

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 534.23:534.874.1:534.6.08

DOI:10.34759/vst-2020-2-37-51

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ШУМА В ГЕРМОКАБИНЕ САМОЛЕТА RRJ-95 СФЕРИЧЕСКОЙ МИКРОФОННОЙ РЕШЕТКОЙ. ЧАСТЬ 1. КАБИНА ЭКИПАЖА

Мошков П.А.^{1*}, Василенков Д.А.^{2**}, Рубановский В.В.^{1***}, Строганов А.И.^{2****}

¹ «Гражданские самолеты Сухого»,
ул. Ленинская Слобода, 26, Москва, 115280, Россия

² «Сименс Индастри Софтвер»,
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 12.02.2020

Представлены результаты локализации и ранжирования по интенсивности источников шума в кабине экипажа самолета RRJ-95 с применением сферической решетки Simcenter Solid Sphere 3DCAM54. Звуковое поле в кабине экипажа является сложным по своей структуре и несимметричным относительно главной оси самолета. Получены карты локализации источников шума с применением метода сферического бимформинга для суммарного излучения (20-5000 Гц) и излучения в третьоктавных полосах частот от 630 до 3150 Гц.

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

Введение

Обеспечение акустического комфорта пассажиров и членов экипажа является одной из актуальных задач при проектировании гражданских самолетов [1]. В частности, в настоящее время существует проблема профессиональной тугоухости у членов летных экипажей воздушных судов гражданской авиации России [2, 3]. Фактором риска развития данного заболевания является шум в кабине экипажа.

Решение задачи обеспечения акустического комфорта в салоне самолета невозможно без выполнения комплекса инженерных и фундаментальных исследований на всех этапах создания нового образца авиационной техники [4]. Одним из направлений исследований является идентификация, локализация и ранжирование по интенсивности основных источников шума в салоне самолета-прототипа. Результаты этого исследования

необходимы для обеспечения оптимального размещения звукоизолирующих, звукопоглощающих и вибродемпфирующих материалов в бортовой конструкции и выдачи рекомендаций по снижению шума СКВ. Такое исследование может быть выполнено двумя основными способами.

Первый вариант – применение метода интенсивности [5–7] (сканирование звукового поля с помощью интенсивметрического зонда). Современные реализации данного подхода позволяют в режиме реального времени строить трехмерные карты интенсивности звука вокруг исследуемой поверхности и определять мощность источника.

Во втором варианте визуализация звукового поля в салоне может быть выполнена с помощью сферической микрофонной решетки с последующей постобработкой сигнала методами сферического бимформинга [8–11], акустической голографии [12], «эквивалентного источника» (equivalent source method (ESM)) [13] и методом «обратной свертки» (deconvolution method (DCV)) [13]. Точность локализации источников шума зависит от числа микрофонов и правильности выбора алгоритма обработки сигналов, а диапазон рабочих частот микрофонной решетки характеризуется ее диаметром, плотностью расположения микрофонов и используемым алгоритмом постобработки.

В аэроакустике при исследовании звуковых полей различных источников методы плоского бимформинга применяются достаточно давно и успешно как в лабораторных [14, 15], так и в натурных экспериментах [16, 17]. Для локализации источников шума в салоне самолета методы плоского бимформинга с использованием плоской микрофонной решетки неприменимы, поскольку шумовая карта, полученная в каком-либо сечении салона (в плоскости), не может помочь однозначно определить источник, его интенсивность, диаграмму направленности и мощность.

Для проведения испытаний на локализацию источников шумов внутри замкнутых пространств со сложной окружающей геометрией и неприменимостью условий свободного акустического поля используются сферические микрофонные решетки. Сферическая микрофонная решетка учитывает отражение звуковых волн от окружающей геометрии и самой микрофонной решетки. Локализация производится одновременно для всего пространства с углом обзора 360°. Автоматическое построение геометрии внутреннего пространства с «натянутым» на нее фотоизображением посредством лазерного дальномера со встроенной фотокамерой

позволяет ускорить проведение лётных акустических испытаний. Акустические карты пересчитываются и проецируются на трехмерное представление салона. В результате получают точные данные, полностью соответствующие реальному распределению уровня звукового давления и/или интенсивности звука в кабине экипажа или салоне самолета на различных режимах полёта в рабочем диапазоне сферической решетки.

Технологии сферического бимформинга в аэроакустике начали активно применяться для выполнения исследований только в последнее время. Настоящая работа является первым этапом исследований шума в гермокабине самолета RRJ-95 с помощью сферической микрофонной решетки. Ранее в России на отечественных самолетах такие испытания не проводились. В статье представлены результаты акустических измерений в кабине экипажа.

Методика эксперимента и используемое оборудование

Комплект оборудования для испытаний включал в себя:

- сферическую микрофонную решетку Simcenter Solid Sphere 3DCAM54 диаметром 30 см на 54 микрофона (рис. 1). Динамический диапазон решетки без расширителей (54 микрофона) 500–10000 Гц;
- 3D-сканер геометрии салона;
- систему измерений Simcenter SCADAS с блоком питания, кабелями и переходниками в комплекте;
- ноутбук (использовался только в наземных испытаниях при сканировании геометрии салона).

