamics — CFD) также имеет ограничения для исследования акустических проблем, так как в нем применяют другие методы решения.

Изучение характеристик конструкций при высокочастотных воздействиях требует другого подхода. Статистический анализ предоставляет возможность получения зависимости реакции системы от ее параметров и основан на ее физических и геометрических свойствах. Это позволяет не только расширить исследуемый частотный диапазон, но и оценить влияние параметров проектируемой конструкции на ее отклик. Для решения акустических задач в СЭА используют уравнения баланса энергии. Однако в отличие от МКЭ СЭА допускает получение значений отклика для высоких частот.

В статье [20] рассмотрен подход Boeing Commercial Airplane к созданию акустической модели салона самолета для прогнозирования акустических свойств новых конфигураций салона до проведения натурных испытаний. Испытания являются финансово затратными, и любые изменения конструкции обходятся дорого. Используя инструменты акустического моделирования, можно изучать различные варианты конструкции салона до этапа создания прототипа, что сокращает затраты на его разработку.

Основные сложности заключаются в трудоемкости точного установления граничных условий для акустической модели, а также в вычислении количества шума, поглощаемого воздухом, сиденьями и поверхностями салона. При неточных граничных условиях результаты можно использовать только для прогнозирования тенденций, но не для определения того, будет ли конструкция соответствовать требованиям по шуму.

В ходе экспериментов выявлены точные граничные условия в салоне самолета с помощью откалиброванного источника звука. Чтобы использовать результаты МКЭ для оптимизации характеристик, веса и стоимости самолета, крайне важно быть уверенным в точности модели. Конкуренция за создание более тихих и комфортабельных самолетов ускоряет прогресс развития методов математического моделирования.

Математическое моделирование виброакустических материалов. Моделировать акустические процессы необходимо с учетом структуры шумопоглощающих материалов. В статье [21] описано исследование конструкции звукоизоляции из материалов с разными коэффициентами звукопоглощения (0,92 и 0,70) при ис-

пользовании программных комплексов ANSYS и SolidWorks.

В работе [22] рассмотрено моделирование пористых материалов. Результаты анализа показали, что решение задач, связанных с порупругой акустикой (с созданием более точных акустических моделей пористых материалов), становится возможным благодаря использованию модальных подходов как для акустической области, так и для пористой.

Инновационные подходы к решению задач акустики методом математического моделирования. Для решения задач численного моделирования акустической неустойчивости вихря Ренкина (математическая модель вихря в вязкой жидкости), шума авиационного винта и турбулентных струй в ЦАГИ разработан собственный комплекс программ [23]. Там же предпринята одна из первых в мире попыток расчета шума современного двухконтурного двигателя в режиме крейсерского полета при решении проблем влияния шума струи на уровень шума в салоне самолета.

В работе [24] описан важный шаг в разработке комбинированной активной шумо- и аудиосистемы для легкого реактивного самолета. Для подготовки к ее установке проведены испытания и расчет математической модели. Громкоговоритель 6ND430 Eighteen Sound использован для возбуждения системы белым случайным шумом с ограниченной полосой частот 0...800 Гц, акселерометр регистрировал мембранное ускорение громкоговорителя.

В COMSOL Multiphysics создана упрощенная геометрическая модель из 60 989 элементов, представляющая собой объем воздуха в салоне самолета. Результаты расчетов продемонстрировали высокий уровень сходимости с экспериментальными данными в области низких частот (до 300 Гц). Однако в диапазоне средних и высоких частот результаты имели высокую погрешность, что позволяет сделать качественную оценку, но не количественную.

Исследование акустической прочности методом математического моделирования. Усталостные разрушения элементов конструкции планера широко распространены, в связи чем продление срока службы ЛА является важной задачей в авиастроении. Согласно статистическим данным о повреждениях в процессе эксплуатации, чаще всего при действии акустиче-

ских нагрузок происходят разрушения заклепочного шва обшивки в верхней части крыла.

В настоящее время существуют программные комплексы для расчета ресурса конструкции с учетом акустической прочности [25]. На основании результатов исследования панелей обшивки крыла с различными вариантами усиления, а также усталостных испытаний типового заклепочного соединения определено, что использование вибропоглощающих покрытий может увеличить ресурс планера в 5 раз без изменения конструкции.

На сегодняшний день разрабатываются методы изучения поведения образцов при воздействии виброакустических нагрузок и устанавливаются зависимости усталостных повреждений от модальных характеристик путем численных расчетов.

