

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
 Russian Journal of Astrophysical Research. Series A
 Issued since 2013.
 E-ISSN: 2413-7499
 2025. 11(1): 14-18

DOI: 10.13187/rjar.2025.1.14
<https://rjar.cherkasgu.press>



Soundproofing of Spacecraft

Roman A. Chesnokov ^{a,*}, Bogdan A. Zelenov ^a

^aRyazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russian Federation

Abstract

This article provides a comprehensive study of acoustic protection methods used in the design of manned spacecraft. It traces the historical development of noise mitigation strategies: from local solutions used in the early stages of space exploration to the emergence of a comprehensive engineering methodology. The central focus of the study is a comparative analysis of passive and active noise reduction technologies, identifying their key parameters, limitations, and optimal applications, taking into account the specific requirements of space technology. The study concludes that a hybrid approach, integrating the advantages of passive damping and active suppression of low-frequency acoustic vibrations, offers promise for ensuring comfortable conditions for crews and maintaining the functionality of onboard systems.

Keywords: vibroacoustics, spacecraft, noise insulation, sound-absorbing materials, active noise reduction.

1. Введение

Виброакустическое воздействие на элементы конструкции летательных аппаратов является одной из причин появления большого количества аварийных и внештатных ситуаций. Главной его особенностью является комплексное воздействие, когда автономная отработка отдельных агрегатов и систем не дает гарантии от выхода их из строя во время полета. Этой проблеме и посвящена данная работа.

2. Обсуждение

Возникновение проблемы акустического воздействия на элементы конструкции космических аппаратов и членов экипажа относится к начальному периоду развития космонавтики. В ходе реализации первых пилотируемых экспедиций (таких как «Восток» и «Меркурий») вопросы шумоподавления еще не были сформированы в качестве самостоятельной инженерной дисциплины. Ключевыми источниками генерации акустических воздействий выступали силовые установки космических аппаратов, а также аэродинамические силы, возникающие при преодолении плотных слоев атмосферы (Болховитинов и др., 2006). В этих условиях защита астронавтов обеспечивалась преимущественно за счет применения специальных скафандров и кресел, оснащенных вибропоглощающими элементами. Системный подход к решению этой проблемы начал зарождаться вместе с программой «Аполлон», в рамках которой было выявлено что повышенный уровень шума является существенным фактором риска как для целостности

* Corresponding author

E-mail addresses: ra.chesnokov@yandex.ru (R.A. Chesnokov)

бортового оборудования, так и физического состояния экипажа (Парахин, 2021). Именно после выполнения данной миссии в практику проектирования космических аппаратов стали внедряться пассивные методы снижения шума, такие как монтаж перфорированных акустических панелей в жилых отсеках и нанесение демпфирующих материалов на структурные элементы корпуса.

3. Результаты

Современные методы шумоизоляции космических кораблей можно разделить на две категории: активные и пассивные. Пассивная шумоизоляция является наиболее отработанной и широко применяемой, она включает в себя следующие подходы:

1) Применение звукопоглощающих материалов. Принцип действия данных материалов, к которым относятся волокнистые и пористые структуры, заключается в трансформации энергии акустических колебаний в тепловую. Эти материалы используются в качестве внутренней облицовки жилых отсеков и зон размещения бортовой аппаратуры. Наиболее типичными представителями класса звукопоглощающих материалов являются материалы на основе минеральных волокон и вспененных полимеров, например, меламиновой пены.

2) Виброизоляция конструкций и агрегатов. Основная задача этого метода заключается в устранении путей прямой передачи механических колебаний. Реализация этого метода обеспечивается за счет установки оборудования космического корабля на амортизаторы, а также применение демпфирующих элементов в соединениях элементов конструкции. Данный метод позволяет эффективно снизить уровень низкочастотных вибраций, передаваемых от двигательной установки и корпуса на чувствительные приборы и модули жизнеобеспечения (Жуков и др., 2021).

