

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

---

УДК 534.23:534.874.1:534.6.08

DOI:10.34759/vst-2020-3-60-72

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ШУМА В ГЕРМОКАБИНЕ САМОЛЕТА RRJ-95 СФЕРИЧЕСКОЙ МИКРОФОННОЙ РЕШЕТКОЙ. ЧАСТЬ 2. ПАССАЖИРСКИЙ САЛОН

Мошков П.А.<sup>1\*</sup>, Василенков Д.А.<sup>2\*\*</sup>, Рубановский В.В.<sup>1\*\*\*</sup>, Строганов А.И.<sup>2\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> «Региональные самолеты» — филиал ПАО «Корпорация “Иркут”»,

ул. Ленинская Слобода, 26, Москва, 115280, Россия

<sup>2</sup> «Сименс Индастри Софтвар»,

ул. Большая Татарская, 9, Москва, 115184, Россия

\* e-mail: moshkov89@bk.ru

\*\* e-mail: dmitri.vasilenkov@siemens.com

\*\*\* e-mail: V\_Rubanovsky@scac.ru

\*\*\*\* e-mail: alexey.stroganov@siemens.com

Статья поступила в редакцию 01.06.2020

Дан краткий обзор механизмов генерации шума в салонах пассажирских самолетов. Представлены результаты локализации и ранжирования источников шума в пассажирском салоне экспериментального самолета RRJ-95 с применением сферической решетки Simcenter Solid Sphere 3DCAM78. Получены карты локализации для суммарного взвешенного по шкале А стандартного шумомера уровня звукового давления в диапазоне частот 20–5000 Гц. Звуковое поле в салоне самолета является сложным по своей структуре и, за исключением салона бизнес-класса, несимметричным относительно главной оси, что связано с особенностями работы системы кондиционирования и вентиляции воздуха, а также наличием дополнительных источников шума, нехарактерных для серийных воздушных судов. Это — дополнительное излучение от оборудования, расположенного в хвостовой части салона, локальные зоны увеличения уровней шума вследствие наличия зазоров между панелями интерьера и при их отсутствии. Показано, что увеличение звукоизоляции фюзеляжа в хвостовой части салона за счет установки панели интерьера в полетных условиях составляет ~2 дБА.

*Ключевые слова:* гражданские самолеты, акустические испытания, микрофонная решетка, сферический бимформинг, шум в салоне, карта локализации источников шума.

### Введение

Актуальность проблемы повышения акустического комфорта пассажиров и членов экипажей

воздушных судов не вызывает сомнения [1, 2]. Для решения этой задачи в самолетостроительных фирмах, как зарубежных, так и отечественных,

реализуются комплексные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы [3, 4], конечной целью которых является обеспечение концепции «акустического проектирования самолетов» [5, 6], т.е. с учетом нормативных ограничений по предельно допустимым уровням шума в салоне и на местности, в том числе с использованием высокоточных методов вычислительной аэродинамики, аэроакустики и оптимизации [7].

В работе представлены результаты акустических испытаний, выполненных на самолете RRJ–95, как самолете-прототипе SSJ–NEW, с применением сферической решетки. Задача работы состояла в локализации и ранжировании по интенсивности основных источников шума в салоне. Результаты настоящей работы могут быть использованы для разработки эффективных мероприятий по увеличению акустического комфорта пассажиров, а также для верификации и валидации численных методов расчета шума в салоне.

Представленное исследование является продолжением работы [8], в которой описаны результаты визуализации звукового поля в кабине экипажа самолета RRJ–95, и продолжением комплексных исследований [9, 10], выполняемых в Филиале ПАО «Корпорация Иркут» «Региональные самолеты» с целью обеспечения акустического комфорта пассажиров и членов экипажа.

### Основные источники шума в салоне самолета

Шум в салоне самолета представляет собой суперпозицию звуковых полей различных источников, вклад которых в суммарный уровень звукового давления в точке наблюдения зависит от типа и компоновки силовой установки, режима полета, режима работы системы кондиционирования и вентиляции воздуха и т.д. Для самолетов с классической современной компоновкой двигателей на пилонх под крылом можно выделить следующие источники шума в салоне.

На взлетно-посадочных режимах при низких скоростях полета существенными источниками являются:

- нестационарные аэродинамические процессы в нишах шасси [11, 12];
- шум реактивной струи [13] в хвостовой части салона, шум вентилятора [14] в передней части салона, шум взаимодействия «струя—закрылок» [15];
- шум систем выпуска—уборки шасси и механизации крыла.

На крейсерском режиме полета, на котором нормируются уровни шума в пассажирском сало-

не и кабине экипажа, звуковое поле в салоне определяется следующими основными источниками:

- пульсации давления в турбулентном пограничном слое на поверхности фюзеляжа [16];
- система кондиционирования и вентиляции воздуха (СКВ) [17–19];
- вибрационное воздействие двигателей (структурный шум) [20];
- акустическое воздействие силовой установки (шум вентилятора и реактивной струи);
- авионика самолета, различные системы и оборудование.

На крейсерском режиме полета, как правило, уровни шума в салонах современных самолетов с турбовентиляторными двигателями, расположенными на пилонх под крылом, определяются шумом турбулентного пограничного слоя и шумом системы вентиляции и кондиционирования воздуха [1]; вклад акустического излучения силовой установки и структурного шума двигателей не представляется существенным при оценке интегрального уровня шума в дБА.

Поскольку нормирование шума в салоне осуществляется на крейсерском режиме полета, то этот режим является расчетным в рамках тематики шума в салоне, и на этом режиме выполняются акустические испытания, оптимизация размещения акустических материалов (теплозвукоизолирующих, звукопоглощающих и вибродемпфирующих), оборудования и систем на самолете.

Рассмотренные источники относятся только к самолетам с турбовентиляторными двигателями, расположенными на пилонх под крылом. Для перспективных самолетов с турбовинтовентиляторными двигателями («открытый ротор») [21, 22] и сверхзвуковых самолетов 2-го поколения [23] доминирующими могут быть другие источники шума, что потребует применения новых материалов и конструктивных решений для обеспечения акустического комфорта пассажиров.

### Методика эксперимента и используемое оборудование

Методика эксперимента аналогична примененной ранее при локализации и ранжировании источников шума в кабине экипажа [8]. Единственным отличием является применение микрофонной решетки Simcenter Solid Sphere 3DCAM78 в расширенной конфигурации. К базовой конфигурации с контуром из 54 микрофонов дополнительно устанавливается второй контур из 24 микрофонов (рис. 1). Данное расширение позволяет



Рис. 1. Сферическая микрофонная решетка Simcenter Solid Sphere 3DCAM78 в расширенной конфигурации (78 микрофонов) в салоне экспериментального самолета

увеличить динамический диапазон решетки в области низких частот и снизить порог минимальных частот, начиная с которых могут быть получены достоверные результаты.

