

УДК: 534.6

OECD: 01.03.AA

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.002

Предварительные результаты валидации сферической микрофонной решетки для локализации источников шума в салонах летательных аппаратов

Мошков П.А.^{1*}, Стрелец Д.Ю.², Остроумов М.Н.³, Мязина Н.В.⁴, Софронов С.М.⁵

¹К.т.н, ведущий инженер,

²К.т.н, доцент, Директор дирекции Института №1 «Авиационная техника»,

³Инженер 1-й категории, ⁴Инженер 2-й категории, ⁵Инженер

^{1,3,4,5}НИО-101

¹⁻⁵Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), г. Москва, РФ

Аннотация

Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена необходимостью выполнения акустической доводки пассажирских салонов современных отечественных летательных аппаратов с применением технологии сферического бимформинга. При выполнении таких исследований аппаратно-программный комплекс должен пройти процедуру валидации в условиях заглушенной камеры. Целью настоящей работы является разработка методики и предварительный анализ результатов валидационных испытаний сферической микрофонной решетки МАИ, разработанной по технологии реверс-инжиниринга. Испытания выполнены в заглушенной камере НИИСФ РААСН на третьем этаже, который может рассматриваться как полностью заглушенное помещение. Разработана методика испытаний с учетом особенностей применения сферической решетки – локализации и ранжирования по интенсивности и/или звуковой мощности источников шума в салонах летательных аппаратов. Получены карты локализации источников шума и определен их относительный вклад в суммарное звуковое давление. Дальнейшие исследования будут направлены на выбор рациональных алгоритмов для локализации и ранжирования по интенсивности источников шума в салоне летательных аппаратов.

Ключевые слова: шум в салоне, сферическая микрофонная решетка, сферический бимформинг, локализация источников шума, шумовые карты, валидация

Preliminary validation results of a spherical microphone array for noise source localization in aircraft cabins

Moshkov P.A.^{1*}, Strelets D.Yu.², Ostroumov M.N.³, Myazina N.V.⁴, Sofronov S.M.⁵

¹Ph.D., Leading Engineer,

²Ph.D., Associate Professor, Director of the Directorate of Institute No. 1 "Aircraft Engineering",

³Engineer 1st Category, ⁴Engineer 2nd Category, ⁵Engineer

^{1,3,4,5}NIO-101 Department

¹⁻⁵Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Abstract

The relevance of the problem under consideration is due to the need for acoustic finishing of passenger cabins of modern domestic aircraft using spherical beamforming technology. When conducting such research, the hardware and software system must undergo a validation procedure in an anechoic chamber. The purpose of this work is to develop a test procedure and conduct a preliminary analysis of the validation test results of a spherical microphone array developed at MAI using reverse engineering technology. The tests were performed in an anechoic chamber of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAACS) on the third floor, which can be considered as a fully anechoic room. A test procedure has been developed taking into account the specific features of spherical array application - localization and ranking by intensity and/or sound power of noise sources in aircraft cabins. Noise source localization maps have been obtained and their relative contribution to the overall sound pressure level has been determined. Further research will be aimed at selecting rational algorithms for localization and ranking of noise sources by intensity in aircraft cabins.

Keywords: aircraft cabin noise, spherical microphone array, spherical beamforming, noise source localization, noise maps, validation

Введение

Важным этапом при проектировании современных летательных аппаратов (ЛА) является акустическая доводка пассажирского салона, которая заключается в корректировке схемы размещения акустических материалов в бортовой конструкции для управления шумом в салоне в условиях массовых и габаритных ограничений [1]-[3] по результатам натурного летного эксперимента.

Неотъемлемой частью таких исследований является локализация и ранжирование по интенсивности основных источников шума в салоне с применением технологии сферического бимформинга. Общее описание данной технологии и используемых алгоритмов подробно рассмотрено в работах [4]-[9].

В РФ ранее такие работы уже выполнялись на самолетах MC-21 [10], [11] в 2023 году, а впервые были выполнены на самолете RRJ-95 [12], [13] в 2019 году с применением зарубежных аппаратно-программных комплексов. Но с учетом импортозамещения как зарубежных систем на самолетах, так и систем виброакустических измерений данная проблема вновь становится актуальной.

Пассажирские салоны ЛА должны соответствовать требованиям ГОСТ 20296-2014 [14], а акустические материалы, применяемые в бортовой конструкции самолета, должны работать эффективно [15], [16]. При этом применение сферических многомикрофонных решеток в настоящее время является стандартизированной процедурой при выполнении виброакустических испытаний гражданских самолетов [17]. Правильная интерпретация результатов таких измерений позволяет скорректировать схему размещения акустических материалов в бортовой конструкции, обеспечив уменьшение их массы и уровней шума в салоне.

Целью работы является разработка методики и предварительный анализ результатов валидационных испытаний сферической микрофонной решетки МАИ, разработанной по технологии реверс-инжиниринга.

По аналогии с валидацией программного обеспечения в соответствии с ГОСТ Р 57700.2-2017 [18] можно дать определение валидации сферической микрофонной решетки в рамках настоящей работы.

Валидация сферической микрофонной решетки – это процесс определения

соответствия результатов визуализации звукового поля с применением технологии сферического бимформинга реальному звуковому полю в салоне ЛА. Валидация обеспечивает обоснование того, что сферическая решетка в заявленной области применения (частотный диапазон, динамический диапазон, пространственное разрешение и т.д.) позволяет правильно и с определенной точностью локализовать источники шума в салоне ЛА.

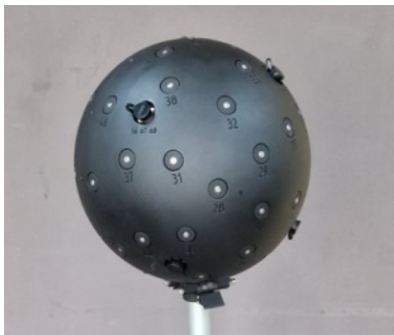
Новизна работы заключается в том, что впервые в РФ разработана и прошла валидацию отечественная сферическая микрофонная решетка МАИ, созданная методом реверс-инжиниринга зарубежного аналога Simcenter Solid Sphere Array. Предложена и реализована на практике методика валидации сферической решетки для условий, приближенных к реальным пассажирским салонам ЛА (расстояния до источников 1–4 м, характерные тональные частоты от 200 до 4000 Гц и «белый» шум).

1 Объект исследования

Объектом исследования является сферическая микрофонная решетка МАИ, изготовленная компанией ООО «Динамикс» на базе реверс-инжиниринга решетки Simcenter Solid Sphere Array в конфигурациях 54 микрофона и 78 микрофонов. Общий вид сферической микрофонной решетки МАИ рассмотрен на рисунке 1.