В работе [26] проведено исследование отклика Т-образного элемента конструкции из материала, включающего в себя девять слоев ПКМ на основе углеродного и стеклянного волокон. Акустическое нагружение моделировали вибрационным воздействием с помощью функции спектральной плотности ускорений. Для валидации модели выполняли испытания на вибростенде. Сравнение полученных результатов показало хорошую сходимость расчетного (300 Гц) и экспериментального (296 Гц) значений первой резонансной частоты. Погрешность составила 1,3 %.

В настоящее время реализуются комплексы расчетно-экспериментальных работ по обеспечению акустической прочности конструкций гражданских самолетов, выполненных из ПКМ, на этапе разработки [27]. Подтверждение прочности и долговечности выполняется с помощью передовой концепции, называемой пирамидой исследований. Ее основой является поэтапное уточнение поведения конструкции на все более крупном масштабе при одновременном математическом моделировании с целью валидации.

Методы снижения уровня шума. Уменьшить уровень акустического давления в салоне ЛА можно различными способами: пассивными, активными и активно-пассивными. К пассивным методам относится использование разнообразных материалов. Значительное влияние на снижение шума оказывают пористые звукопоглощающие материалы, которые условно подразделяют на три группы: волокнистые, ячеистые и гранулированные [28]. Несмотря на

достоинства каждого из видов, самыми распространенными являются волокнистые материалы. Большое внимание уделяют использованию натуральных волокон вместо синтетических, которые не только решают проблемы акустики, но и делают производство более экономичным и экологичным.

В работе [29], напротив, рассмотрен подход к активному подавлению шума с помощью системы управления, которая включала в себя сегментированные пьезоэлектрические приводы типа I J31-modc, прикрепленные к фюзеляжу De Havilland Dash-8 серии 100/200. Для имитации внешнего поля давления использована система из четырех громкоговорителей, установленных на расстоянии приблизительно 25 мм от поверхности фюзеляжа. Приводы прикрепляли к фюзеляжу с помощью токопроводящей эпоксидной смолы Вирах ВА-2902. Чтобы контролировать эффективность шумоподавления, устанавливали микрофоны.

Анализ результатов этого исследования показал, что активные системы структурного акустического контроля способны обеспечить значительное снижение шума (в среднем на 28 дБ во всем салоне) и подавление вибрации конструкции в салоне самолета. Однако они не универсальны и не гасят весь спектр шума.

Работа [30] также посвящена активному снижению шума в салоне самолета с помощью умных панелей с активным управлением. В области низких частот (до 500 Гц) методы пассивной звукоизоляции обычно несовместимы с ограничениями по массе и объему воздушных судов. В предложенной работе описан эксперимент на опытном самолете DLR Dornier Do728, результаты которого показали, что уровень звукового давления в салоне в среднем снизился на 10 дБ.

Опытный самолет Dornier Do728 DLR представляет собой наземную испытательную установку с полной конструкцией и полностью оборудованной кабиной. Микрофонный блок с восемнадцатью микрофонами типа PCB T130D21 расположен в салоне перед облицовкой на высоте около 1,2 м. Входными данными для цифровой обработки сигналов являются сигналы микрофона и информация о частотах возбуждения. Усиленные сигналы управления подаются на приводы интеллектуальной облицовки.

Синтез расчетного распределения давления на фюзеляже выполнен с помощью системы

Таблица 2

Уровни звукового давления и их снижение в контролируемой зоне

Микрофон	АД, дБ	САД, дБ	Микрофон	АД, дБ	САД, дБ	Микрофон	АД, дБ	САД, дБ
М1	80,4	9,3	М7	79,4	11,3	М13	70,7	3,7
М2	77,4	7,9	М8	79,9	9,9	М14	70,9	4,3
М3	77,9	9,1	М9	81,0	8,5	М15	72,6	3,4
М4	79,1	9,7	М10	75,2	3,6	М16	73,6	3,0
М5	77,9	8,2	М11	73,0	3,8	М17	74,0	2,2
М6	80,2	9,2	М12	71,5	3,2	М18	74,5	2,2

Таблица 3

Параметры пьезоэлектрических материалов

Параметр	Вид материала	
	Поливинилиденфторид	Цирконат-титанат свинца
Плотность, кг/м ³	1780	7500
Относительная диэлектрическая проницаемость	12	1200
Акустический импеданс (акустическое сопротивление среды), кг/(м ² ·с)	2,7	30

громкоговорителей и метода реконструкции звукового поля. В контролируемой зоне достигалось максимальное снижение уровня шума на 11,3 дБ. Среднее снижение уровня шума на семнадцати микрофонах составило 6,8 дБ. Результаты измерения акустического давления (АД) и его снижения (САД) для всех микрофонов приведены в табл. 2.