При проведении испытаний в пассажирском салоне комплект оборудования включал в себя:

- сферическую микрофонную решетку Simcenter Solid Sphere 3DCAM78 с двумя контурами: первый контур диаметром 30 см на 54 микрофона и второй контур диаметром 70 см на 24 микрофона. Динамический диапазон решетки с расширителями (78 микрофонов) 200—10000 Гц;
- 3D-сканер геометрии салона;

- систему регистрации данных Simcenter SCADAS с блоком питания, кабелями и переходниками в комплекте;

- ноутбук (использовался только в рамках подготовительных наземных работ при сканировании геометрии салона).

Первым этапом настоящей работы было 3D-сканирование геометрии пассажирского салона в наземных условиях. Центр сканера совпадал с центром сферической решетки. В дальнейшем результаты акустических измерений «накладывались» на реальную 3D-геометрию пассажирского салона.

Акустические измерения были выполнены на экспериментальном самолете RRJ-95 № 95005 в шести контрольных точках по длине салона, расположенных в проходе между рядами кресел вблизи рядов 2 (бизнес-класс); 7, 10, 14, 17 и 20 (эконом-класс). Испытания выполнены на режиме прямолинейного крейсерского полета на высоте 11 км со скоростью, определяемой числом Маха полета, равным 0,8. Время записи сигналов параллельно с 78 измерительных каналов составляло не менее 60 с. Измерения выполнены при штатной работе системы кондиционирования и вентиляции воздуха и при ее выключении.

Отключение СКВ фактически означает прекращение подачи воздуха в салон, при этом вентиляторы системы продолжают работать. То есть звук, генерируемый вентиляторами системы, даже при выключении СКВ распространяется по трубопроводам. Тем не менее, не существует в рамках летных испытаний другого способа разделения источников шума в салоне самолета.

К основным агрегатам СКВ, генерирующим шум, относятся выпускные клапаны, установка охлаждения воздуха, нагнетающие и вытяжные вентиляторы, вентиляторы системы рециркуляции воздуха, эжекторы, воздухопроводы и другие элементы, подающие воздух в пассажирскую кабину.

Частота вращения всех вентиляторов СКВ постоянна и составляет 22800 об/мин. Поскольку вентиляторы системы включают в себя колеса ротора и статора, то важнейшим механизмом генерации шума является «ротор—статор»-взаимодействие. Шум, генерируемый турбулентностью в воздухопроводах системы, обычно называют шумом турбулентного потока.

#### Анализ результатов испытаний

Обработка результатов акустических испытаний с применением микрофонной сферической решетки выполняется в несколько этапов:



1. Определение спектров уровней звукового давления в узких полосах частот, регистрируемых микрофонами решетки.

2. Выделение характерных тональных составляющих в спектре шума и определение их источника. В частности, на роторной частоте вентиляторов СКВ и комбинационных гармониках — шум СКВ, на роторных и разностных частотах вращения валов двигателей — структурный шум двигателей и т.д.

3. Нахождение наиболее проблемного частотного диапазона, как правило, определяющего суммарный взвешенный по шкале А стандартного шумомера уровень звукового давления. В частности [10], до 90% звуковой энергии, определяющей суммарные взвешенные по шкале А стандартного шумомера уровни звукового давления в кабине экипажа самолета RRJ-95, сосредоточено в области частот 250—2500 Гц.

4. Построение карт локализации источников шума для суммарного излучения (с учетом динамического диапазона решетки и проблемного частотного диапазона исследуемого салона) и излучения в отдельных узких, третьоктавных и/или октавных полосах частот.

5. Выполнение ранжирования источников шума по интенсивности излучения.

В рамках настоящей работы рассмотрим только карты локализации источников шума, полученные для суммарного взвешенного по шкале А стандартного шумомера уровня звукового давления в диапазоне частот 20—5000 Гц для случаев включенной и выключенной СКВ для измерений, выполненных в зоне 2-го ряда кресел бизнес-класса и 7, 10, 14, 17 и 20-го рядов кресел эконом-класса (рис. 2—7). Результаты получены с использованием алгоритма стандартного сферического бимформинга с контрастом 8 дБА.

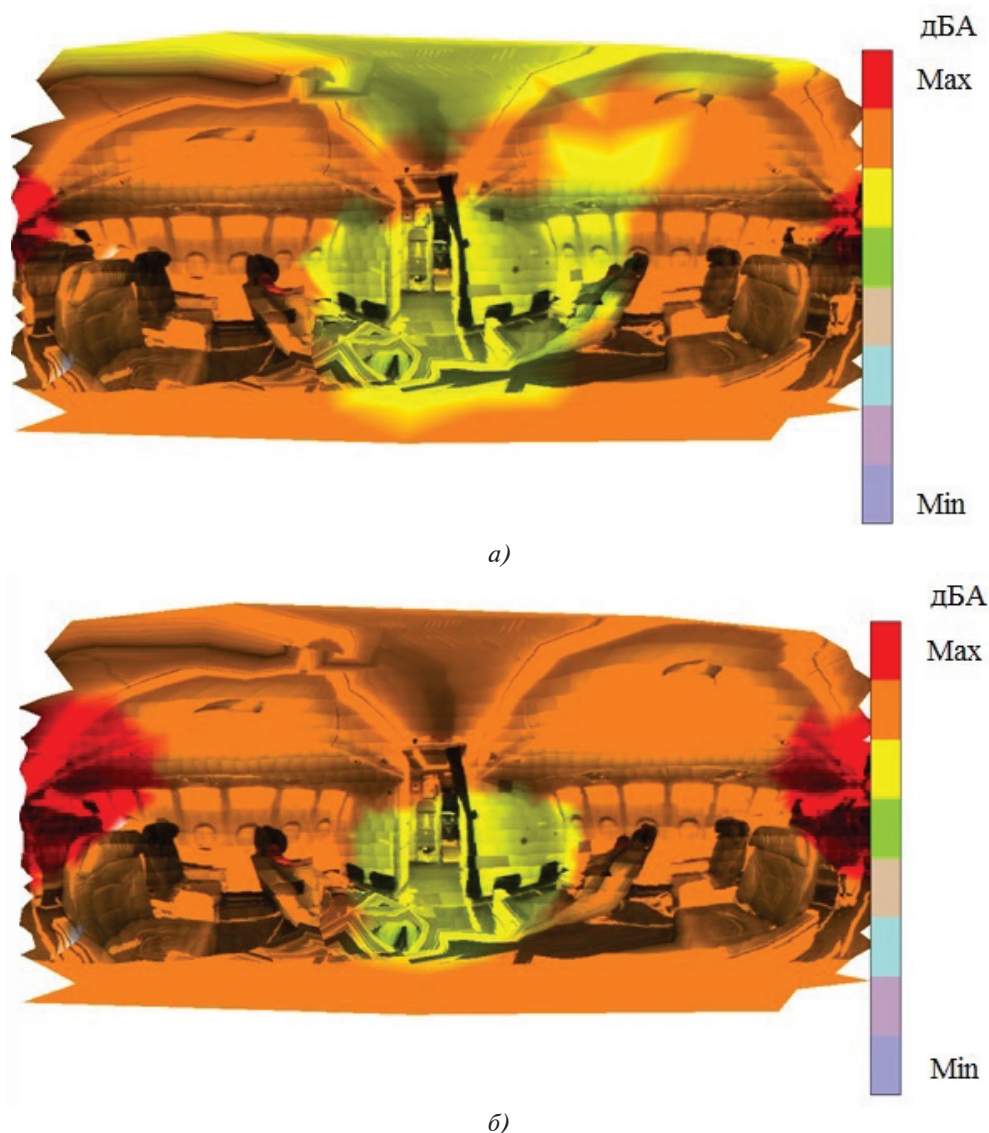


Рис. 2. Карты локализации источников шума для суммарного излучения 20—5000 Гц в зоне 2-го ряда кресел салона бизнес-класса для включенной (а) и выключенной (б) СКВ