В целом отличие исследуемой решетки от прототипа Simcenter Solid Sphere Array заключается в самостоятельном изготовлении сферы диаметром 30 см под установку 54-х микрофонов диаметром 1/4 дюйма свободного поля типа GRAS 40PH-10 (частотный диапазон 10-20000 Гц, чувствительность 50 мВ/Па, динамический диапазон 33-135 дБ), 8-ми расширителей для установки 24-х дополнительных измерительных микрофонов и выборе штатива. Также стоит отметить, что рабочая длина кабельной сети измерительной системы МАИ составляет 13 м, что существенно расширяет возможности и улучшает эргономические качества системы при проведении измерений по сравнению с прототипом, у которого длина кабельной сети составляла 5 м.

Вся остальная аппаратно-программная часть аналогична решетке Simcenter Solid Sphere Array, которая использовалась ранее при проведении виброакустических испытаний самолета RRJ-95 [12], [13]. Система сбора данных включает в себя 80-ти каналный регистратор типа SCADAS Mobile. Для обработки результатов измерений использовалось лицензионное программное обеспечение Simcenter Testlab, приобретенное МАИ до введения зарубежных санкций.



а) базовая конфигурация, диаметр сферы 30 см, 54 микрофона. Рабочий частотный диапазон 500-10000 Гц



б) расширенная конфигурация, внешний диаметр сферы 80 см, 78 микрофонов. Рабочий частотный диапазон 200-10000 Гц

Рисунок 1 – Общий вид сферической микрофонной решетки МАИ, изготовленной ООО «Динамикс» на базе реверс-инжиниринга решетки Simcenter Solid Sphere Array

2 Методика валидационных испытаний

Валидацию сферической микрофонной решетки целесообразно выполнять в условиях свободного звукового поля в заглушенной камере [19], [20] с заранее известными источниками широкополосного и/или тонального шума. При формировании методики валидационных испытаний использованы результаты аналогичных работ [21]–[23].

В салонах ЛА суммарный нормируемый уровень шума в метрике дБА, как правило, определяется излучением в области частот 200-3000 Гц [24]–[29]. Поэтому необходимо иметь возможность получения шумовых карт в данном (проблемном) частотном диапазоне.

Таким образом, для анализа были выбраны тональные частоты 200, 500, 1000, 2000, 3000 и 4000 Гц, включающие нижний частотный предел (200 Гц) сферической микрофонной решетки и частотный диапазон пассажирского салона.

Используемые в работе источники шума представлены в таблице 1. Отметим, что источник шума И-1 генерировал только «белый» шум или был выключен. Источники И-2 и И-4 и И-3 и И-5 работали попарно или все одновременно на заданной тональной частоте. В таблице 1 также указаны воспроизводимые частотные диапазоны колонок (по данным производителей) и их характерные размеры. Отметим, что заявляемые производителями динамиков И-2 (И-4) и И-5 воспроизводимые частотные диапазоны 20–20000 Гц, вероятнее всего, являются диапазоном цифрового тракта Bluetooth. Реальные диапазоны воспроизводимых частот с учетом размеров динамиков можно приближенно оценить для И-2 180-10000 Гц, а для И-5 90-10000 Гц.

Таблица 1 – Используемые в исследовании источники звука

| Обозначение источника | Азимутальный угол | Наименование динамика | Общий вид | Характерные размеры, мм | Воспроизводимый частотный диапазон, Гц |
|-----------------------|-------------------|---------------------------------|---|-------------------------|--|
| И-1 | 0° | Источник звука OED-SP360 |  | Ø345 | 100–10000 |
| И-2 и И-4 | 45° и 135° | Портативная колонка Audiorop M3 |  | Ø50x40 | 20–20000 (90-10000)* |
| И-3 | 90° | Портативная колонка JBL Flip |  | 175x68x70 | 65–20000 |

Продолжение таблицы 1

| | | | | | |
|-----|------|---|---|------------|--------------------------|
| И-5 | 150° | Портативная колонка Fiego BlackLine FR120 |  | 74x110x 73 | 20–20000 (180-10000)* |
|-----|------|---|---|------------|--------------------------|

*Ожидаемый реальный частотный диапазон с учетом размеров динамиков

С учетом ширины салонов современных российских самолетов и вертолетов (таблица 2) были выбраны расстояния для расстановки источников звука на дугах окружностей радиусами 1, 2 и 4 м. Эти расстояния больше половины ширины салонов и высот рассмотренных в таблице 2 летательных аппаратов.

Таблица 2 – Характерные размеры фюзеляжа и салона современных отечественных летательных аппаратов (информация из открытых источников)

| Тип ЛА | Диаметр фюзеляжа, м | Ширина салона, м | Высота салона, м |
|--|---------------------|------------------|------------------|
| Самолеты | | | |
| RRJ-95 (SJ-100) | 3,46 | 3,24 | 2,12 |
| ТУ 204/214 | 3,8 | 3,56 | 2,11 |
| МС-21 | 4,06 | 3,81 | – |
| ИЛ-96 | 6,08 | 5,7 | – |
| ЛМС-901 «Байкал» | 1,8 | 1,5 | 1,67 |
| Let L-410 «Turbolet» (как прототип самолета ЛМС-192 «Освей») | 1,92 | 1,88 | 1,64 |
| Вертолеты | | | |
| МИ-171 | 3,91 | 2,34 | 1,8 |
| Ансат | – | 1,68 | 1,3 |
| МИ-8П | 6,36 | 2,34 | 1,8 |

Схема размещения источников шума при расположении источников на дуге окружности представлена на рисунке 2. Источники располагались в направлениях азимутальных углов 0, 45, 90, 135 и 150°. Угловые положения источников звука были выбраны с учетом информации о пространственном разрешении для базовой решетки Simcenter Solid Sphere Array в конфигурации 54 микрофона: 70° для частоты 500 Гц, 53° для частоты 1000 Гц, 28° для частоты 2000 Гц, 17° для частоты 4000 Гц, 11° для частоты 6000 Гц. Данная информация обозначает, что, например, на частоте 500 Гц два источника шума будут различимы на картах локализации при их расположении на азимутальных углах 70° и более.

Также стоит отметить динамический диапазон для базовой решетки Simcenter Solid Sphere Array в конфигурации 54 микрофона (условия свободного поля, источник на расстоянии 1 м): 15 дБ для частоты 500 Гц, 10 дБ для частоты 2000 Гц, 8 дБ для частоты 5000 Гц, 6 дБ для частоты 10000 Гц.