Акустический метаматериал — искусственно созданный структурированный материал, который обладает отрицательными инерционными и упругими свойствами (либо по отдельности, либо одновременно). Исследование [31] сосредоточено на разработке нового класса акустических метаматериалов для подавления шума, достигающего пассажирского салона. Работы по проектированию и моделированию выполнены с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Используются специальные конструкции, включающие в себя натянутые мембраны в воздуховодах, которые работали как фильтр высоких частот, отсекающих шум ниже резонансной частоты мембраны.

Перспективным является применение гибридного активно-пассивного метода снижения шума, например, современного инновационного материала «умная пена» [32–35]. Одним из ее основных преимуществ перед другими материалами является способность к самоадап-

тации. Она может изменять форму в зависимости от окружающих условий, что делает ее отличным амортизатором, способным поглощать звуки и вибрации.

Пассивным компонентом «умной пены» является пористый звукопоглощающий материал (например, пенополиуретан), активным — пьезоэлектрический материал. Примером пьезоэлектрических материалов служат поливинилиденфторид и цирконат-титанат свинца, параметры которых приведены в табл. 3.

Также перспективным материалом, хорошо поглощающим звук в области низких частот, является пористая резина, которая работает как мембранный поглотитель [36].

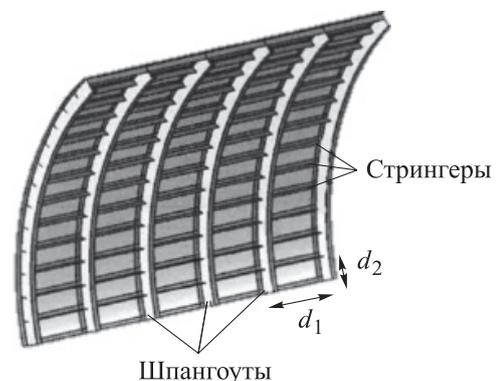


Рис. 3. Фрагмент бортовой конструкции фюзеляжа

Проектирование агрегатов систем кондиционирования и вентиляции следует выполнять с учетом требований по шуму. С точки зрения виброакустики этого можно достичь оптимизацией проточной части вентиляторов по критерию минимальной мощности акустического излучения [37]. Если данные требования невозможно обеспечить, то становится необходимой установка глушителей снаружи корпусов вентиляторов и в воздуховодах [38].

Также известно, что благодаря сокращению шага между ребрами жесткости d_1 и d_2 (рис. 3) при неизменной суммарной массе за счет пропорциональных изменений толщин шпангоутов и стрингеров можно снизить уровень акустического давления в салоне ЛА на 4 дБ [39].

Выводы

1. Рассмотрены основные аспекты исследования акустики и акустической прочности ЛА расчетными, экспериментальными и расчетно-экспериментальными методами.

2. Выявлены следующие тенденции и закономерности, которые могут быть полезны для дальнейших разработок в данной области:

- глобальные изменения конструкций воздушных судов, связанные с переходом на двигатели с большой степенью двухконтурности, приводят к необходимости проведения большего количества новых исследований; в связи с этим существует потребность в разработке новых креплений двигателей, способных за счет снижения степени низкочастотных составляющих структурного шума в салоне обеспечить комфорт и безопасность полета;

- наблюдается тенденция использования ПКМ в конструкции воздушных судов; в условиях малого отечественного опыта по обеспечению усталостной долговечности при дей-

ствии акустических нагрузок на конструкции из ПКМ требуется проведение комплекса расчетно-экспериментальных исследований;

- большая часть используемых методов снижения шума в салоне воздушного судна способствует увеличению массы конечного продукта; поэтому актуальной остается разработка новых конструктивных решений, позволяющих уменьшить уровень акустического давления без утяжеления воздушного судна, особенно в области низких частот;

- эффективность методов математического моделирования достигается проведением большого количества испытаний; как следствие, ввиду сложности точного воссоздания граничных условий с помощью современных решателей, учета отражения/поглощения звуковых волн и ограниченного объема информации о параметрах материалов ЛА (например, демпфирующих свойств ПКМ) невозможно заменить натурные испытания виртуальными, требуется уточнение математических моделей;

- представляет интерес исследование и моделирование звукоизоляционных материалов с различной структурой и численное определение их акустических параметров; испытания звукоизолирующих материалов не дают гарантии эффективного снижения шума в салоне, так как во время классических экспериментов получают коэффициент звукопоглощения от нагрузок, направления которых не совпадают с реальными; это приводит к необходимости полномасштабных испытаний; вследствие высокой стоимости натурных испытаний полноценных изделий актуальным направлением является создание нового подхода экспериментального исследования образцов, а также всестороннего изучения материалов с использованием программных комплексов.