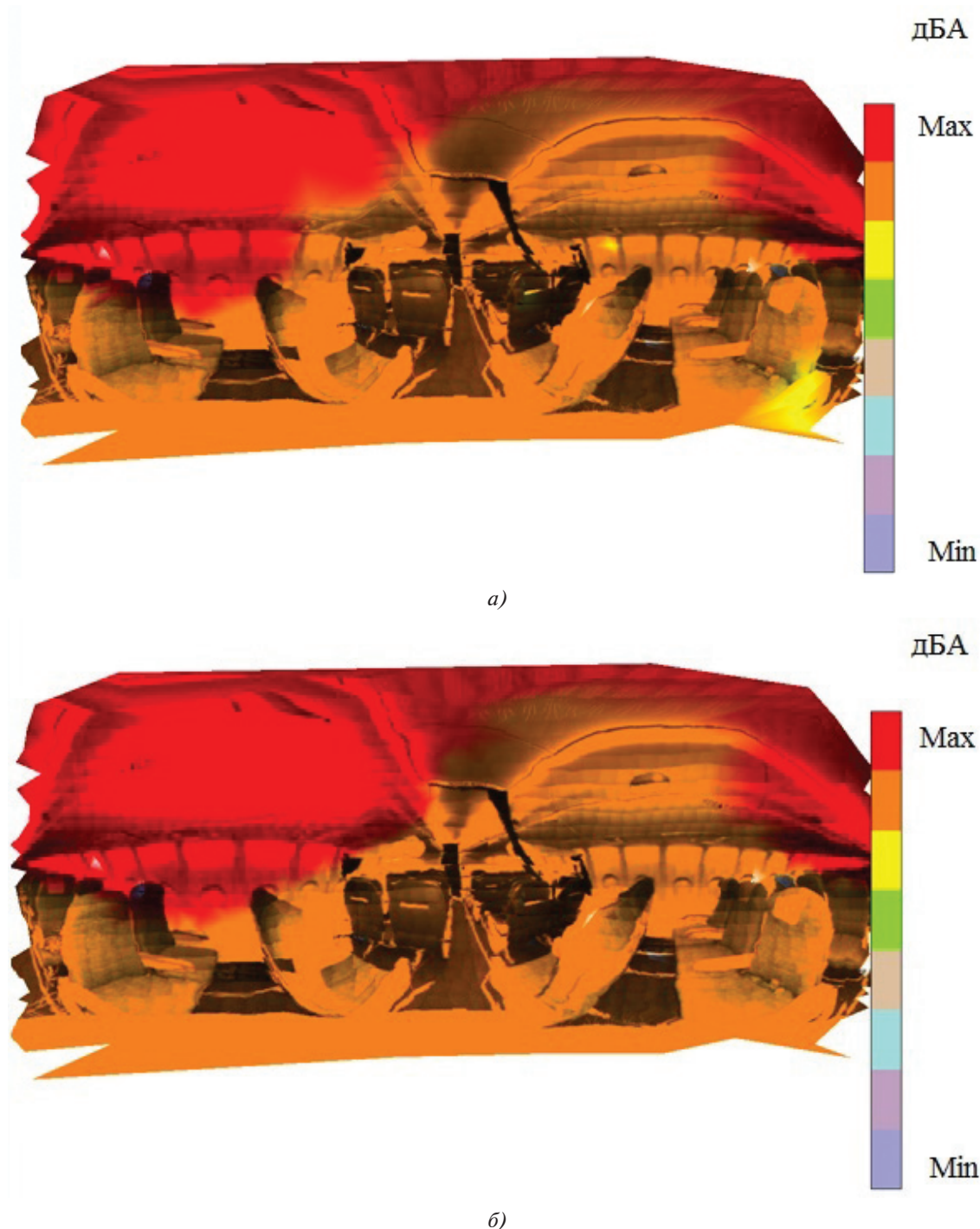


Рис. 3. Карты локализации источников шума для суммарного излучения 20—5000 Гц в зоне 7-го ряда кресел салона эконом-класса для включенной (а) и выключенной (б) СКВ

В зоне 2-го ряда салона бизнес-класса (см. рис. 2) источники повышенного шума расположены со стороны трубопроводов подачи воздуха в салон на уровне 3-го ряда кресел, как с левого, так и с правого борта. Отключение СКВ приводит к уменьшению интенсивности шума со стороны трубопроводов СКВ. В целом по салону уровни шума существенно не зависят от отключения СКВ, за исключением зоны со стороны потолоч-

ных панелей. При отключении СКВ уровни шума со стороны потолка уменьшаются на 1 дБА. Уровни шума со стороны прохода на 1 дБА ниже уровней шума со стороны правого и левого бортов. В целом в зоне бизнес-класса звуковое поле является симметричным относительно главной оси самолета, как при включенной, так и при выключенной СКВ.