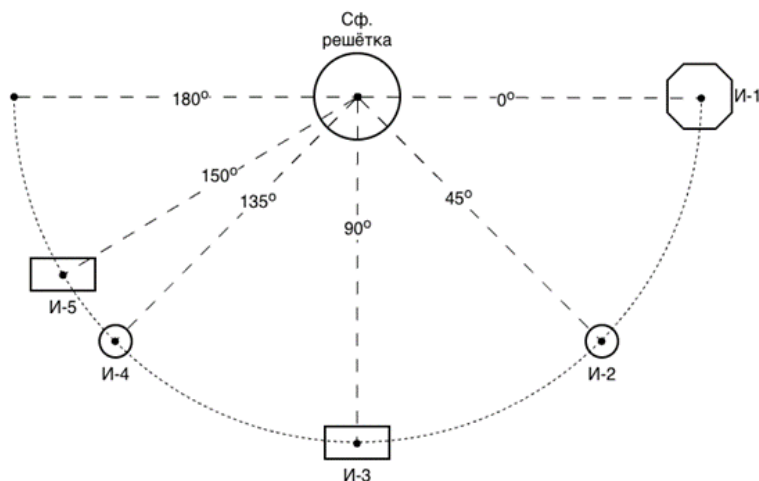
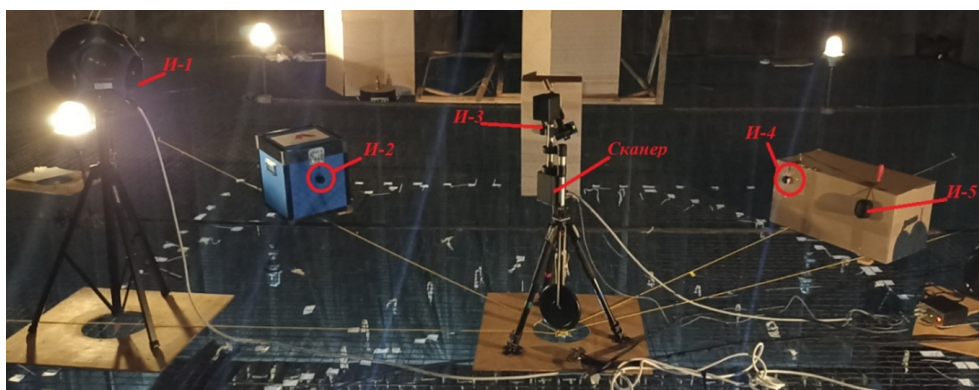
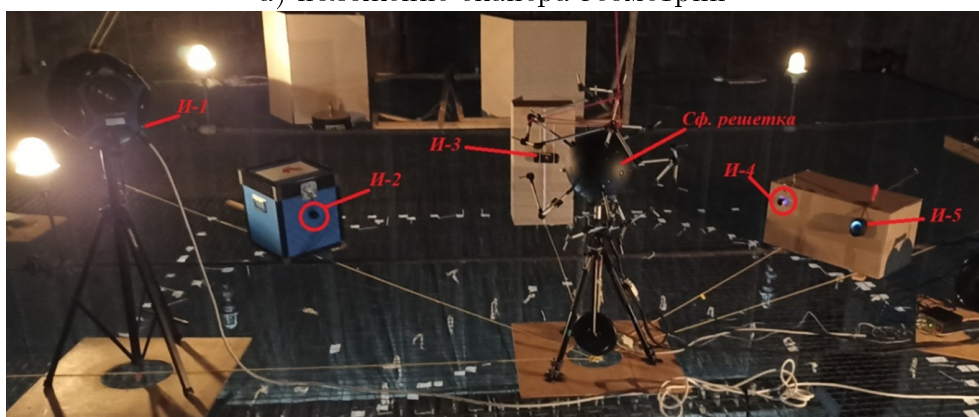


Рисунок 2 – Схема проведения эксперимента для валидации сферической решётки МАИ при расположении источников на дуге окружности

Валидационные испытания сферической микрофонной решетки выполнены в заглушенной камере Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН) на третьем этаже, который может рассматриваться как полностью заглушенное помещение согласно данным работы [30]. Общий вид расположения сферической многомикрофонной решетки и источников шума на дуге окружности радиусом 2 м представлен на рисунке 3.



а) положение сканера геометрии



б) положение сферической решетки с расширителями

Рисунок 3 – Общий вид расположения сферической решетки / сканера геометрии и источников шума на дуге окружности 2 м в заглушенной камере НИИСФ РААСН

На первом этапе работы выполнялось сканирование окружающего пространства с получением геометрии, наложенной на сетку из 1800 узлов. На втором этапе выполнялись непосредственно акустические синхронные измерения сферической решеткой в течение 40 секунд с частотой дискретизации 25600 Гц на каждом рассматриваемом режиме, характеризуемым расстоянием до источника звука (1, 2 и 4 м), частотой источников звука и конфигурацией их работы, а также конфигурацией сферической решетки (54 или 78 микрофонов (рисунок 1), только при измерениях на дуге окружности радиусом 4 м). В итоге были получены карты локализации источников шума и определены алгоритмы, позволяющие наиболее точно локализовать источник звука.

Дополнительно был выполнен анализ, позволяющий определить вклад отдельных источников в суммарное звуковое давление. Данный анализ наиболее важен при разработке мероприятий по снижению уровней шума в салоне ЛА в рамках акустической доводки, поскольку позволяет в явном виде выделить вклад отдельных ограждающих внутреннее пространство самолета элементов (панелей) и шума системы кондиционирования и вентиляции воздуха в общую звуковую мощность (или давление в зависимости от используемого алгоритма постобработки результатов измерений) в исследуемой зоне пассажирского салона.

3 Предварительные результаты валидационных испытаний сферической решетки в заглушенной камере НИИСФ РААСН

3.1 Карты локализации и оценка относительного вклада источников шума

В рамках настоящего раздела рассмотрим процедуру анализа результатов измерений и построения карт локализации источников шума, а также оценки вклада отдельных источников шума в суммарное звуковое давление.

Узкополосный спектр уровней звукового давления (УЗД) с границами рассматриваемых частот (800–1200 Гц) с шириной полосы 10 Гц при работе И-1 в режиме «белого» шума; И-2 и И-4 - в режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц, осредненный по всем 78-ми микрофонам решетки, представлен на рисунке 4.