Литература

- [1] Castelo Branco N.A.A., Alves-Pereira M. Vibroacoustic disease — current concept. *Proc. 11th Int. Congress on Sound and Vibration*. Sankt-Petersburg, 2004, pp. 1775–1782.
- [2] Голубев А.Ю. Экспериментальная оценка волновых спектров пристенных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя в субконвективной области. *Акустический журнал*, 2012, т. 58, № 4, с. 434–442.
- [3] Ефимцов Б.М., Лазарев Л.А. Комплекс аналитических моделей для прогноза шума в салоне самолета. *Акустический журнал*, 2012, т. 58, № 4, с. 443–449.
- [4] Ефимцов Б.М., Лазарев Л.А. Расчет колебаний шпангоутов в подкрепленной оболочке, моделирующей фюзеляж самолета. *Акустический журнал*, 2014, т. 60, № 5, с. 518–525, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791914040042>

- [5] Шустров Ю.М., ред. *Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха*. Москва, Машиностроение, 2006. 382 с.
- [6] Бакланов В.С. Роль структурного шума в гермокабине самолета от вибрационного воздействия двигателей нового поколения. *Акустический журнал*, 2016, т. 62, № 4, с. 451–456, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791916040043>
- [7] Мунин А.Г., ред. *Авиационная акустика. Т. 2. Шум в салонах пассажирских самолетов*. Москва, Машиностроение, 1986. 258 с.
- [8] Deaconu M., Cican G., Toma A-C. et al. Helicopter inside cabin acoustic evaluation: a case study — IAR PUMA 330. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021, vol. 18, no. 18, art. 9716. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18189716>
- [9] Голубев А.Ю., Потокин Г.А. Определение акустических нагрузок на элементы механизации МС-21 в условиях наземных гонок. *Тез. док. шестой открытой всерос. конф. по аэроакустике*. Москва, ЦАГИ, 2019, с. 232–233.
- [10] Бакланов В.С. Виброакустика самолетов с двигателями нового поколения (проблемы и решения). *Ученые записки физического факультета московского университета*, 2017, № 5, ст. 1741401. URL: <http://uzmu.phys.msu.ru/file/2017/5/1751401.pdf>
- [11] Барышева Д.В., Гордон С.В., Ким Н.В. и др. Разработка расчетно-экспериментального подхода к анализу долговечности авиационных конструкций, подверженных воздействию повышенных акустических нагрузок. *Сборник тезисов всероссийского аэроакустического форума*. Геленджик, 2021, с. 217–219.
- [12] Дубинский С.В., Севастьянов Ф.С., Костенко В.М. и др. Исследование влияния ударных повреждений на усталостные характеристики композитного соединения «обшивка–стрингер» в условиях виброакустического нагружения. *Акустический журнал*, 2023, т. 69, № 2, с. 261–269, doi: <https://doi.org/10.31857/S0320791922600512>
- [13] Мошков П.А. Проблемы проектирования гражданских самолетов с учетом требований по шуму в салоне. *Вестник МАИ*, 2019, т. 26, № 4, с. 28–41, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2019-4-28-41>
- [14] Зверев А.Я., Черных В.В. Экспериментальное определение акустических и виброакустических характеристик многослойных композитных панелей. *Акустический журнал*, 2018, т. 64, № 6, с. 727–736, doi: <https://doi.org/10.1134/S0320791918060151>
- [15] Зверев А.Я., Черных В.В. Определение акустической эффективности материалов и конструкций в лабораторных и натурных условиях. Ч. 1. Звукопоглощение и звукоизоляция. *Ученые записки ЦАГИ*, 2018, т. 49, № 8, с. 40–55.
- [16] Зверев А.Я., Семенова Л.П. Определение акустической эффективности материалов и конструкций в лабораторных и натурных условиях. Ч. 2. Вибропоглощение. *Ученые записки ЦАГИ*, 2019, т. 50, № 1, с. 43–56.
- [17] Зверев А.Я., Лесных Т.О., Паранин Г.В. Исследование эффективности применения вибропоглощающего материала с армирующим слоем для повышения звукоизоляции элементов конструкции фюзеляжа. *Ученые записки ЦАГИ*, 2016, т. 47, № 2, с. 82–92.
- [18] Li C., Lu Y., Lan C., Wang Y. Noise reduction in helicopter cabins using microperforated panel composite sound absorption structures. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, no. 14, art. 8153, doi: <https://doi.org/10.3390/app13148153>
- [19] Bies D.A., Hansen C.H. *Engineering noise control*. CRC Press, 2009. 748 p.
- [20] Johnescu J.R. Modeling aircraft cabin noise. *Occupational Health & Safety*, 2003. URL: <https://ohsonline.com/Articles/2003/07/Modeling-Aircraft-Cabin-Noise.aspx>
- [21] Nagaraj P., Elmenshawy A.A.A.E., Alomar I. Vibroacoustic soundproofing for helicopter interior. *Aviation*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 57–66, doi: <https://doi.org/10.3846/aviation.2023.18629>
- [22] Rumpler R. *Efficient finite element approach for structural-acoustic applications including 3D modelling of sound absorbing porous materials*. Doctoral thesis. Royal Institute of Technology, 2012. 224 p.
- [23] Копьев В.Ф., Чернышев С.Л. Развитие методов вычислительной аэроакустики в ЦАГИ. *Тр. шестой межд. конф. Параллельные вычисления и задачи управления РАСО'2012*. Т. 3. Москва, ИПУ РАН, 2012, с. 254–265.
- [24] Teuma Tsafack F., Kochan K., Kletschkowski T. et al. Validation of the acoustic finite element model of a very light jet cavity mock-up. *COMSOL*, 2008. 7 p.