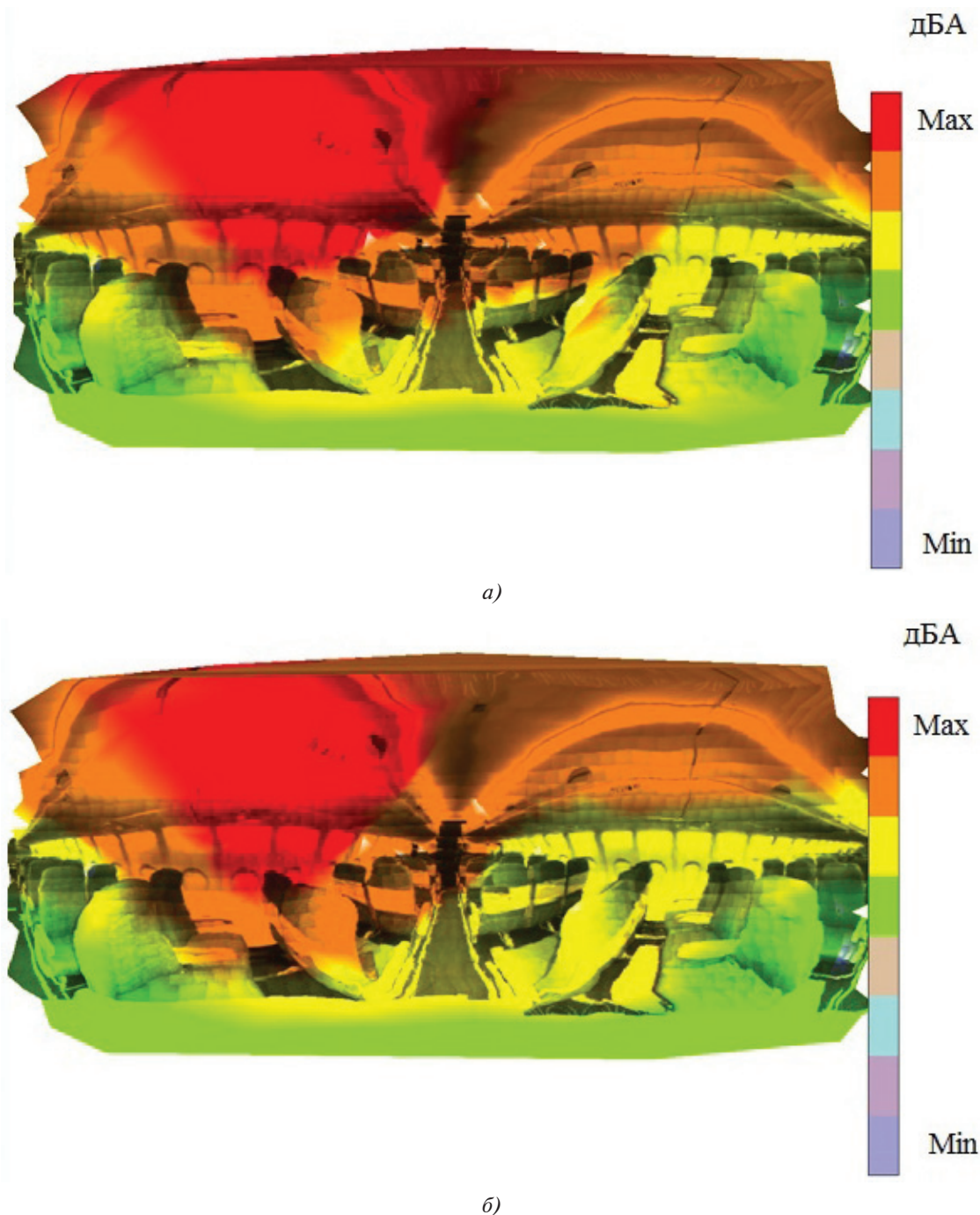


Рис. 4. Карты локализации источников шума для суммарного излучения 20–5000 Гц в зоне 10-го ряда кресел салона эконом-класса для включенной (а) и выключенной (б) СКВ

На картах локализации источников шума, полученных для суммарного излучения при размещении микрофонной решетки в проходе вблизи 7-го ряда кресел эконом-класса, влияния работы СКВ не наблюдается (см. рис. 3). Звуковое поле несимметрично относительно главной оси самолета. Максимальные уровни шума наблюдаются со стороны левого борта (боковая и потолочная панели). По правому борту источник повышенного шума расположен со стороны трубопроводов

подачи воздуха в салон. Отметим, что уровни шума в зоне расположения источников со стороны левого и правого бортов всего на 1 дБА выше среднего уровня фона по салону.

Отключение СКВ фактически не оказывает влияния на карту локализации источников шума для суммарного излучения в зоне 10-го ряда кресел салона эконом-класса (см. рис. 4). При этом звуковое поле является несимметричным относительно главной оси самолета. Со стороны левого



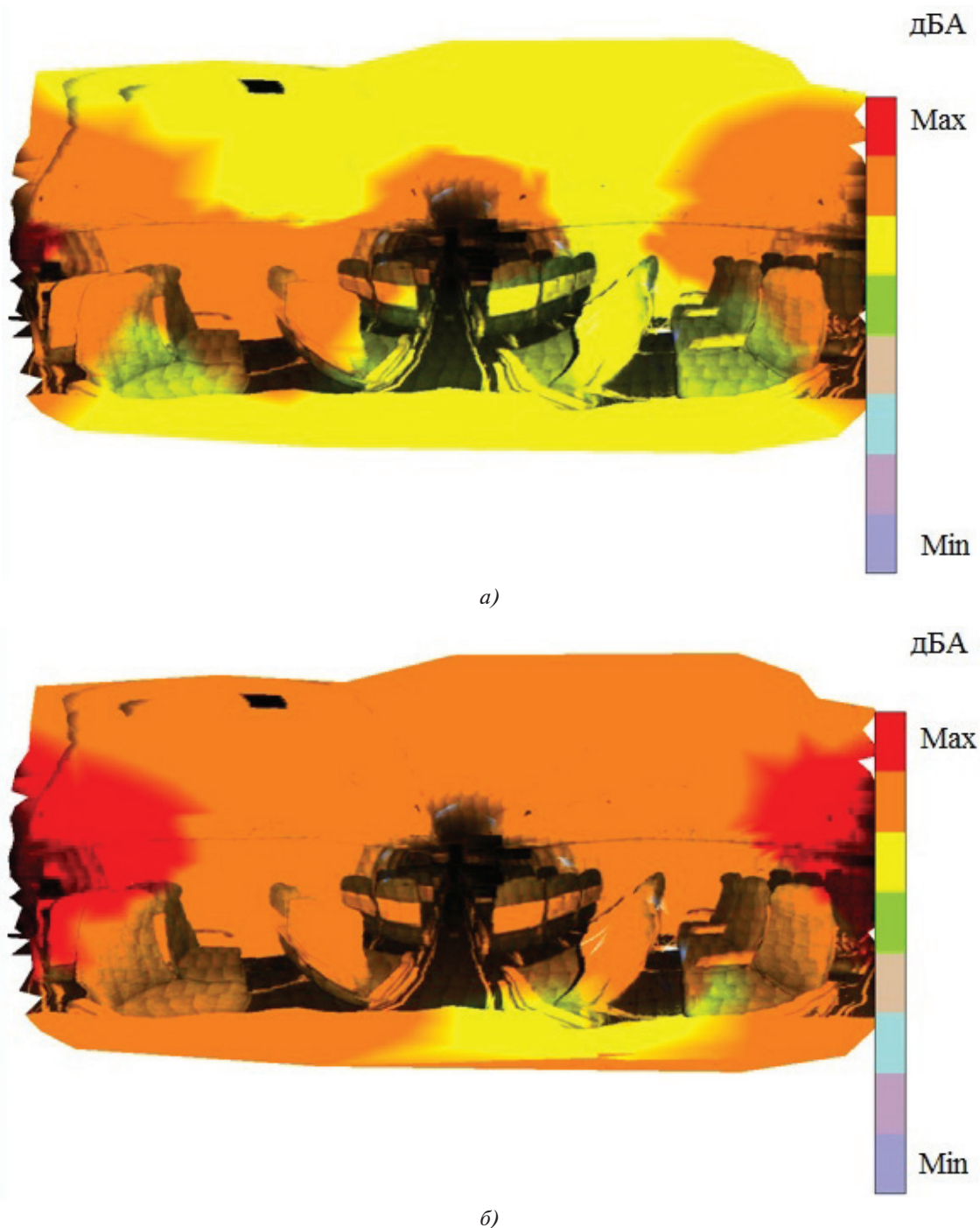


Рис. 5. Карты локализации источников шума для суммарного излучения 20—5000 Гц в зоне 14-го ряда кресел салона эконом-класса для включенной (а) и выключенной (б) СКВ

борта существует область повышенного прохождения звуковой энергии по сравнению с правым бортом. Вероятнее всего, это связано с наличием щелей между панелями интерьера по левому борту экспериментального самолета. Эта особенность звукового поля нетипична для серийных самолетов, однако можно констатировать, что наличие щелей между панелями интерьера может существенным образом влиять на звуковое поле в са-

лоне, приводя к повышению уровней суммарного шума в среднем на 1 дБА.