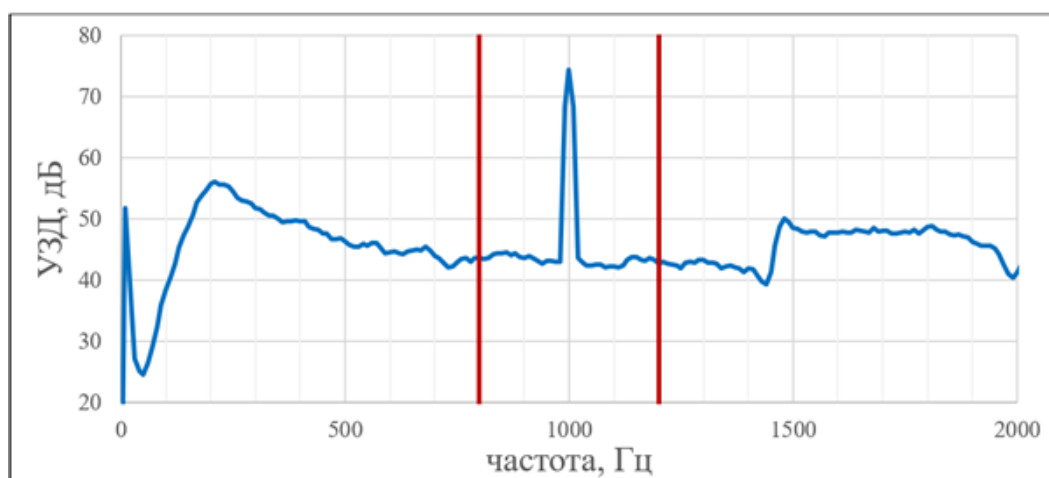
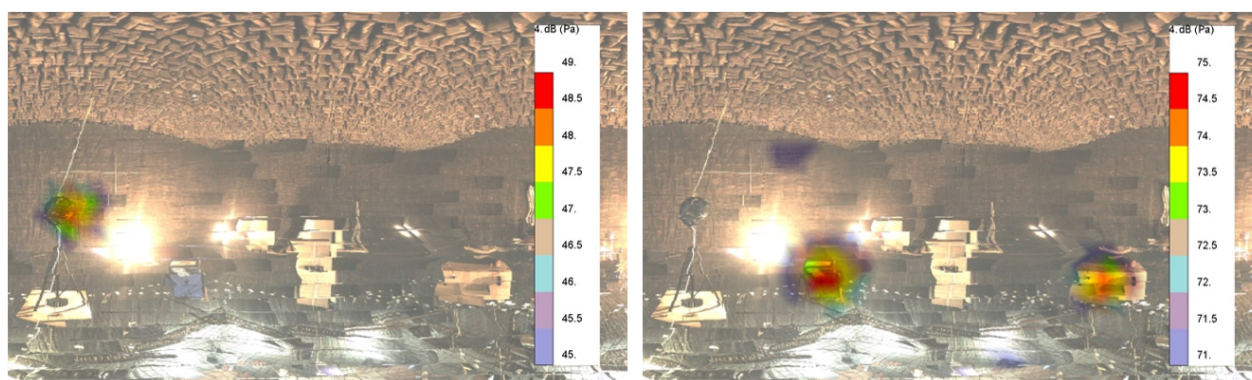


Рисунок 4 – Узкополосный спектр уровней звукового давления с границами рассматриваемых частот (800–1200 Гц) при работе И-1 в режиме «белого» шума; И-2 и И-4 – в режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц (расстояние до источников – 2 м, диапазон частот 0,1–2000 Гц, ширина полосы – 10 Гц, конфигурация 78 микрофонов)

Для данного режима работы источников получены карты локализации источников шума для суммарного излучения в полосе частот 800–1200 Гц (рисунок 5). Источники широкополосного (И-1) и тонального (И-2 и И-4) шумов локализуются в данной полосе частот с применением разных алгоритмов. Источник «белого» шума динамик И-1 локализуется при помощи алгоритма Anti-Coherence Reference/Open (рисунок 5а), а источники тонального шума динамики И-2 и И-4 с помощью алгоритма Spectrum/Open (рисунок 5б). Поскольку уровень широкополосного сигнала более, чем на 20 дБ ниже уровня тонального шума (рисунок 4) и эта разница выше, чем динамический диапазон решетки поэтому получить карту локализации со всеми 3-мя источниками на данном режиме не представляется возможным. В целом можно отметить высокую точность локализации источников – красные пятна на картах соответствуют их реальным положениям при измерениях (рисунок 3б).



а) карта локализации источника шума И-1 (локализация при помощи алгоритма Anti-Coherence Reference/Open)

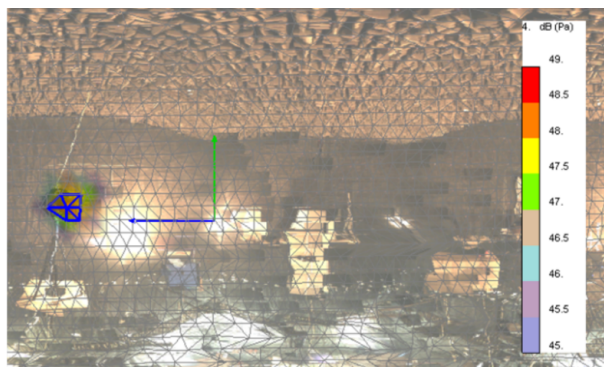
б) карта локализации источников шума И-2 и И-4 (локализация при помощи алгоритма Spectrum/Open)

Рисунок 5 – Карты локализации источников шума для суммарного излучения в диапазоне частот 800–1200 Гц при работе И-1 в режиме «белого» шума; И-2 и И-4 – в режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц (расстояние до источников – 2 м, контраст карт – 4 дБ, конфигурация 78 микрофонов)

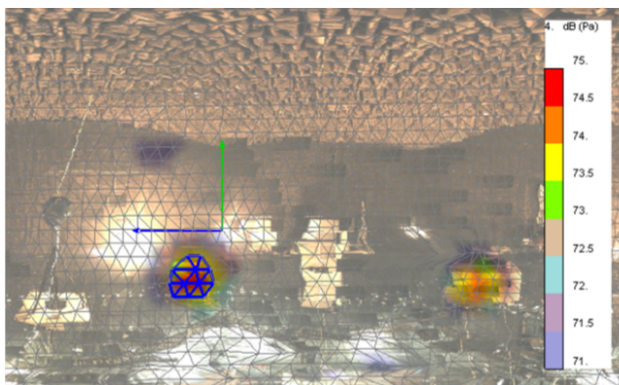
Для данного режима работы источников оценим вклад каждого в суммарное звуковое давление. Для этого на картах локализации выберем зоны на расчетной сетке, соответствующие источникам И-1, И-2 и И-4 как представлено на рисунке 6.

Результаты расчетной оценки вклада в суммарный уровень звукового давления отдельных источников И-1, И-2 и И-4 в диапазоне частот 800-1200 Гц представлены на рисунке 7. Можно видеть, что вклад двух источников тонального шума на частоте 1000 Гц фактически одинаковый и оба динамика (И-2 и И-4) определяют суммарный уровень звуковой мощности на данной частоте. Источник И-1 в свою очередь определяет уровни широкополосного шума в исследуемом частотном диапазоне. Данные результаты полностью согласуются с узкополосным спектром уровней звукового давления, представленным на рисунке 4, и картами локализации источников шума, представленными на рисунке 5.