3) Массовые барьеры. Метод подразумевает использование тяжелых и плотных материалов (такие как свинцовые листы и слоистые сэндвич-панели) для создания препятствия на пути распространения звуковых волн. Несмотря на высокую эффективность, применение этого метода ограничено массогабаритными ограничениями, предъявляемыми к летательным аппаратам.

Сравнение этих подходов представлено в Таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ видов пассивной шумоизоляции

Критерий сравнения	Звукопоглощающие материалы	Виброизоляция	Массовые барьеры
Принцип действия	Рассеивание звуковой энергии в тепловую за счет структуры материала	Разрыв механического пути передачи вибраций с помощью упругих элементов.	Отражение звуковой энергии за счет высокой поверхностной плотности материалов.
Эффективность (диапазон частот)	Наиболее эффективны на средних и высоких частотах (более 500 Гц)	Наиболее эффективны на низких частотах (менее 500 Гц) и против вибраций.	Эффективны на всех частотах, но требуемая масса растет с понижением частоты.
Основные применяемые материалы	Вспененные полимеры, минеральная вата, стекловолно.	Резиновые амортизаторы, стальные пружины, виброизоляторы.	Свинцовые листы, тяжелые полимерные композиты, слоистые панели.

Критерий сравнения	Звукопоглощающие материалы	Виброизоляция	Массовые барьеры
Влияние на массу конструкции	От низкого до умеренного. Плотность применяемых материалов невысока.	Умеренное. Масса добавляется из-за виброизоляторов и креплений.	Очень высокое. Является основным ограничивающим фактором для применения.
Надежность и сложность исполнения	Высокая надежность. Нет движущихся частей и не требуют питания.	Высокая надежность при правильном расчете. Есть риск старения эластомеров.	Очень высокая надежность из-за крайне простой конструкции.
Области применения на корабле	Облицовка внутренних помещений, кожухи приборов.	Установка приборных рам, двигателей, насосов, кресел космонавтов.	Ограниченно применяются для локальной защиты важного оборудования от звукового давления.

Активные системы шумоподавления является перспективным направлением. Их принцип действия основан на генерации антиволны – звуковой волны, идентичной по амплитуде, но находящейся в противофазе по отношению к фазе волны подавляемого шума, что приводит к их взаимному гашению (Васильев, 2006). В основе этого метода лежит принцип волновой суперпозиции. Система в режиме реального времени с помощью датчика опорного шума анализирует спектр первичного нежелательного шума. Электронный блок управления анализирует полученные спектральные данные и создает цифровую копию этой волны, и инвертирует ее по фазе, после чего вторичный сигнал воспроизводится через акустический излучатель (например, динамик). При встрече в заданной области пространства первичная и вторичная звуковые волны интерферируют, что вызывает их взаимную нейтрализацию. Преимущества и недостатки активных систем представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Преимущества и недостатки активного шумоподавления

Преимущества (Потенциал)	Недостатки и ограничения (Риски)
Высокая эффективность на низких частотах (менее 500 Гц), где пассивные методы малоэффективны и громоздки.	Ограниченная зона действия. Подавление эффективно в небольшом пространстве.
Значительное снижение массогабаритных показателей по сравнению с пассивными барьерами для борьбы с шумами низких частот.	Сложность и стоимость. Требуется высокоточная электроника, сложные алгоритмы и отладка.
Адаптивность. Система может подстраиваться под изменение характеристик шума во времени.	Потребление энергии. Требуется электропитание, что создает дополнительную нагрузку на бортовую сеть.
Возможность целевого подавления.	Потенциальная нестабильность. Неправильная настройка алгоритма может привести к усилению шума, а не его подавлению.

Несмотря на то, что активные системы шумоподавления в настоящее время не являются штатным оборудованием на пилотируемых космических аппаратах, научно-

исследовательские работы в данной области ведутся достаточно интенсивно. Среди разрабатываемых направлений можно выделить несколько наиболее перспективных:

1) Локализованные системы для кабин и кресел. Интеграция излучателей и микрофонов в подголовник кресла или шлем скафандра для создания персональной акустической зоны.