На рис. 5 представлены карты локализации источников шума для суммарного излучения 20—5000 Гц в салоне самолета при расположении решетки в зоне 14-го ряда кресел салона эконом-класса при включенной и выключенной СКВ. Для суммарного излучения в зоне трубопроводов подачи воздуха в кабину экипажа наблюдаются ис-

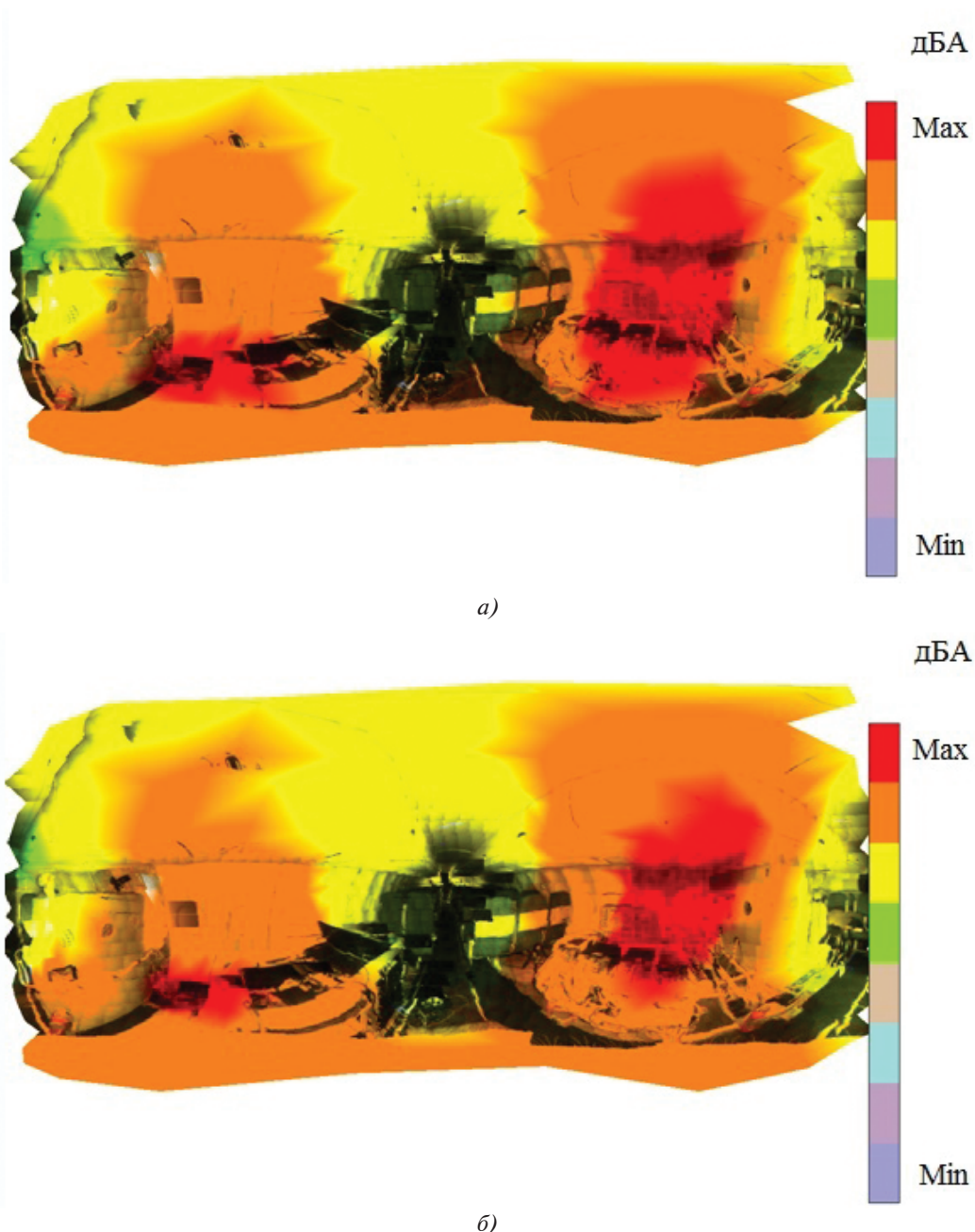


Рис. 6. Карты локализации источников шума для суммарного излучения 20–5000 Гц в зоне 17-го ряда кресел салона эконом-класса для включенной (а) и выключенной (б) СКВ

точники со стороны правого и левого бортов при работе СКВ и обусловленные шумом турбулентного потока в воздуховодах системы. Увеличение уровней шума при работе СКВ в целом составляет 1 дБА.

Для суммарного излучения со стороны правого и левого бортов в хвостовой части салона самолета (см. рис. 6) наблюдаются источники повышенного шума, связанные с излучением металлических поверхностей системы бортовых измерений экспериментального самолета, как со стороны левого, так и со стороны правого бортов. Зву-

ковое поле несимметрично относительно главной оси самолета ввиду конструктивных особенностей рассматриваемой зоны салона. Отключение СКВ не оказывает существенного влияния на карту локализации источников шума. Минимальные уровни шума наблюдаются со стороны прохода между креслами.

На картах локализации суммарного излучения (20–5000 Гц) при расположении решетки в зоне 20-го ряда кресел (см. рис. 7) источник повышенного шума расположен со стороны левого борта и обусловлен повышенным прохождением звуко-