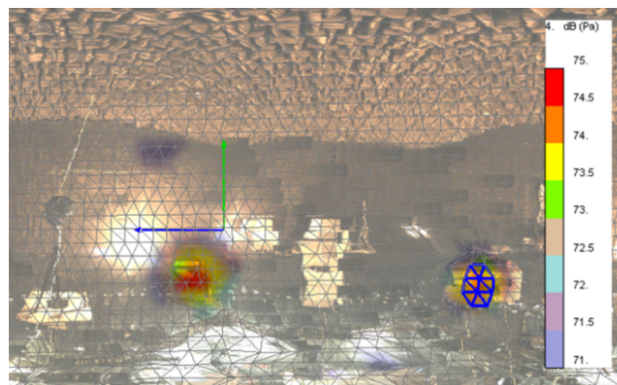
Отметим, что результаты расчетной оценки вклада отдельных источников шума в салоне являются исходными данными для разработки научно обоснованных рекомендаций по модификации схемы размещения акустических материалов в бортовой конструкции ЛА, которая должна обеспечить повышение акустического комфорта пассажиров и уменьшение массы. В случае пассажирских самолетов салон разбивается на отсеки, в которых выполняются акустические измерения и оценка вклада источников.



а) Выбор зоны для оценки вклада источника И-1



б) Выбор зоны для оценки вклада источника И-2



в) Выбор зоны для оценки вклада источника И-4

Рисунок 6 – Выбор зон на расчетной сетке для оценки вклада источников в суммарное звуковое давление

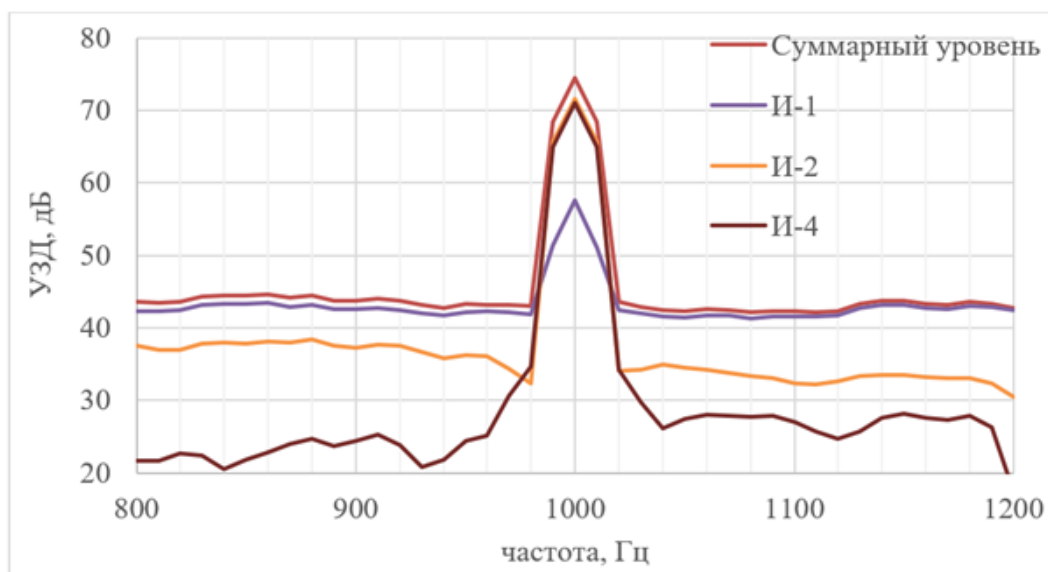
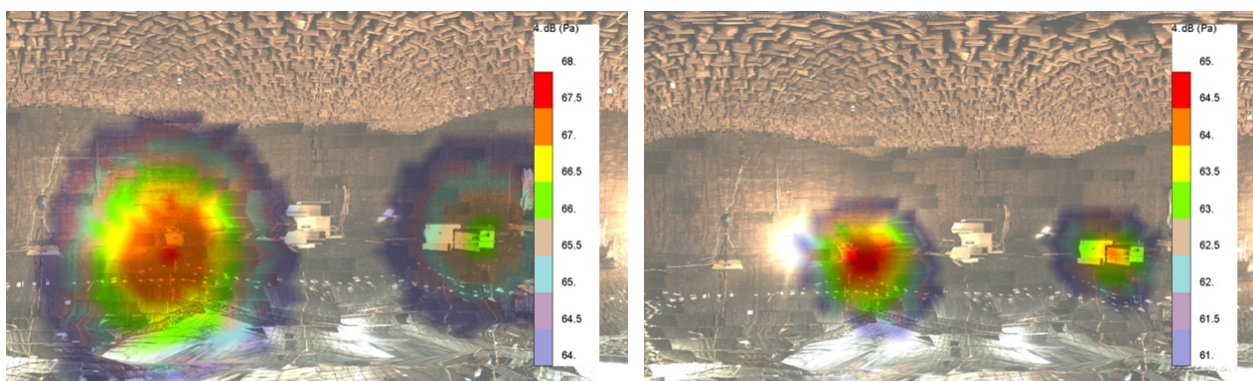


Рисунок 7 – Оценка вклада в суммарный уровень звукового давления отдельных источников при работе И-1 в режиме «белого» шума; И-2 и И-4 – в режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц (расстояние до источников – 2 м) в диапазоне частот 800-1200 Гц

3.2 Оценка влияния конфигурации сферической микрофонной решетки на локализацию источников шума

Одной из задач настоящего исследования было сравнить две конфигурации решетки при локализации одних и тех же источников шума. Теоретически в диапазоне частот 500-10000 Гц решетка в обеих конфигурациях должна обеспечивать одинаковые результаты локализации. При этом в диапазоне частот 200-500 Гц доверять результатам локализации можно только при использовании сферической решетки в расширенной конфигурации 78 микрофонов.

Сравнение двух конфигураций сферической решетки для локализации источников шума в диапазоне частот 100–2000 Гц при работе И-2, И-4 на режиме тонального сигнала с частотой 200 Гц представлено на рисунке 8. Можно видеть качественное отличие в картах локализации с применением двух конфигураций решетки. Чем меньше пятно на шумовой карте, тем выше точность локализации источника шума. В конфигурации решетки 78 микрофонов наблюдается более точная локализация источников шума (рисунок 8 б).