- [25] Рипецкий А.В. Расчет ресурса обшивки самолетной конструкции по условиям акустической прочности с использованием САПР. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2012, № 9, с. 246–250.
- [26] Дубинский С.В., Севастьянов Ф.С., Костенко В.М. и др. Расчетно-экспериментальное исследование влияния виброакустических нагрузок на прочность композитного соединения. *Акустический журнал*, 2019, т. 65, № 4, с. 460–470, doi: <https://doi.org/10.1134/S032079191904004X>
- [27] Барышева Д.В., Никитин Е.А., Ким Н.В. и др. *Реализация комплекса работ по обеспечению акустической прочности современного пассажирского самолета с композиционными материалами и двигателем отечественного производства*. URL: https://www.aviationunion.ru/upload/iblock/3d0/wbfapm9n5ab9ry3vum0aca73czrjzku/Rabota_Korporatsiya-Irkut_i-FAU-TSAGI.pdf (дата обращения: 15.06.2024).
- [28] Arenas J.P., Crocker M.J. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *J. Sound Vib.*, 2010, vol. 44, no. 7, pp. 12–17.
- [29] Zimcik D.G. Active control of aircraft cabin noise. *RTO AVT Symposium on Habitability of Combat and Transport Vehicles: Noise, Vibration and Motion*, 2004, art. RTO-MP-AVT-110. 17 p.
- [30] Malte M. Experiments on noise reduction in aircraft with active sidewall panels. *Hiroshima Calling*, 2018, vol. 2. URL: https://elib.dlr.de/121168/1/ICSV25_Misol.pdf (дата обращения: 15.06.2024).
- [31] Asarudheen Abdudeen, Jaber E. Abu Qudeiri, Aiman Ziout, Thanveer Ahammed. Design of acoustic metamaterials for cabin noise reduction and pressure sensing in propfan aircrafts. *ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conf.*, 2020, paper PVP2020-21793, V003T03A010, doi: <https://doi.org/10.1115/PVP2020-21793>
- [32] Зверев А.Я. Механизмы снижения шума в салоне самолета. *Акустический журнал*, 2016, т. 62, № 4, с. 474–479, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791916040183>
- [33] Griffin J.R. *The control of interior cabin noise due to a turbulent boundary layer noise excitation using smart foam elements*. Master thesis. Virginia Tech, 2006. 102 p.
- [34] Белов В.Д., Мигун Ю.Г., Орлов А.И. Гибридный активно-пассивный звукопоглотитель. *Акустический журнал*, 2012, т. 58, № 4, с. 419–424.
- [35] Cobo P., Cuesta M. Hybrid passive-active absorption of a microperforated panel in free field conditions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, vol. 121, no. 6, pp. 251–255, doi: <https://doi.org/10.1121/1.2739112>
- [36] Bolton J.S., Song J. Sound absorption characteristics of membrane-based sound absorbers. *Proc. Inter-Noise 2003*, paper N286. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/herrick/25> (дата обращения: 15.06.2024).
- [37] Аксенов А.А., Гаврилюк В.Н., Тимушев С.Ф. Численное моделирование тонального шума вентиляторов компьютерных устройств и систем кондиционирования. *Акустический журнал*, 2016, т. 62, № 4, с. 442–450, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791916040018>
- [38] *Руководство по расчету и проектированию шумоглушения вентиляционных установок*. Москва, Стройиздат, 1982. 87 с.
- [39] Ефимцов Б.М., Лазарев Л.А. Возможность снижения шума в салоне самолета от турбулентного пограничного слоя путем изменения подкрепляющего набора фюзеляжа при неизменной его массе. *Акустический журнал*, 2015, т. 61, № 5, с. 631–635, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791915040048>