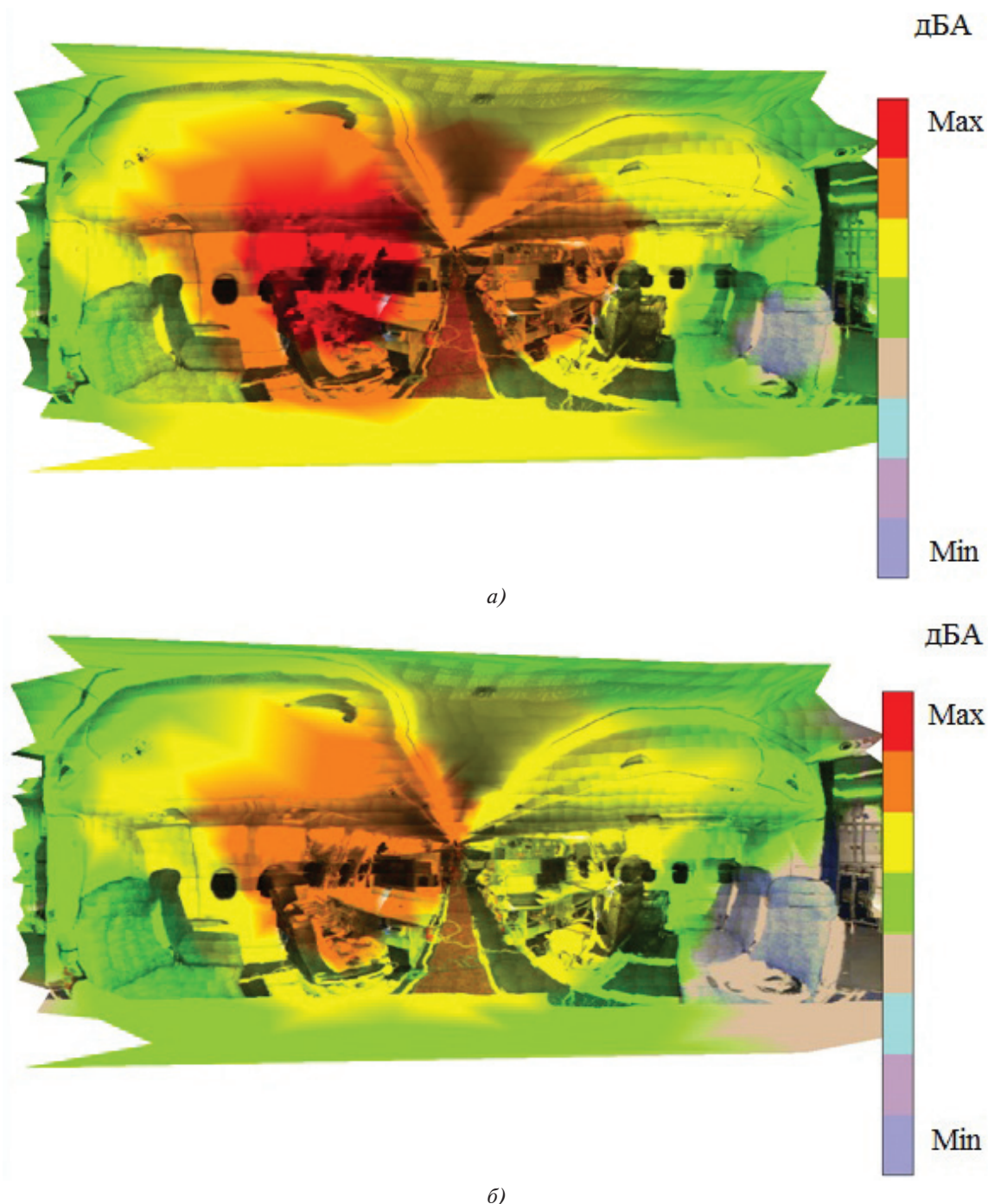


Рис. 7. Карта локализации источников шума для суммарного излучения 20—5000 Гц в зоне 20-го ряда кресел салона эконом-класса для включенной (а) и выключенной (б) СКВ

вой энергии в пассажирский салон со стороны отсутствующих боковых панелей интерьера (рис. 8). На картах не видно характерных источников шума со стороны трубопроводов подачи воздуха, наблюдаемых ранее по длине салона. При отключении СКВ месторасположение источника шума не изменяется, а уровни звукового давления увеличиваются на 1—2 дБА, что может быть связано с увеличением шума вентиляторов СКВ при их работе без набегающего потока. Можно видеть,

что увеличение звукоизоляции конструкции за счет установки боковой панели интерьера в реальных полетных условиях в хвостовой части салона фактически составляет ~2 дБА.

Отметим, что в модельных экспериментах [24—26] по определению звукоизоляции и звукопоглощения различных материалов и конструкций полученные данные об эффективности материалов могут существенно отличаться от реальных условий. Звукоизоляция конструкции существен-



Рис. 8. Общий вид хвостовой части экспериментального самолета со стороны левого борта с отсутствующими панелями интерьера

ным образом зависит от нагружения, и звукоизоляции, в том числе панелей интерьера по длине салона, может быть различной. Этот факт необходимо учитывать при выборе акустических материалов для применения на самолете.

### Выводы

Представлены результаты локализации и ранжирования источников шума в салоне экспериментального самолета RRJ–95 с помощью сферической микрофонной решетки Simcenter Solid Sphere 3DCAM78. Получены карты локализации суммарного излучения в диапазоне частот 20–5000 Гц в единицах дБА. За исключением бизнес-класса звуковое поле в салоне экспериментального самолета является несимметричным относительно главной оси.

Отключение СКВ по длине салона проявляется по-разному. В некоторых случаях уровни шума со стороны трубопроводов подачи воздуха увеличиваются на 1–2 дБА, приводя к увеличению общих уровней шума в рассматриваемой зоне самолета в среднем на 1 дБА в зоне 2-го и 14-го рядов кресел. При измерениях в зоне 7-го ряда кресел

отключение СКВ не оказывает влияния на карту локализации источников шума, хотя источники повышенного шума расположены со стороны трубопроводов подачи воздуха в пассажирский салон.

В зоне 10-го и 17-го рядов кресел источники повышенного шума обусловлены конструктивными особенностями экспериментального самолета. Это зазоры между панелями интерьера (ряд 10) и оборудование самолета (ряд 17) с металлическими поверхностями. В зоне 20-го ряда кресел источник повышенного шума расположен со стороны левого борта ввиду отсутствия боковых панелей интерьера, при этом при выключении СКВ уровни шума несколько увеличиваются.

Полученные в работе результаты указывают на различные механизмы генерации шума при работе системы кондиционирования воздуха. Шум вентиляторов СКВ при отсутствии подачи воздуха в салон может увеличиваться. В зонах салона, где уровни шума со стороны трубопроводов подачи воздуха увеличиваются при включении СКВ, можно констатировать определяющую роль шума турбулентного потока в воздуховодах системы.

Полученные в работе результаты не противоречат результатам исследований других авторов [27, 28]. А незначительная разница в уровнях шума по длине салона в зависимости от режима работы СКВ свидетельствует о необходимости комплексного подхода к снижению шума в салоне современных самолетов, заключающегося в снижении интенсивности излучения всех источников, оказывающих существенный вклад в суммарный взвешенный по шкале А стандартного шумомера уровень звукового давления.