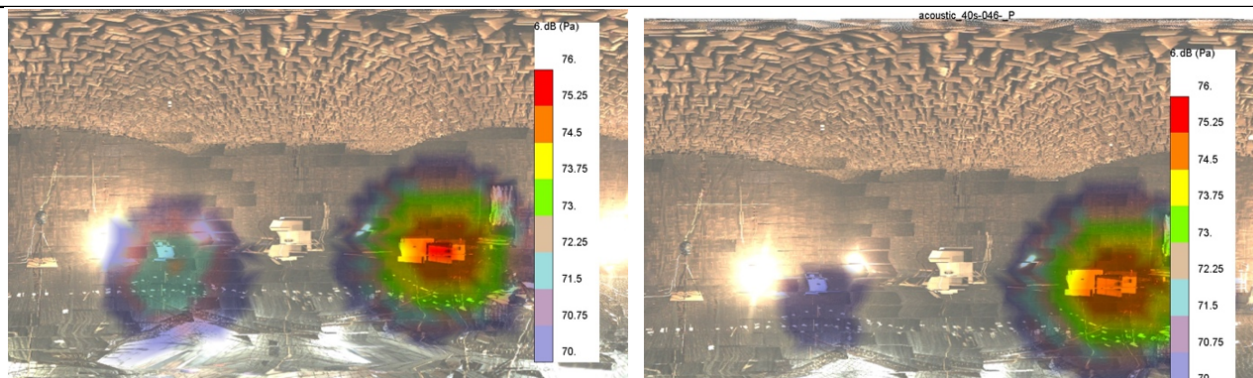
а) 54 микрофона (локализация при помощи алгоритма Spectrum)

б) 78 микрофонов (локализация при помощи алгоритма Spectrum/Open)

Рисунок 8 – Сравнение двух конфигураций сферической решетки для локализации источников шума в диапазоне частот 100–2000 Гц при работе И-2, И-4 на режиме тонального сигнала с частотой 200 Гц (расстояние до источников – 4 м, контраст карты – 4 дБ)

Сравнение двух конфигураций сферической решетки для локализации источников шума в диапазоне частот 800–1200 Гц при работе И-2, И-4 на режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц представлено на рисунке 9. Можно видеть качественное и количественное согласование карт локализации источников шума при использовании двух решеток.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости применения решетки в расширенной конфигурации (78 микрофонов) для локализации источников шума в области низких частот 200-500 Гц. Результатам локализации с применением решетки в конфигурации 54 микрофона в области низких частот не стоит доверять. Если стоит задача локализации и ранжирования по интенсивности источников шума с частотой более 500 Гц, то для такой задачи можно использовать решетку в сокращенной конфигурации 54 микрофона.



а) 54 микрофона (локализация при помощи алгоритма Spectrum)

б) 78 микрофонов (локализация при помощи алгоритма Spectrum/Rigid)

Рисунок 9 – Сравнение двух конфигураций сферической решетки для локализации источников шума в диапазоне частот 800–1200 Гц при работе И-2, И-4 на режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц (расстояние до источников – 4 м, контраст карты – 6 дБ)

Заключение

Представлены результаты предварительных валидационных испытаний сферической микрофонной решетки, выполненных в заглушенной камере НИИСФ РААСН на третьем этаже, который может рассматриваться как полностью заглушенное помещение.

Разработана методика валидационных испытаний, которая учитывает область применения исследуемой сферической решетки - для решения проблем внутренней акустики ЛА. Расстояния до источников (1, 2 и 4 м) и спектр генерируемого динамиками шума (тон с частотой 200, 500, 1000, 2000, 3000 и 4000 Гц и «белый» шум) выбраны с учетом размеров и акустической обстановки в салонах ЛА.

Экспериментально подтверждено, что расширенная конфигурация решетки (78 микрофонов) обеспечивает достоверную локализацию источников в области низких частот 200–500 Гц, тогда как в диапазоне выше 500 Гц допустимо использование базовой конфигурации (54 микрофона). Полученные карты локализации и оценки вклада источников в суммарное звуковое давление демонстрируют работоспособность решетки и готовность к ее практическому применению.

Анализ результатов выполненного исследования будет продолжен в части выбора рациональных алгоритмов для локализации и ранжирования по интенсивности источников шума в салоне ЛА. Данный вопрос является сложным и требует отдельного рассмотрения. Также будет оценена точность локализации источников шума относительно азимутального и радиального углов для различных конфигураций решетки и алгоритмов сферического бимформинга. Конечной целью является разработка методики для обработки и анализа натуральных виброакустических испытаний салонов ЛА с применением технологии сферического бимформинга.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ООО «Динамикс» и д.ф.-м.н. Н.Г. Каневу (НИИСФ РААСН) за помощь в организации и проведении валидационных испытаний сферической микрофонной решетки МАИ в заглушенной камере НИИСФ РААСН. Работа выполнена в рамках проекта «Виброакустика» при реализации в МАИ программы «Приоритет-2030».

Список использованных источников

1. Мошков П.А. Проблемы проектирования гражданских самолетов с учетом требований по шуму в салоне // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т. 26. – № 4. – С. 28-41. – DOI: 10.34759/vst-2019-4-28-41
2. Мошков П.А. О разработке первого российско-китайского стандарта в области авиастроения ГОСТ Р 70066-2022 «Авиационная техника. Требования к акустическому проектированию пассажирского салона и кабины экипажа самолетов» // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10. – № 2. – С. 27-34. – DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-2-27-34
3. ГОСТ Р 70066-2022. Авиационная техника. Требования к акустическому проектированию пассажирского салона и кабины экипажа самолетов. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 24 с.
4. Lee S.Y., Chang J., Lee S. Deep learning-enhanced single point sound source localization for spherical microphone array // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 263. – No. 4. – P. 2279-2283. – DOI: 10.3397/in-2021-2094
5. Moshkov P.A. Visualization of the sound field in the cabin of the Superjet 100 aircraft using a spherical microphone array // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3021. – No. 020003. – DOI: 10.1063/5.0193040
6. Padois T., St-Jacques Ju., Rouard K., Quaegebeur N., Grondin F., Berry A., Nélisse H., Sgard F., Doutres O. Acoustic imaging with spherical microphone array and kriging // JASA Express Letters. – 2023. – Vol. 3. – No. 4. – DOI: 10.1121/10.0017790
7. Navvab M., Meyer A., Heilmann G. Simulation, visualization and perception of sound in a real and virtual vehicle interior using beamforming // Proceedings of the Berlin Beamforming Conference. – 2016. – No. BeBeC-2016.
8. Rafaely B. Fundamentals of Spherical Array Processing. – Springer, 2019. – DOI: 10.1007/978-3-319-99561-8
9. Szwajcowski A., Makuch T., Celniak W. An iterative approach to sound source localization based on spherical beamforming // Vibrations in Physical Systems. – 2023. – Vol. 34. – No. 2. – P. 2023216-1-2023216-12. – DOI: 10.21008/j.0860-6897.2023.2.16
10. Панов С.Н., Василенков Д.А., Коганицкий Ю.С., Лесных Т.О., Маслов Г.А., Токарев С.Ю., Митенков В.Б. Методология локализации источников шума в салоне транспортных средств с помощью микрофонных решеток // В сборнике: Акустика среды обитания. Материалы IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – Москва, 2024. – С. 299-312.
11. Лесных Т.О., Митенков В.Б., Токарев С.Ю., Паньков Р.И., Василенков Д.А., Панов С.Н., Мухин С.А., Коганицкий Ю.С. Локализация источников шума в кабине экипажа и салоне гражданского самолета с помощью сферической микрофонной решетки // В книге: Тезисы докладов XX научно-технической конференции по аэроакустике. – 2023. – С. 145-146.
12. Мошков П.А., Василенков Д.А., Рубановский В.В., Строганов А.И. Локализация источников шума в гермокабине самолета RRJ-95 сферической микрофонной решеткой. Часть 1. Кабина экипажа // Вестник Московского авиационного института. – 2020. – Т. 27. – № 2. – С. 37-51. – DOI: 10.34759/vst-2020-2-37-51
13. Мошков П.А., Василенков Д.А., Рубановский В.В., Строганов А.И. Локализация источников шума в гермокабине самолета RRJ-95 сферической микрофонной решеткой. Часть 2. Пассажирский салон // Вестник Московского авиационного института. – 2020. – Т. 27. – № 3. – С. 60-72. – DOI: 10.34759/vst-2020-3-60-72
14. ГОСТ 20296-2014. Самолеты и вертолеты гражданской авиации.