Первым этапом настоящей работы было 3D-сканирование геометрии кабины экипажа в наземных условиях. Центр сканера совпадал с центром сферической решетки (см. рис. 1). В дальнейшем результаты акустических измерений «накладывались» на реальную 3D-геометрию кабины экипажа.

Акустические измерения были выполнены на экспериментальном самолете RRJ-95 № 95005 с доработанной с точки зрения снижения шума и реверберационных помех кабиной экипажа. Испытания выполнены на режиме прямолинейного крейсерского полета на высоте 11 км со скоростью, определяемой числом Маха полета, 0,8. Время записи сигналов параллельно с 54 измерительных каналов составляло не менее 60 с. Измерения выполнены при штатной работе системы кондиционирования и вентиляции воздуха и при ее вык-



Рис. 1. Сферическая микрофонная решетка Simcenter Solid Sphere 3DCAM54 в базовой конфигурации (54 микрофона)

лючении. При испытаниях дверь в кабину экипажа была открыта ввиду невозможности размещения в ней всего комплекта оборудования и согласно требованиям безопасности экспериментальных полетов.

Анализ результатов испытаний

Анализ результатов был выполнен для режимов включенной и выключенной СКВ. Отключение СКВ фактически заключается в прекращении 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 экспериментальных исследований другого

способа разделения источников шума в салоне самолета.

На рис. 2 представлена карта локализации источников шума для суммарного взвешенного по шкале А стандартного шумомера уровня звукового давления в диапазоне частот 20—5000 Гц для случаев включенной и выключенной СКВ. Результаты получены с использованием алгоритма стандартного сферического бимформинга [18] с контрастом 8 дБА.

Влияние СКВ заметно слева сверху, в зоне устройства индивидуального обдува инспектора, и справа, в зоне обдува второго пилота. Можно видеть, что звуковое поле в кабине является сложным по своей структуре и несимметричным относительно главной оси самолета. При отключении СКВ суммарные уровни звукового давления уменьшаются на 1—2 дБА.

На рис. 3—10 представлены карты локализации источников шума в третьоктавных полосах частот 630—3150 Гц. Данный диапазон частот обеспечивает качественные результаты с учетом применяемого алгоритма сферического бимформинга, диаметра сферической решетки и числа микрофонов в ней. Единицы измерения и контраст на рис. 3—10 аналогичны данным на рис. 2.

На картах локализации источников шума в третьоктавной полосе частот 630 Гц отчетливо видно влияние СКВ, причем справа сверху, хотя суммарное излучение от СКВ доминирует сверху слева (рис. 2,б). Также на рисунке виден дополнительный источник, не зависящий от работы СКВ, расположенный со стороны входной двери. Интенсивность этого источника соизмерима с шумом СКВ. Вероятнее всего, этот дополнительный источник шума в кабине экипажа связан с повышенным шумом в передней сервисной зоне. Тем не менее, в диапазоне третьоктавных полос частот 800—3150 Гц этот источник не проявляется, и при оценке суммарного уровня шума (рис. 2) его вклад незначителен.

В третьоктавной полосе 800 Гц (рис. 4) влияния отключения СКВ не наблюдается, однако месторасположение источника (слева сверху) соответствует шуму СКВ, аналогичная картина наблюдается в третьоктавных полосах 1250 Гц (рис. 6), 1600 Гц (рис. 7), 2000 Гц (рис. 8) и 2500 Гц (рис. 9). Данный факт свидетельствует о доминировании в диапазоне частот 1250—2500 Гц шума, вызванного «ротор-статор»-взаимодействием при работе вентиляторов СКВ.

Очень показательной является карта локализации источников шума в третьоктавной полосе