### Библиографический список

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. *Копьев В.Ф.* Традиции и перспективы акустических исследований в ЦАГИ // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 11. С. 60–69.
3. *Дутов А.В., Сыпало К.И., Топоров Н.Б.* Управление созданием научно-технического задела в авиастроении с использованием ситуационного моделирования // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 11. С. 77–86.
4. *Дутов А.В., Сыпало К.И., Топоров Н.Б., Нестеров В.А.* Концепция построения комплекса поддержки принятия решений при формировании научно-технического задела в авиастроении // Известия Российской

- ской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. № 4(104). С. 23–30.
5. *Самохин В.Ф., Мунин А.Г., Кузнецов В.С.* Экология предъявляет свои требования гражданской авиации // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2009. № 1. С. 9–13.
  6. *Дмитриев В.Г., Мунин А.Г., Самохин В.Ф., Чернышев С.Л.* О приоритетах в гражданской авиации // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2009. № 10. С. 15–22.
  7. *Анисимов К.С., Кажан Е.В., Курсаков И.А., Лысенков А.В., Подаруев В.Ю., Савельев А.А.* Разработка облика самолета с использованием высокоточных методов вычислительной аэродинамики и оптимизации // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 7–19.
  8. *Мошков П.А., Василенков Д.А., Рубановский В.В., Строганов А.И.* Локализация источников шума в гермокабине самолета RRJ-95 сферической микрофонной решеткой. Ч. 1. Кабина экипажа // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 37–51. DOI: 10.34759/vst-2020-2-37-51
  9. *Лавров В.Н., Мошков П.А., Попов В.П., Рубановский В.В.* Исследование и снижение шума в кабине экипажа самолета RRJ-95 // Шестая Открытая Всероссийская (XVIII научно-техническая) конференция по аэроакустике (22–27 сентября 2019, Звенигород): Сборник тезисов докладов. — М.: ЦАГИ, 2019. С. 241–242.
  10. *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
  11. *Абрашитов Р.Г., Архиреева Е.Ю., Даньков Б.Н., Меньшов И.С., Северин А.В., Семенов И.В., Требушских Т.В.* Механизмы нестационарных процессов в протяженной каверне // Ученые записки ЦАГИ. 2012. Т. XLIII. № 4. С. 39–56.
  12. *Дубень А.П., Жданова Н.С., Козубская Т.К.* Численное исследование влияния дефлектора на аэродинамические и акустические характеристики турбулентного течения в каверне // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2017. № 4. С. 113–124. DOI: 10.7868/S0568528117040107
  13. *Semiletov V.A., Yakovlev P.G., Karabasov S.A., Faranosov G.A., Kopiev V.F.* Jet and jet-wing noise modelling based on the cabaret miles flow solver and the Ffowcs Williams–Hawkings method // International Journal of Aeroacoustics. 2016. Vol. 15. No. 6–7, pp. 631–645. DOI: 10.1177/1475472X16659387
  14. *Samokhin V., Moshkov P., Yakovlev A.* Analytical model of engine fan noise // Akustika. 2019. Vol. 32, pp. 168–173.
  15. *Беляев И.В., Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Фараносов Г.А.* Исследование влияния угла отклонения закрылка на шум взаимодействия двухконтурной струи и стреловидного крыла в спутном потоке // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 1. С. 17–29. DOI: 10.7868/S0320791916060022
  16. *Голубев А.Ю.* Пространственно-временная структура неоднородных полей пульсаций давления на поверхности самолета: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Пермь: ПНИПУ, 2016. — 32 с.
  17. *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: 10.7868/S0320791916040018
  18. *Баженова Л.А.* Источники шума аэродинамического происхождения в воздуходушных машинах // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 3. С. 369–378. DOI: 10.7868/S0320791918030024
  19. *Танонин М.С., Костромитинов С.В.* Опыт борьбы с шумом в пассажирском салоне самолета ТУ-204 с VIP-компоновкой // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4(3). С. 362–369.
  20. *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: 10.7868/S0320791916040043
  21. *Мошков П.А., Самохин В.Ф., Яковлев А.А.* Проблемы снижения шума, создаваемого на местности самолетами с турбовинтовентиляторными двигателями // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 126–128.
  22. *Самохин В.Ф., Мошков П.А.* Исследование шума биротативного винтовентилятора в статических условиях // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 1. С. 117–120.
  23. *Горбовской В.С., Кажан А.В., Кажан В.Г., Шенкин А.В.* Расчетные исследования тяговых характеристик сопла сверхзвукового пассажирского самолета с помощью методов вычислительной газовой динамики // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 7–16. DOI: 10.34759/vst-2019-4-7-16
  24. *Scamoni F., Piana E.A., Scrosati C.* Experimental evaluation of the sound absorption and insulation of an innovative coating through different testing methods // Building Acoustics. 2017. Vol. 24. No. 3, pp. 173–191. DOI: 10.1177/1351010X17728596
  25. *Зверев А.Я., Черных В.В.* Определение акустической эффективности материалов и конструкций в лабораторных и натуральных условиях. Ч. 1. Звукопоглощение и звукоизоляция // Ученые записки ЦАГИ. 2018. Т. 49. № 8. С. 40–55.
  26. *Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М., Бахтин Б.Н., Гребенников А.С., Асфандияров Ш.А., Карпов И.А., Ким А.А.* Лабораторная установка для исследования звукопоглощающих покрытий из метаматериалов при скользящем распространении звука и влияние типа источника на их эффективность // Акустический журнал. 2020. Т. 66. № 3. С. 332–341. DOI: 10.31857/S0320791920030016



27. *Abdrashitov R., Golubev A.* Identification of sources of noise in the cabin and the definition of the local passage of sound energy through fuselage based on the results of in-flight measurements of the Superjet // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. AIAA Paper No. 2015-3114. 2015. DOI: 10.2514/6.2015-3114
28. *Hu N., Buchholz H., Herr M., Spehr C., Haxter S.* Contributions of Different Aeroacoustic Sources to Aircraft Cabin Noise // 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27-29 May 2013, Berlin, Germany). AIAA Paper. No. 2013-2030. DOI: 10.2514/6.2013-2030

## NOISE SOURCES LOCALIZATION IN THE RRJ-95 AIRCRAFT PRESSURE CABIN BY SPHERICAL MICROPHONE ARRAY. PART 2. PASSENGER CABIN

Moshkov P.A.<sup>1\*</sup>, Vasilenkov D.A.<sup>2\*\*</sup>, Rubanovskii V.V.<sup>1\*\*\*</sup>, Stroganov A.I.<sup>2\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> IRKUT Corporation Regional Aircraft,  
26, Leninskaya Sloboda str., Moscow, 115280, Russia

<sup>2</sup> "Siemens Industries Software",  
9, Bolshaya Tatarskaya str., Moscow, 115184, Russia

\* e-mail: moshkov89@bk.ru

\*\* e-mail: dmitri.vasilenkov@siemens.com

\*\*\* e-mail: V\_Rubanovsky@scac.ru

\*\*\*\* e-mail: alexey.stroganov@siemens.com

### Abstract

The relevance of the problem of enhanced acoustic comfort ensuring for passengers and cockpit personnel is beyond doubt. In particular, at present, there is a problem of professional diminished hearing among the aircrew members of civil aviation aircraft of Russia. The risk factor of this malady development is the noise inside the cockpit.

The problem solution of acoustic comfort ensuring in the cabin is impossible without fulfilling a complex of engineering and fundamental studies at all stages of creation of new samples of aerotechnics. One of the trends of the studies is identification, localization and ranging by intensity the main noise sources in the cabin of the aircraft-prototype. The results of this study are necessary to ensure optimal placement of sound proof, sound absorbing and vibration-damping materials in the onboard structure, and issue recommendations on noise reduction of the air conditioning and ventilation system.

The article presents the results of localization and ranging by the intensity of the noise sources in the RRJ-95 aircraft cockpit, employing the 3DCAM54 spherical array.