Допустимые уровни шума в салонах и кабинах экипажа и методы измерения шума: межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.

15. Vance F., Young Ja. Design, development, and validation of acoustic insulation packages for business and VIP aircraft // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 264. – No. 1. – P. 800-809. – DOI: 10.3397/nc-2022-813

16. Kletschkowski T. Some insights in active control of noise and vibration in aircraft cabins // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6. – № 4 (22). – С. 11-21.

17. Мошков П.А. Способ определения виброакустических характеристик пассажирского салона и кабины экипажа гражданского самолета и ранжирования по интенсивности основных источников шума по результатам летных испытаний // Патент на изобретение RU 2843599 С1. – 2025. – Заявка № 2024139781 от 26.12.2024. – Оpubл. 16.07.2025.

18. ГОСТ Р 57700.2-2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 8 с.

19. Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенев Ю.В., Макашов С.Ю., Храмцов И.В., Корин И.А., Сорокин Е.В., Кустов О.Ю. Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63. – № 1. – С. 114-126. – DOI: 10.7868/S032079191701004X

20. Kopiev V.F., Makashov S.Y., Belyaev I.V., Palchikovskiy V.V., Bersenev Y.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Khramtsov I.V., Kustov O.Y. Design and qualification of an anechoic facility in PNRPU // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 176. – P. 264-272. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.317

21. Yang B., Shi S., Yang D. Acoustic source localization using the open spherical microphone array in the low-frequency range // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 283. – 04001. – DOI: 10.1051/mateconf/201928304001

22. Huang Q., Wang T. Acoustic source localization in mixed field using spherical microphone arrays // Eurasip Journal on Advances in Signal Processing. – 2014. – Vol. 2014. – No. 1. – P. 1-16. – DOI: 10.1186/1687-6180-2014-90

23. Демьянов М.А., Бычков О.П. Обобщение стандартного алгоритма "бимформинг" для идентификации акустических источников с помощью несинхронных измерений микрофонной решеткой // Акустический журнал. – 2022. – Т. 68. – № 2. – С. 162-172. – DOI: 10.31857/S0320791922020022

24. Lavrov V., Moshkov P., Popov V., Rubanovskiy V. Study of the sound field structure in the cockpit of a Superjet 100 // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2019. – AIAA Paper No. 2019-2726. – DOI: 10.2514/6.2019-2726

25. Moshkov P. Contributions of different sources to cabin noise of a Superjet 100 in cruise flight condition // AIAA AVIATION Forum 2021. – 2021. – AIAA Paper No. 2021-2272. – DOI: 10.2514/6.2021-2272

26. Moshkov P., Lavrov V. Analysis of Vibroacoustics of the Superjet 100 Aircraft // Proceedings of the 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). – 2022. – DOI: 10.1109/DVM55487.2022.9930929

27. Hu N., Buchholz H., Herr M., Spehr C., Haxter S. Contributions of Different Aeroacoustic Sources to Aircraft Cabin Noise // Proceedings of the 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2013. – AIAA Paper No. 2013-2030. – DOI: 10.2514/6.2013-2030

28. Helffer E., Deille O., Briand J., Delverdier O. Fast and Light Acoustic Flight Test

Measurements in Aircraft // AIAA Flight Testing Conference. – 2014. – AIAA Paper No. 2014-2581. – DOI: 10.2514/6.2014-2581

29. Winter R., Norambuena M., Sinske Ju., Zettel S. High-resolution vibroacoustic characterization of DLR'S Falcon 2000LX ISTAR aircraft // CEAS Aeronautical Journal. – 2023. – Vol. 14. – No. 4. – P. 953-963. – DOI: 10.1007/s13272-023-00676-9

30. Бикмухаметов Ф.Р., Канев Н.Г. Безэховая звукомерная камера НИИ строительной физики: актуальные акустические характеристики // Noise Theory and Practice. – 2026. – Т. 12. – № 1 (44). – С. 7-17. – DOI: 10.56408/2412-8627.2026.1.12.001

References

1. Moshkov P.A. Problems of civil aircraft design taking into account cabin noise requirements // Aerospace MAI Journal. – 2019. – Vol. 26. – N 4. – P. 28-41. – DOI: 10.34759/vst-2019-4-28-41

2. Moshkov P.A. On the development of the first Russian-Chinese aviation standard GOST R 70066-2022 "Aircraft engineering. Requirements for acoustic design of passenger cabin and crew cockpit of airplanes" // Dynamics and Vibroacoustics. – 2024. – Vol. 10. – N 2. – P. 27-34. – DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-2-27-34

3. GOST R 70066-2022. Aircraft engineering. Requirements for acoustic design of passenger cabin and crew cockpit of airplanes. – Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. – 24 p.

4. Lee S.Y., Chang J., Lee S. Deep learning-enhanced single point sound source localization for spherical microphone array // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 263. – N 4. – P. 2279-2283. – DOI: 10.3397/in-2021-2094

5. Moshkov P.A. Visualization of the sound field in the cabin of the Superjet 100 aircraft using a spherical microphone array // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3021. – N 020003. – DOI: 10.1063/5.0193040

6. Padois T., St-Jacques Ju., Rouard K., Quaegebeur N., Grondin F., Berry A., Nélisse H., Sgard F., Doutres O. Acoustic imaging with spherical microphone array and kriging // JASA Express Letters. – 2023. – Vol. 3. – N 4. – DOI: 10.1121/10.0017790

7. Navvab M., Meyer A., Heilmann G. Simulation, visualization and perception of sound in a real and virtual vehicle interior using beamforming // Proceedings of the Berlin Beamforming Conference. – 2016. – N BeBeC-2016.