References

- [1] Castelo Branco N.A.A., Alves-Pereira M. Vibroacoustic disease — current concept. *Proc. 11th Int. Congress on Sound and Vibration*. Sankt-Petersburg, 2004, pp. 1775–1782.
- [2] Golubev A.Yu. Experimental estimate of wave spectra of wall pressure fluctuations of the turbulent boundary layer in the subconvective region. *Akusticheskiy zhurnal*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 434–442. (In Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 396–403, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771012040070>)
- [3] Efimtsov B.M., Lazarev L.A. Complex of analytical models for predicting noise in an aircraft cabin. *Akusticheskiy zhurnal*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 443–449. (In Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 404–410, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771012040057>)

- [4] Efimtsov B.M., Lazarev L.A. Calculation of bulkhead vibrations in a supported shell simulating a plane fuselage. *Akusticheskiy zhurnal*, 2014, vol. 60, no. 5, pp. 518–525, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791914040042> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2014, vol. 60, no. 5, pp. 562–569, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771014040046>)
- [5] Shustrov Yu.M., ed. *Proektirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukh* [Design of aircraft systems for air conditioning]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 382 p. (In Russ.).
- [6] Baklanov V.S. Role of structural noise in aircraft pressure cockpit from vibration action of new-generation engines. *Akusticheskiy zhurnal*, 2016, vol. 62, no. 4, pp. 451–456, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791916040043> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2016, vol. 62, no. 4, pp. 456–461, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771016040047>)
- [7] Munin A.G., ed. *Aviatsionnaya akustika. T. 2. Shum v salonakh passazhirskikh samoletov* [Aviation acoustics. Vol. 2. Noise in aircraft passenger cabin]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 258 p. (In Russ.).
- [8] Deaconu M., Cican G., Toma A-C. et al. Helicopter inside cabin acoustic evaluation: a case study — IAR PUMA 330. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021, vol. 18, no. 18, art. 9716. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18189716>
- [9] Golubev A.Yu., Potokin G.A. [Determination of acoustic loads on MS-21 mechanisation elements under conditions of ground races]. *Tez. dok. shestoy otkrytoy vseros. konf. po aeroakustike* [Abs. 6th Open Russ. Conf. on Aeroacoustics]. Moscow, TsAGI Publ., 2019, pp. 232–233. (In Russ.).
- [10] Baklanov V.S. Vibroacoustics of aircraft with engines of a new generation (Problems and solutions). *Uchenye zapiski fizicheskogo fakulteta moskovskogo universiteta*, 2017, no. 5, art. 1741401. URL: <http://uzmu.phys.msu.ru/file/2017/5/1751401.pdf> (in Russ.).
- [11] Barysheva D.V., Gordon S.V., Kim N.V. et al. [Development of calculation-experimental approach to durability analysis of aircraft structures exposed to increased acoustic loads]. *Sbornik tezisev vserossiyskogo aeroakusticheskogo foruma* [Abs. Russ. Aeroacoustic Forum]. Gelendzhik, 2021, pp. 217–219. (In Russ.).
- [12] Dubinskiy S.V., Sevastyanov F.S., Kostenko V.M. et al. Impact damage influence investigations on the composite skin-stringer joint fatigue characteristics under conditions of vibroacoustic loading. *Akusticheskiy zhurnal*, 2023, vol. 69, no. 2, pp. 261–269, doi: <https://doi.org/10.31857/S0320791922600512> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2023, vol. 69, no. 2, pp. 270–277, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771023700616>)
- [13] Moshkov P.A. Problems of civil aircraft design with regard to cabin noise requirements. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2019, vol. 26, no. 4, pp. 28–41, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2019-4-28-41> (in Russ.).
- [14] Zverev A.Ya., Chernykh V.V. Experimental determination of acoustic and vibroacoustic characteristics of multilayer composite panels. *Akusticheskiy zhurnal*, 2018, vol. 64, no. 6, pp. 727–736, doi: <https://doi.org/10.1134/S0320791918060151> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2018, vol. 64, no. 6, pp. 750–759, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771018060143>)
- [15] Zverev A.Ya., Chernykh V.V. Determining acoustic efficiency of materials and structures in laboratory and real conditions. Part 1: Sound absorption and sound insulation. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2018, vol. 49, no. 8, pp. 40–55. (In Russ.). (Eng. version: *TsAGI Science Journal*, 2018, vol. 49, no. 8, pp. 841–859, doi: <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.2018029529>)
- [16] Zverev A.Ya., Semenova L.P. Determination of the acoustic efficiency of materials and structures in laboratory and real conditions. Part 2: Vibration absorption. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2019, vol. 50, no. 1, pp. 43–56. (In Russ.). Eng. version: *TsAGI Science Journal*, 2019, vol. 50, no. 1, pp. 53–69, doi: <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.2019030190>)
- [17] Zverev A.Ya., Lesnykh T.O., Pararin G.V. Investigation of the efficiency of application of a vibration-absorbing material with a reinforcing layer for improving sound insulation of structural elements of the fuselage. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2016, vol. 47, no. 2, pp. 82–92. (In Russ.). (Eng. version: *TsAGI Science Journal*, 2016, vol. 47, no. 2, pp. 223–236, doi: <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.2016017888>)
- [18] Li C., Lu Y., Lan C., Wang Y. Noise reduction in helicopter cabins using microperforated panel composite sound absorption structures. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, no. 14, art. 8153, doi: <https://doi.org/10.3390/app13148153>