2) Подавление низкочастотного гула от систем жизнеобеспечения (вентиляторы, насосы), который является постоянным источником раздражения (Васильев, 2006).

4. Заключение

На основе проведенного анализа исторического опыта и современных технических решений можно полагать, что для обеспечения комплексной шумоизоляции космических кораблей ближайшего будущего оптимальным решением является гибридная стратегия, сочетающая в себе использование методов пассивного шумоподавления и точечное применение активных систем шумоподавления. Пассивная изоляция должна оставаться основой как наиболее надежный способ защиты от широкополосного шума и вибраций. При этом активные системы целесообразно интегрировать для подавления низкочастотных компонентов шума в зоне непосредственной близости от рабочего места экипажа. Такой подход позволит достичь высокого акустического комфорта и безопасности без критичного увеличения массы космического корабля.

Литература

Болховитинов и др., 2006 – Болховитинов И.С. и др. Виброакустика космических аппаратов, транспортных машин и механизмов: учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2006. 148 с.

Васильев, 2006 – Васильев А.В. Снижение низкочастотного звука и вибрации энергетических установок. Дисс. ... д-ра техн. наук. СПб., 2006. 659 с.

Жуков и др., 2021 – Жуков Ю.А. и др. Виброзащита прецизионного оборудования космических аппаратов от внутренних источников возмущений // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5. № 4 (38). С. 217-226.

Парахин, 2021 – Парахин А.М. Защита от шума и вибрации. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. 65 с.

References

Bolkhovitinov i dr., 2006 – Bolkhovitinov, I.S. i dr. (2006). Vibroakustika kosmicheskikh apparatov, transportnykh mashin i mekhanizmov [Vibroacoustics of spacecraft, transport machines and mechanisms]: ucheb. posobie. SPb.: Balt. gos. tekhn. un-t. 148 p. [in Russian]

Parakhin, 2021 – Parakhin, A.M. (2021). Zashchita ot shuma i vibratsii [Noise and vibration protection]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU. 65 p. [in Russian]

Vasil'ev, 2006 – Vasil'ev, A.V. (2006). Snizhenie nizkochastotnogo zvuka i vibratsii energeticheskikh ustanovok [Reduction of low-frequency sound and vibration of power plants]. Diss. ... d-ra tekhn. nauk. SPb. 659 p. [in Russian]

Zhukov i dr., 2021 – Zhukov, Yu.A. i dr. (2021). Vibrozashchita pretsizionnogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov ot vnutrennikh istochnikov vozmushchenii [Vibration protection of precision spacecraft equipment from internal sources of disturbances]. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*. 5. 4(38): 217-226. [in Russian]

Шумоизоляция космических кораблей

Роман Анатольевич Чесноков ^{a, *}, Богдан Алексеевич Зеленев ^a

^a Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: ra.chesnokov@yandex.ru (Р.А. Чесноков)

Аннотация. В представленной статье осуществляется комплексное изучение методов акустической защиты, используемой при проектировании пилотируемых космических аппаратов. Прослежена историческая динамика развития стратегий противодействия шумовому воздействию: от локальных решений, применявшихся на ранних этапах освоения космоса, до появления целостной инженерной методологии. Центральное место в работе занимает сравнительная характеристика пассивных и активных технологий снижения шума, в рамках которой определены их ключевые параметры, ограничения и сферы оптимального применения с учетом специфических требований к космической технике. Результатом проведенного исследования является аргументированный вывод о перспективности гибридного подхода, интегрирующего достоинства пассивного демпфирования и активного подавления низкочастотных акустических колебаний с целью обеспечения нормальных условий для экипажа и сохранения функциональности бортовых систем.

Ключевые слова: виброакустика, космический корабль, шумоизоляция, звукопоглощающие материалы, активное шумоподавление.