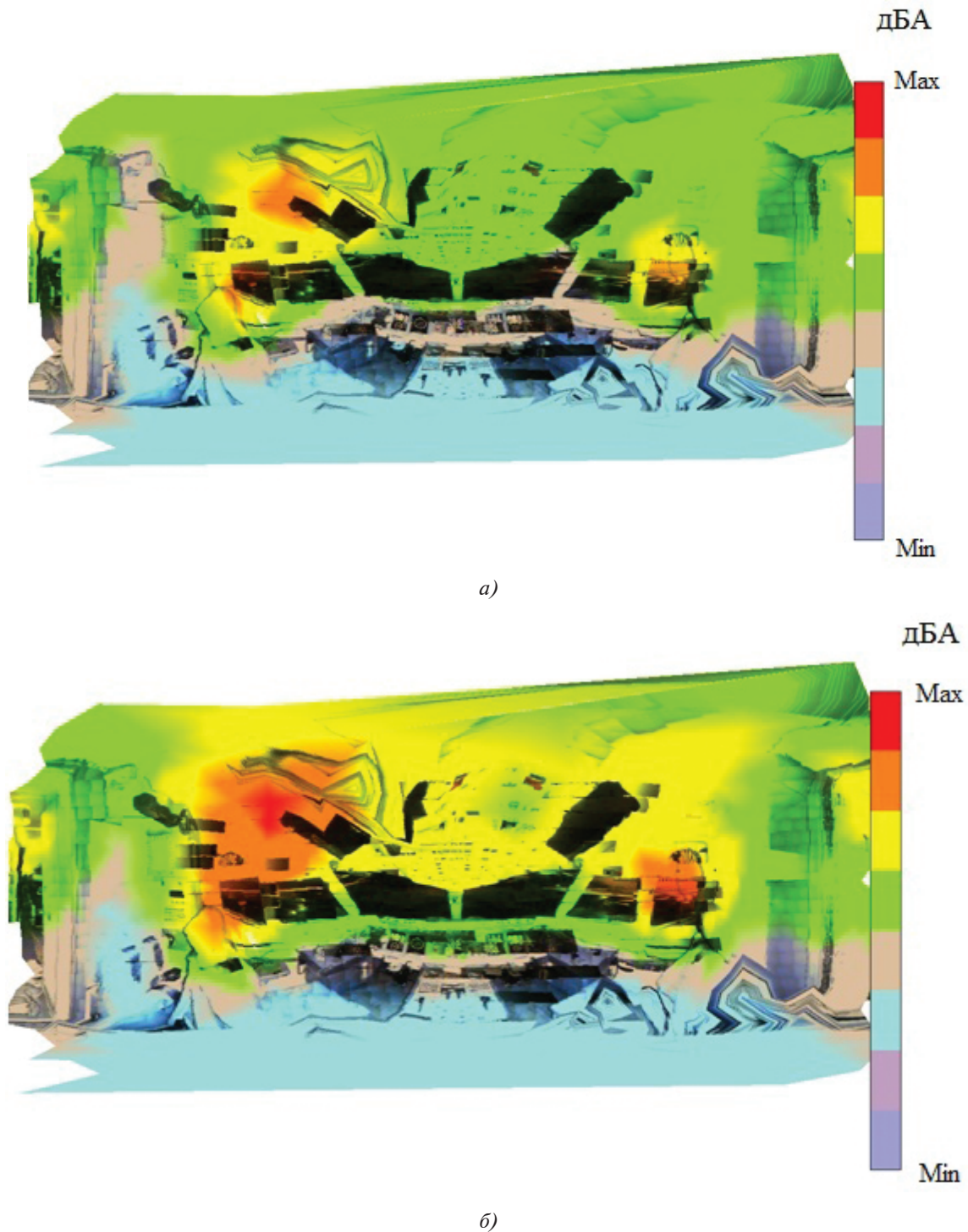


Рис. 2. Карта локализации источников шума в кабине экипажа для суммарного взвешенного по шкале А стандартного шумомера уровня звукового давления (20—5000 Гц): а — СКВ выключена; б — СКВ включена

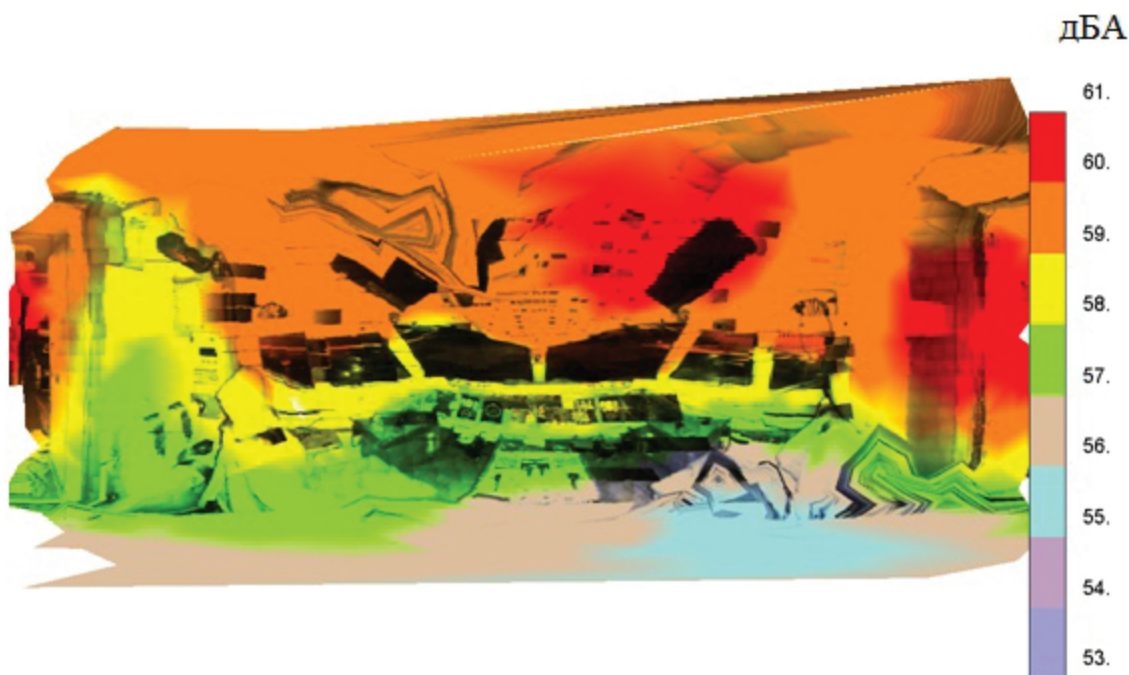
частот 1600 Гц (рис. 7). Можно видеть четыре доминирующих источника как при включенной, так и при выключенной СКВ. Фактически они расположены на срезах трубопроводов обдува командира воздушного судна (слева внизу), второго пилота (справа внизу), инспектора (вверху слева) и срезе общей вентиляции кабины экипа-