- [19] Bies D.A., Hansen C.H. *Engineering noise control*. CRC Press, 2009. 748 p.
- [20] Johnescu J.R. Modeling aircraft cabin noise. *Occupational Health & Safety*, 2003. URL: <https://ohsonline.com/Articles/2003/07/Modeling-Aircraft-Cabin-Noise.aspx>
- [21] Nagaraj P., Elmenshawy A.A.A.E., Alomar I. Vibroacoustic soundproofing for helicopter interior. *Aviation*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 57–66, doi: <https://doi.org/10.3846/aviation.2023.18629>
- [22] Rumpler R. *Efficient finite element approach for structural-acoustic applicationns including 3D modelling of sound absorbing porous materials*. Doctoral thesis. Royal Institute of Technology, 2012. 224 p.
- [23] Kopyev V.F., Chernyshev S.L. [Development of methods of computational aeroacoustics in TsAGI]. *Tr. shestoy mezhd. konf. Parallelnye vychisleniya i zadachi upravleniya PACO'2012*. T. 3 [Proc. 6th Int. Conf. on Parallel Computing and Control Problems RASO'2012. Vol. 3]. Moscow, IPU RAN Publ., 2012, pp. 254–265. (In Russ.).
- [24] Teuma Tsafack F., Kochan K., Kletschkowski T. et al. Validation of the acoustic finite element model of a very light jet cavity mock-up. *COMSOL*, 2008. 7 p.
- [25] Ripetskiy A.V. CALS based acoustic life prediction to an aircraft skin. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskije nauki* [News of the Tula state university. Technical sciences], 2012, no. 9, pp. 246–250. (In Russ.).
- [26] Dubinskiy S.V., Sevastyanov F.S., Kostenko V.M. et al. A computational and experimental study of the effect of vibroacoustic loads on the structural performance of composite skin-stringer joint. *Akusticheskiy zhurnal*, 2019, vol. 65, no. 4, pp. 460–470, doi: <https://doi.org/10.1134/S032079191904004X> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2019, vol. 65, no. 4, pp. 359–368, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771019040043>)
- [27] Barysheva D.V., Nikitin E.A., Kim N.V. et al. *Implementation of a set of works to ensure acoustic strength of a modern passenger aircraft with composite materials and a domestically produced engine*. URL: https://www.aviationunion.ru/upload/iblock/3d0/wbfapm9n5ab9ry3vum0aca73czrjjzku/Rabota_Korporatsiya-Irkut_i-FAU-TSAGI.pdf (accessed: 15.06.2024). (In Russ.).
- [28] Arenas J.P., Crocker M.J. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *J. Sound Vib.*, 2010, vol. 44, no. 7, pp. 12–17.
- [29] Zimcik D.G. Active control of aircraft cabin noise. *RTO AVT Symposium on Habitability of Combat and Transport Vehicles: Noise, Vibration and Motion*, 2004, art. RTO-MP-AVT-110. 17 p.
- [30] Malte M. Experiments on noise reduction in aircraft with active sidewall panels *Hiroshima Calling*, 2018, vol. 2. URL: https://elib.dlr.de/121168/1/ICSV25_Misol.pdf (accessed: 15.06.2024).
- [31] Asarudheen Abdudeen, Jaber E. Abu Qudeiri, Aiman Ziout, Thanveer Ahammed. Design of acoustic metamaterials for cabin noise reduction and pressure sensing in propfan aircrafts. *ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conf.*, 2020, paper PVP2020-21793, V003T03A010, doi: <https://doi.org/10.1115/PVP2020-21793>
- [32] Zverev A.Ya. Noise control mechanisms of inside aircraft. *Akusticheskiy zhurnal*, 2016, vol. 62, no. 4, pp. 474–479, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791916040183> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2016, vol. 62, no. 4, pp. 478–482, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771016040187>)
- [33] Griffin J.R. The control of interior cabin noise due to a turbulent boundary layer noise excitation using smart foam elements. Master thesis. *Virginia Tech*, 2006. 102 p.
- [34] Belov V.D., Migun Yu.G., Orlov A.I. A hybrid active-passive sound absorber. *Akusticheskiy zhurnal*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 419–424. (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 381–386, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771012040033>)
- [35] Cobo P., Cuesta M. Hybrid passive-active absorption of a microperforated panel in free field conditions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, vol. 121, no. 6, pp. 251–255, doi: <https://doi.org/10.1121/1.2739112>
- [36] Bolton J.S., Song J. Sound absorption characteristics of membrane-based sound absorbers. *Proc. Inter-Noise 2003*, paper N286. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/herrick/25> (accessed: 15.06.2024).
- [37] Aksenov A.A., Gavrilyuk V.N., Timushev S.F. Numerical simulation of tonal fan noise of computers and air conditioning systems. *Akusticheskiy zhurnal*, 2016, vol. 62, no. 4, pp. 442–450, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791916040018> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2016, vol. 62, no. 4, pp. 447–455, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771016040011>)