8. Rafaely B. Fundamentals of Spherical Array Processing. – Singapore: Springer, 2019. – DOI: 10.1007/978-3-319-99561-8

9. Szwajcowski A., Makuch T., Celniak W. An iterative approach to sound source localization based on spherical beamforming // Vibrations in Physical Systems. – 2023. – Vol. 34. – N 2. – P. 2023216-1-2023216-12. – DOI: 10.21008/j.0860-6897.2023.2.16

10. Panov S.N., Vasilenkov D.A., Koganitsky Yu.S., Lesnykh T.O., Maslov G.A., Tokarev S.Yu., Mitenkov V.B. Methodology for noise source localization in vehicle interiors using microphone arrays // In: Acoustics of the Living Environment. Proceedings of the IX All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists. – Moscow, 2024. – P. 299-312.

11. Lesnykh T.O., Mitenkov V.B., Tokarev S.Yu., Pankov R.I., Vasilenkov D.A., Panov S.N., Mukhin S.A., Koganitsky Yu.S. Noise source localization in the cockpit and cabin of a civil aircraft using a spherical microphone array // In: Abstracts of the XX Scientific and Technical Conference on Aeroacoustics. – 2023. – P. 145-146.

12. Moshkov P.A., Vasilenkov D.A., Rubanovskiy V.V., Stroganov A.I. Noise source localization in the RRJ-95 aircraft fuselage using a spherical microphone array. Part 1. Crew

cockpit // Aerospace MAI Journal. – 2020. – Vol. 27. – N 2. – P. 37-51. – DOI: 10.34759/vst-2020-2-37-51

13. Moshkov P.A., Vasilenkov D.A., Rubanovskiy V.V., Stroganov A.I. Noise source localization in the RRJ-95 aircraft fuselage using a spherical microphone array. Part 2. Passenger cabin // Aerospace MAI Journal. – 2020. – Vol. 27. – N 3. – P. 60-72. – DOI: 10.34759/vst-2020-3-60-72

14. GOST 20296-2014. Civil aviation aircraft and helicopters. Permissible noise levels in cabins and crew cockpits and noise measurement methods. – Moscow: Standartinform, 2014. – 12 p.

15. Vance F., Young Ja. Design, development, and validation of acoustic insulation packages for business and VIP aircraft // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 264. – N 1. – P. 800-809. – DOI: 10.3397/nc-2022-813

16. Kletschkowski T. Some insights in active control of noise and vibration in aircraft cabins // Noise Theory and Practice. – 2020. – Vol. 6. – N 4 (22). – P. 11-21.

17. Moshkov P.A. Method for determining vibroacoustic characteristics of a passenger cabin and crew cockpit of a civil aircraft and ranking the main noise sources by intensity based on flight test results // RU patent N 2843599 C1. – 2025. – Application N 2024139781 dated 26.12.2024. – Published 16.07.2025.

18. GOST R 57700.2-2017. Numerical modeling for the development and commissioning of high-tech industrial products. Software certification. General provisions. – Moscow: Standartinform, 2017. – 8 p.

19. Kopiev V.F., Palchikovskiy V.V., Belyaev I.V., Bersenev Yu.V., Makashov S.Yu., Khramtsov I.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Kustov O.Yu. Construction of an anechoic chamber for aeroacoustic experiments and examination of its acoustic parameters // Acoustical Physics. – 2017. – Vol. 63. – N 1. – P. 113-124. – DOI: 10.1134/S1063771017010043

20. Kopiev V.F., Makashov S.Y., Belyaev I.V., Palchikovskiy V.V., Bersenev Y.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Khramtsov I.V., Kustov O.Y. Design and qualification of an anechoic facility in PNRPU // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 176. – P. 264-272. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.317

21. Yang B., Shi S., Yang D. Acoustic source localization using the open spherical microphone array in the low-frequency range // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 283. – 04001. – DOI: 10.1051/mateconf/201928304001

22. Huang Q., Wang T. Acoustic source localization in mixed field using spherical microphone arrays // Eurasip Journal on Advances in Signal Processing. – 2014. – Vol. 2014. – N 1. – P. 1-16. – DOI: 10.1186/1687-6180-2014-90

23. Demyanov M.A., Bychkov O.P. Generalization of the standard beamforming algorithm for identifying acoustic sources using asynchronous microphone array measurements // Acoustical Physics. – 2022. – Vol. 68. – N 2. – P. 138-146. – DOI: 10.1134/S1063771022020026

24. Lavrov V., Moshkov P., Popov V., Rubanovskiy V. Study of the sound field structure in the cockpit of a Superjet 100 // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2019. – AIAA Paper N 2019-2726. – DOI: 10.2514/6.2019-2726

25. Moshkov P. Contributions of different sources to cabin noise of a Superjet 100 in cruise flight condition // AIAA AVIATION Forum 2021. – 2021. – AIAA Paper N 2021-2272. – DOI: 10.2514/6.2021-2272

26. Moshkov P., Lavrov V. Analysis of Vibroacoustics of the Superjet 100 Aircraft // Proceedings of the 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). – 2022. – DOI: 10.1109/DVM55487.2022.9930929

27. Hu N., Buchholz H., Herr M., Spehr C., Haxter S. Contributions of Different

Aeroacoustic Sources to Aircraft Cabin Noise // Proceedings of the 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2013. – AIAA Paper N 2013-2030. – DOI: 10.2514/6.2013-2030

28. Helffer E., Deille O., Briand J., Delverdier O. Fast and Light Acoustic Flight Test Measurements in Aircraft // AIAA Flight Testing Conference. – 2014. – AIAA Paper N 2014-2581. – DOI: 10.2514/6.2014-2581

29. Winter R., Norambuena M., Sinske Ju., Zettel S. High-resolution vibroacoustic characterization of DLR'S Falcon 2000LX ISTAR aircraft // CEAS Aeronautical Journal. – 2023. – Vol. 14. – N 4. – P. 953-963. – DOI: 10.1007/s13272-023-00676-9

30. Bismukhametov F.R., Kanev N.G. Anechoic sound-measuring chamber of the Research Institute of Building Physics: current acoustic characteristics // Noise Theory and Practice. – 2026. – Vol. 12. – N 1 (44). – P. 7-17. – DOI: 10.56408/2412-8627.2026.1.12.001