жа (справа вверху). Отключение подачи воздуха в кабину фактически не оказывает влияния на карту локализации источников шума в данной полосе частот.

Наибольшее влияние отключения СКВ проявляется в третьоктавной полосе 1000 Гц (рис. 5), что свидетельствует о доминировании (на 3 дБА)



а)



б)

Рис. 3. Карта локализации источников шума в кабине экипажа в третьоктавной полосе частот 630 Гц: а — СКВ выключена; б — СКВ включена

в данной полосе частот шума турбулентного потока СКВ над шумом, обусловленным «ротор-статор»-взаимодействием в вентиляторах СКВ.

На картах локализации источников шума в третьоктавной полосе 3150 Гц (рис. 10) влияния СКВ не наблюдается, за исключением зоны обдува командира воздушного судна, что подтверждает

ранее полученный результат [19, 20] о доминировании шума турбулентного пограничного слоя в общем уровне шума в кабине экипажа на частотах свыше 3150 Гц.

Ранее авторами при исследовании шума в кабине экипажа RRJ-95 было установлено [19, 20], что после доработки кабины экипажа самолета

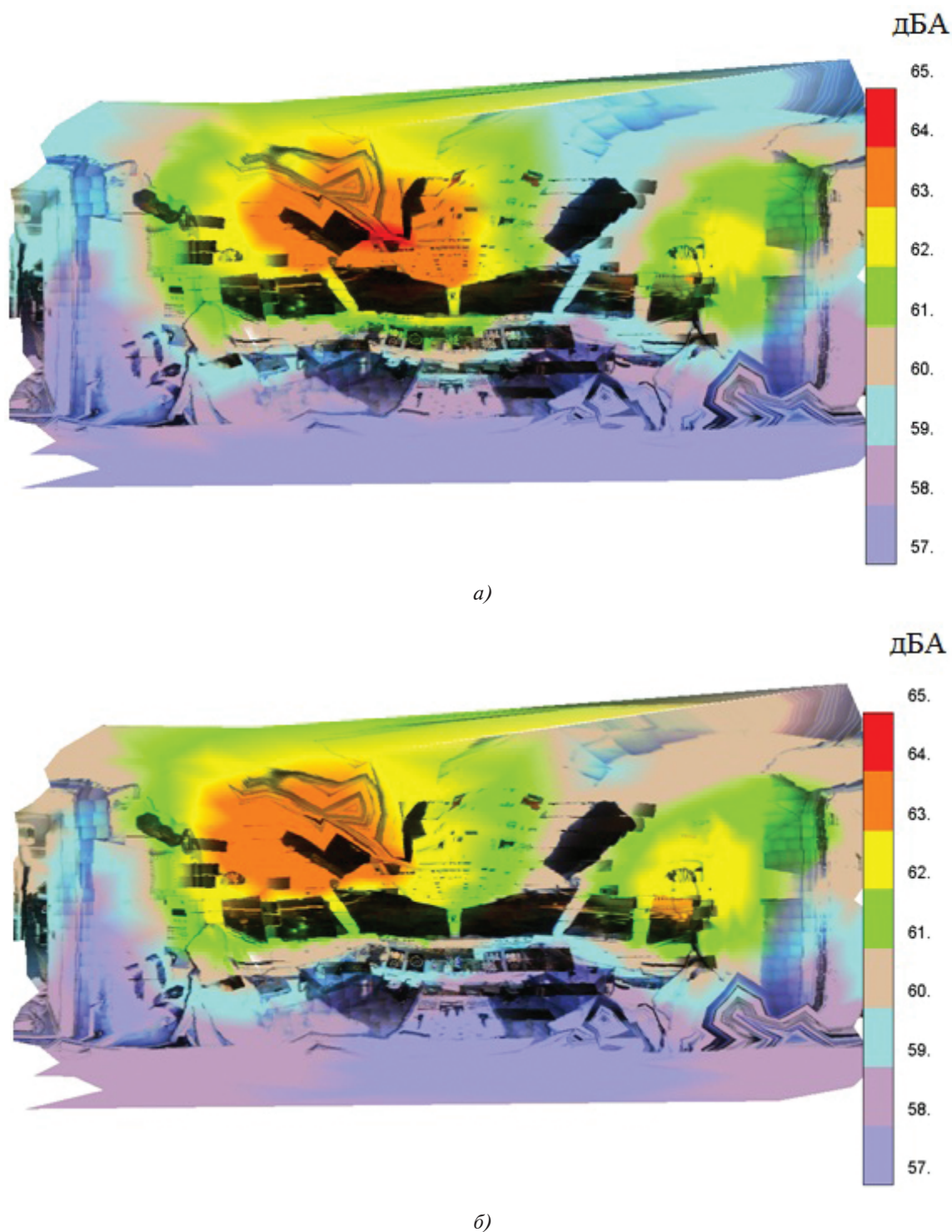


Рис. 4. Карта локализации источников шума в кабине экипажа в третьоктавной полосе частот 800 Гц: *а* — СКВ выключена; *б* — СКВ включена

RRJ-95 с целью снижения шума и реверберационных помех на режиме крейсерского полета вклад СКВ соизмерим с вкладом шума турбулентного пограничного слоя при оценке суммарного уровня шума в дБА. На частотах свыше 3150 Гц доминирует шум турбулентного пограничного

слоя и работа СКВ не оказывает влияния на уровни шума. Другие источники, такие как акустическое излучение силовой установки [21, 22] и структурный шум двигателя [23], не оказывают существенного влияния при оценке суммарного уровня шума в дБА. Отметим, что измерения шума в ра-



а)



б)

Рис. 5. Карта локализации источников шума в кабине экипажа в третьоктавной полосе частот 1000 Гц: а — СКВ выключена; б — СКВ включена

ботах [19, 20] выполнялись в пяти точках звукового поля в кабине экипажа при закрытой двери. Результаты локализации источников шума, полученные в настоящей работе, не противоречат ранее полученным результатам, а также исследованиям других авторов [24, 25].

Выводы

Представлены результаты визуализации звукового поля в кабине экипажа самолета RRJ-95. Получены карты локализации источников шума для суммарного излучения (20—5000 Гц) и излучения в третьоктавных полосах частот 630—3150 Гц. Основными источниками шума в каби-