- [38] *Rukovodstvo po raschetu i proektirovaniyu shumoglusheniya ventilyatsionnykh ustanovok* [Guidelines for calculation and design of noise attenuation of air handling units]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 87 p. (In Russ.).
- [39] Efimtsov B.M., Lazarev L.A. The possibility of reducing the noise produced in an airplane cabin by the turbulent boundary layer by varying the fuselage stiffening set with its mass being invariant. *Akusticheskiy zhurnal*, 2015, vol. 61, no. 5, pp. 631–635, doi: <https://doi.org/10.7868/S0320791915040048> (in Russ.). (Eng. version: *Acoust. Phys.*, 2015, vol. 61, no. 5, pp. 580–584, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063771015040041>)

Статья поступила в редакцию 09.07.2024

Информация об авторе

ХОДИНА Анастасия Сергеевна — инженер лаборатории № 2 «Композиционные материалы и конструкции» НИО-101. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: khodinaas@mai.ru).

Information about the author

KNODINA Anastasia Sergeevna — Engineer, Laboratory No. 2 «Composite Materials and Structures» NIO-101. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: khodinaas@mai.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ходина А.С. Расчетно-экспериментальные исследования акустики и акустической прочности летательных аппаратов: обзор. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 11, с. 139–152.

Please cite this article in English as:

Khodina A.S. Overview: computational and experimental research in studying acoustics and acoustic strength of the flying vehicles. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 11, pp. 139–152.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебник В.В. Девяткова «Системы искусственного интеллекта»

Исследованы системы искусственного интеллекта как сообщества рассуждающих агентов. Каждый агент имеет возможность восприятия состояния среды, в которой он находится, и воздействия на нее с помощью реакций, вырабатываемых в результате осуществляемого им рассуждения в том или ином исчислении, на языке которого представляются знания агента. Создание системы искусственного интеллекта рассматривается как задача построения процедур такого рассуждения.

Для студентов и аспирантов вузов, обучающихся по специальностям «Информационные системы и технологии» и «Автоматизированные системы обработки информации и управления» по направлениям подготовки «Информационные системы» и «Информатика и вычислительная техника».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>