Acoustic measurements were performed on the RRJ-95 experimental aircraft No 95005 with the cockpit, updated from the viewpoint of noise reduction and reverberation disturbance. The tests were performed at the cruise speed mode at the altitude of 11 km, determined by the flight Mach number of 0.8.

Measurements were performed at the routine operation mode of the air conditioning and ventilation system and at its turn-off.

As the result of the conducted studies, the noise sources localization maps in the one-third-octave frequency bands of 630-3150 Hz were obtained. The main noise sources in the cabin are the air conditioning and ventilation system (ACVS) and the noise of the turbulent boundary layer. As far as the air feeding is being terminated after the ACVS turn-off, but the fans are not turned-off, the ACVS impact manifests itself while its turn-off from the side of ducts feeding air to the cockpit. The two basic mechanisms can be outlined in the ACSV noise. In particular, in the noise of the one-third-octave frequency band of 1000 Hz, the ACVS turbulent flow dominates the noise caused by the "rotor-stator" interaction in the ACVS fans. In the one-third-octave frequency band of 1250-2500 Hz the noise of "rotor-stator" interaction prevails while fans operation.

**Keywords:** civil aircraft, acoustic tests, microphone array, spherical beam-forming, cabin noise, noise sources localization map.

### References

1. Moshkov P.A. Problems of civil aircraft design with regard to cabin noise requirements. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 28-41. DOI: 10.34759/vst-2019-4-28-41

2. Kop'ev V.F. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2018, no. 11, pp. 60-69.
3. Dutov A.V., Sypalo K.I., Toporov N.B. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2018, no. 11, pp. 77-86.
4. Dutov A.V., Sypalo K.I., Toporov N.B., Nesterov V.A. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*, 2018, no. 4(104), pp. 23-30.
5. Samokhin V.F., Munin A.G., Kuznetsov V.S. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2009, no. 1, pp. 9-13.
6. Dmitriev V.G., Munin A.G., Samokhin V.F., Chernyshev S.L. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2009, no. 10, pp. 15-22.
7. Anisimov K.S., Kazhan E.V., Kursakov I.A., Lysenkov A.V., Podaruev V.Y., Savel'ev A.A. Aircraft layout design employing high-precision methods of computational aerodynamics and optimization. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 7-19.
8. Moshkov P.A., Vasilenkov D.A., Rubanovskii V.V., Stroganov A.I. Noise sources localization in the RRJ-95 aircraft pressure cabin by spherical microphone array. Part 1. Cockpit. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 37-51. DOI: 10.34759/vst-2020-2-37-51
9. Lavrov V.N., Moshkov P.A., Popov V.P., Rubanovskiy V.V. *Materialy Shestoi Otkrytoi Vserossiiskoi (XVIII nauchno-tekhnicheskoi) konferentsii po aeroakustike (22-27 September 2019, Zvenigorod)*, Moscow, TsAGI, 2019, pp. 241-242.
10. 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
11. Abdrashitov R.G., Arkhireeva E.Yu., Dan'kov B.N., Men'shov I.S., Severin A.V., Semenov I.V., Trebunskikh T.V. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2012, vol. XLIII, no. 4, pp. 39-56.
12. Duben' A.P., Zhdanova N.S., Kozubskaya T.K. Numerical investigation of the deflector effect on the aerodynamic and acoustic characteristics of turbulent cavity flow. *Fluid Dynamics*, 2017, vol. 52, no. 4, pp. 561-571. DOI: 10.1134/S001546281704010X
13. Semiletov V.A., Yakovlev P.G., Karabasov S.A., Faranosov G.A., Kopiev V.F. Jet and jet-wing noise modelling based on the cabaret miles flow solver and the Ffowcs Williams-Hawkings method. *International Journal of Aeroacoustics*, 2016, vol. 15, no. 6-7, pp. 631-645. DOI: 10.1177/1475472X16659387
14. Samokhin V., Moshkov P., Yakovlev A. *Analytical model of engine fan noise*, *Akustika*, 2019, vol. 32, pp. 168-173.
15. Belyaev I.V., Zaytsev M.Y., Kopiev V.F., Ostrikov N.N., Faranosov G.A. Studying the effect of flap angle on the noise of interaction of a high-bypass jet with a swept wing in a co-flow. *Acoustical Physics*, 2017, vol. 63, no. 1, pp. 14-25. DOI: 10.1134/S1063771016060026
16. Golubev A.Yu. *Prostranstvenno-vremennaya struktura neodnorodnykh polei pul'satsii davleniya na poverkhnosti samoleta* (Space-time structure of inhomogeneous pressure pulsation fields on the aircraft surface), Doctor's thesis, Perm, PNIPU, 2016, 32 p.
17. Aksenov A.A., Gavriilyuk V.N., Timushev S.F. Numerical simulation of tonal fan noise of computers and air conditioning systems. *Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 4, pp. 447-455. DOI: 0.1134/S1063771016040011
18. Bazhenova L.A. Noise Sources of Aerodynamic Origin in Air Blowers. *Acoustical Physics*, 2018, vol. 64, no. 3, pp. 356-364. DOI: 10.1134/S1063771018030028
19. Tanonin M.S., Kostromitinov S.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, vol. 20, no. 4(3), pp. 362-369.
20. Baklanov V.S. Role of structural noise in aircraft pressure cockpit from vibration action of new-generation engines, *Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 4, pp. 456-461. DOI: 10.1134/S1063771016040047
21. Moshkov P.A., Samokhin V.F., Yakovlev A.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2018, no. 4, pp. 126-128.
22. Samokhin V.F., Moshkov P.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2020, no. 1, pp. 117-120.
23. Gorbovskoi V.S., Kazhan A.V., Kazhan V.G., Shenkin A.V. Numerical studies of nozzle thrust characteristics of supersonic civil aircraft by computational gas dynamics method. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 7-16. DOI: 10.34759/vst-2019-4-7-16
24. Scamoni F., Piana E.A., Scrosati C. Experimental evaluation of the sound absorption and insulation of an innovative coating through different testing methods. *Building Acoustics*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 173-191. DOI: 10.1177/1351010X17728596
25. Zverev A.Ya., Chernykh V.V. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2018, vol. 49, no. 8, pp. 40-55.
26. Bobrovnikskii Yu.I., Tomilina T.M., Bakhtin B.N., Grebennikov A.S., Asfandiyarov Sh.A., Karpov I.A., Kim A.A. *Akusticheskii zhurnal*, 2020, vol. 66, no. 3, pp. 332-341. DOI: 10.31857/S0320791920030016
27. Abdrashitov R., Golubev A. Identification of sources of noise in the cabin and the definition of the local passage of sound energy through fuselage based on the results of in-flight measurements of the Superjet. *21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. AIAA Paper No. 2015-3114. 2015. DOI: 10.2514/6.2015-3114
28. Hu N., Buchholz H., Herr M., Spehr C. Haxter S. Contributions of Different Aeroacoustic Sources to Aircraft Cabin Noise, *19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2013, AIAA Paper. 2013-2030. DOI:10.2514/6.2013-2030