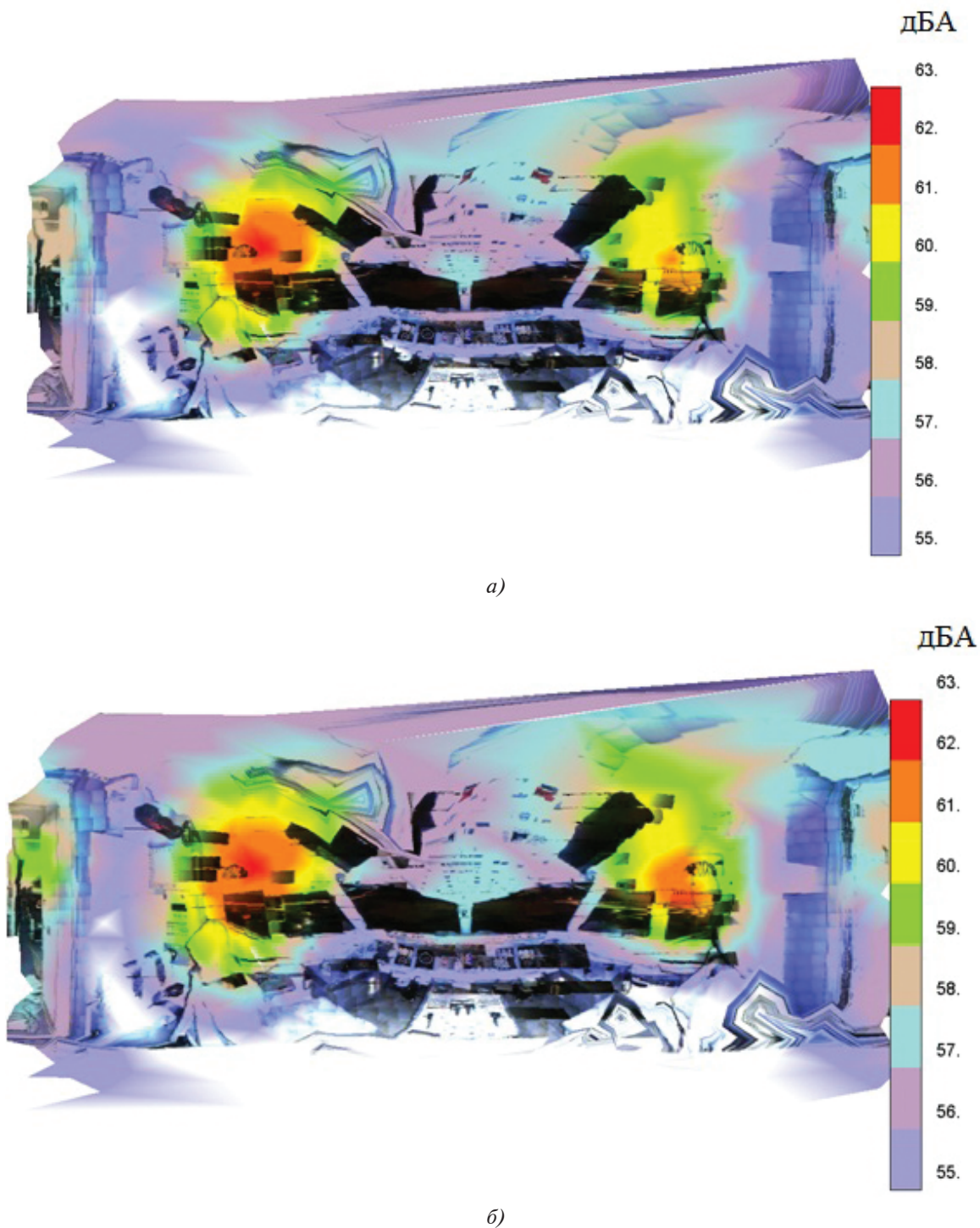
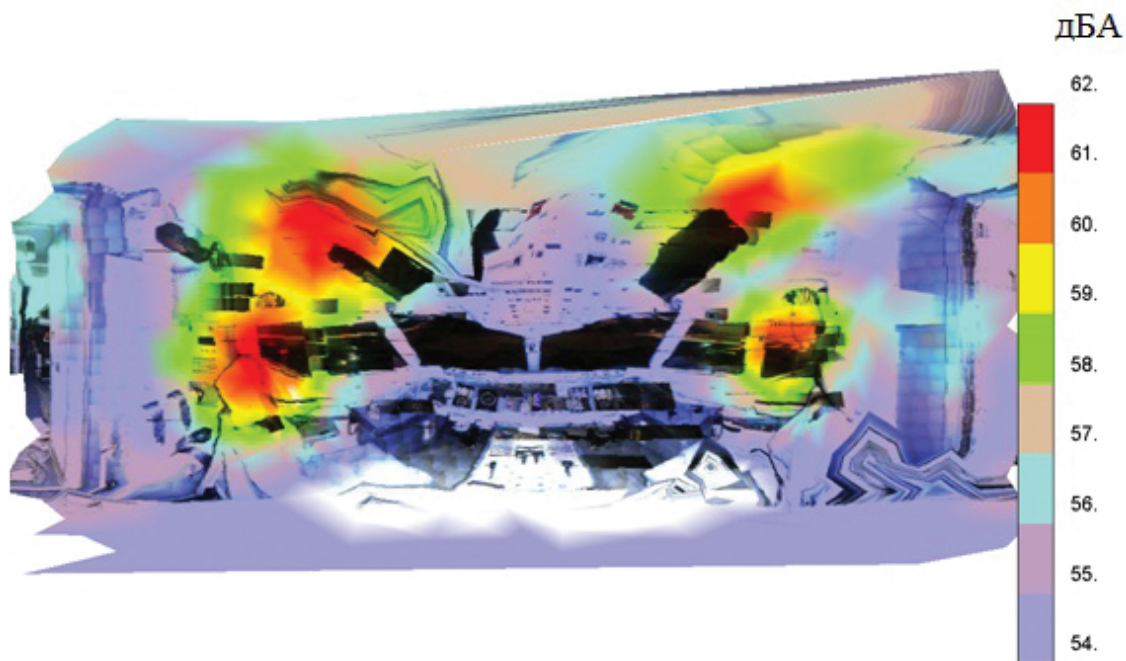


Рис. 6. Карта локализации источников шума в кабине экипажа в третьоктавной полосе частот 1250 Гц: а — СКВ выключена; б — СКВ включена

не экипажа являются система кондиционирования и вентиляции воздуха и пульсации давления в турбулентном пограничном слое на поверхности фюзеляжа. Поскольку при отключении СКВ прекращается подача воздуха, но не отключаются вентиляторы системы, то влияние СКВ проявляется и при ее выключении — со стороны тру-

бопроводов подачи воздуха в кабину экипажа. В шуме СКВ можно выделить два основных механизма. Это шум турбулентного потока в воздуховодах и шум, вызванный «ротор-статор»-взаимодействием в вентиляторах. В частности, в третьоктавной полосе частот 1000 Гц шум турбулентного потока СКВ доминирует над шумом, обус-



а)



б)

Рис. 7. Карта локализации источников шума в кабине экипажа в третьоктавной полосе частот 1600 Гц: а — СКВ выключена; б — СКВ включена

ловленным «ротор-статор»-взаимодействием. В диапазоне третьоктавных полос частот 1250-2500 Гц доминирует шум взаимодействия «ротор-статор».

При открытой двери в кабину экипажа появляется дополнительный источник шума в третьоктавной полосе 630 Гц со стороны входной дзве-

ри, по интенсивности излучения сопоставимый с шумом СКВ.

Дальнейшее увеличение звукоизоляции конструкции кабины экипажа RRJ-95 за счет пассивных методов не приведет к существенному снижению шума в кабине экипажа. В первую очередь необходимо обеспечить эффективное шумоглушение

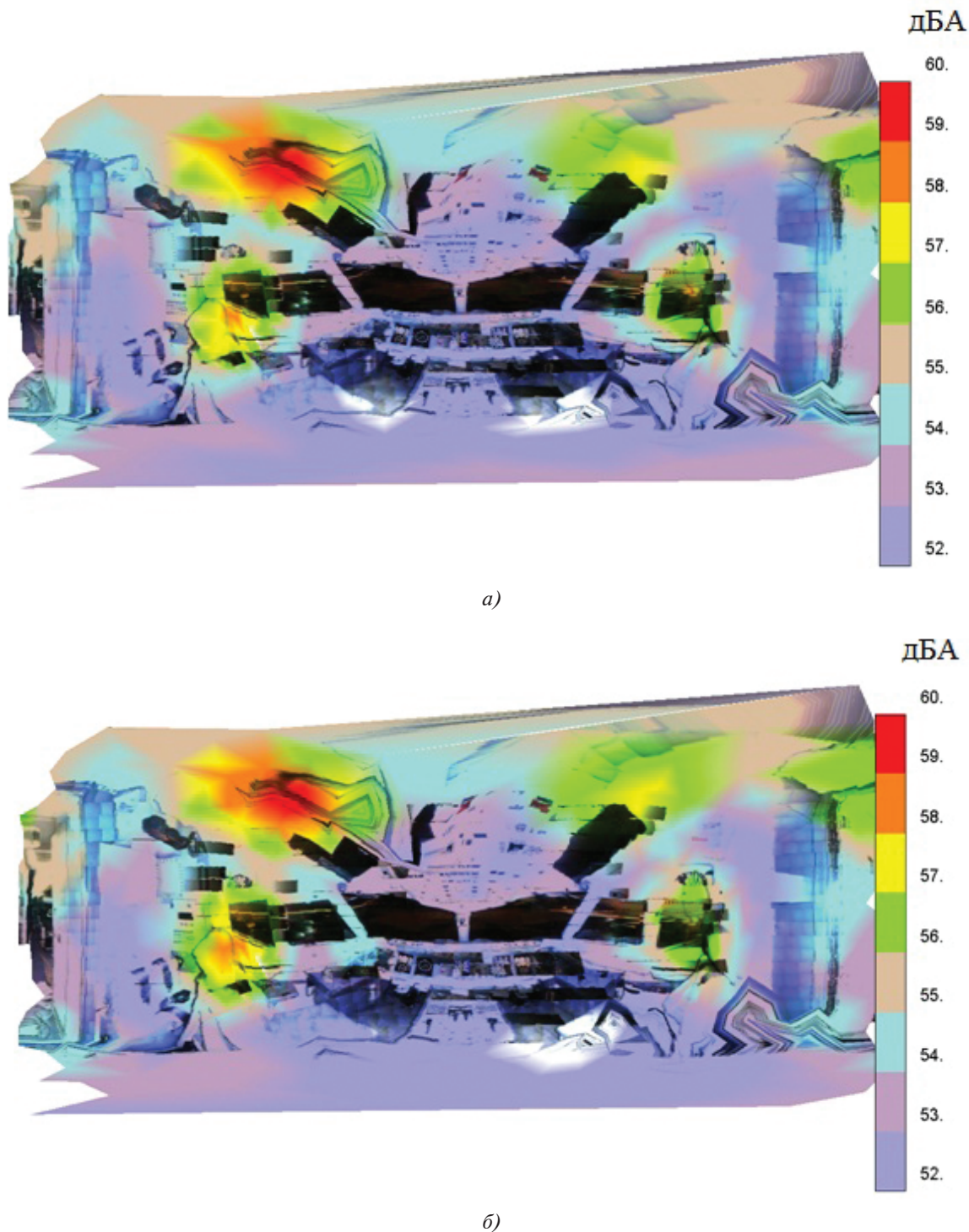
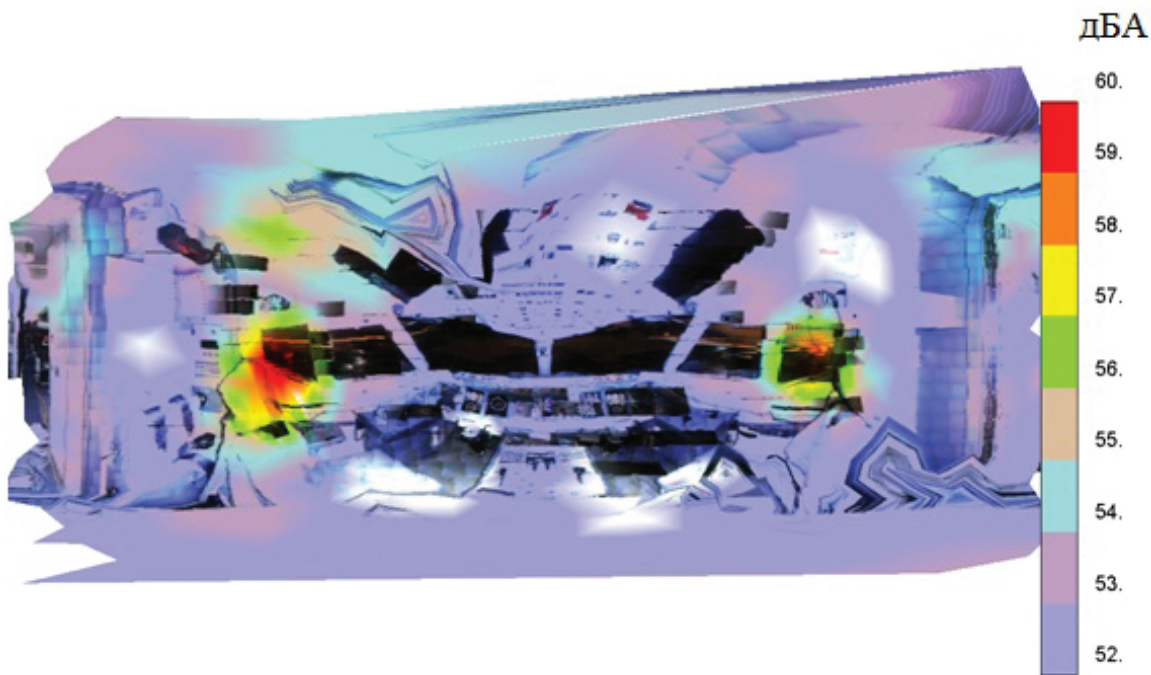


Рис. 8. Карта локализации источников шума в кабине экипажа в третьоктавной полосе частот 2000 Гц: а — СКВ выключена; б — СКВ включена

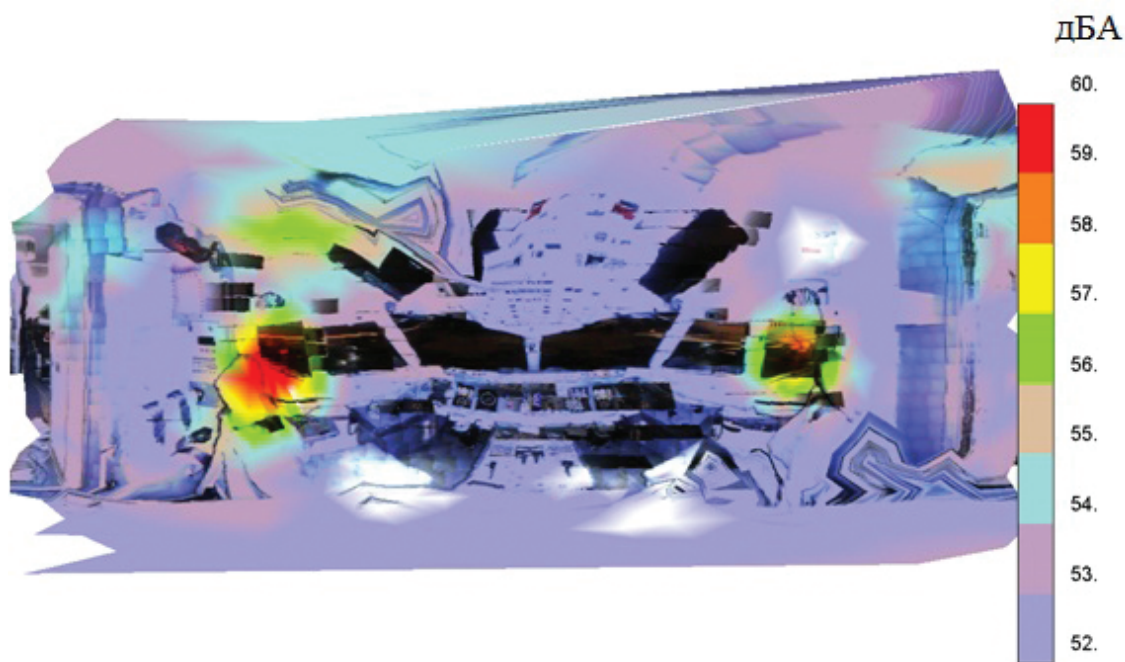
в трубопроводах СКВ и снизить интенсивность шума, обусловленного «ротор-статор»-взаимодействием в вентиляторах СКВ.

Библиографический список

1. Копьев В.Ф. Традиции и перспективы акустических исследований в ЦАГИ // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 11. С. 60-69.
2. Вильк М.Ф., Глуховский В.Д., Курьеров Н.Н., Панкова В.Б., Прокопенко Л.В. Современный методический подход к оценке акустической нагрузки на членов летных экипажей воздушных судов гражданской авиации // Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 3. С. 27-32.
3. Вильк М.Ф., Панкова В.Б., Глуховский В.Д., Капцов В.А. Авиационный внутрикабинный шум как фактор



а)

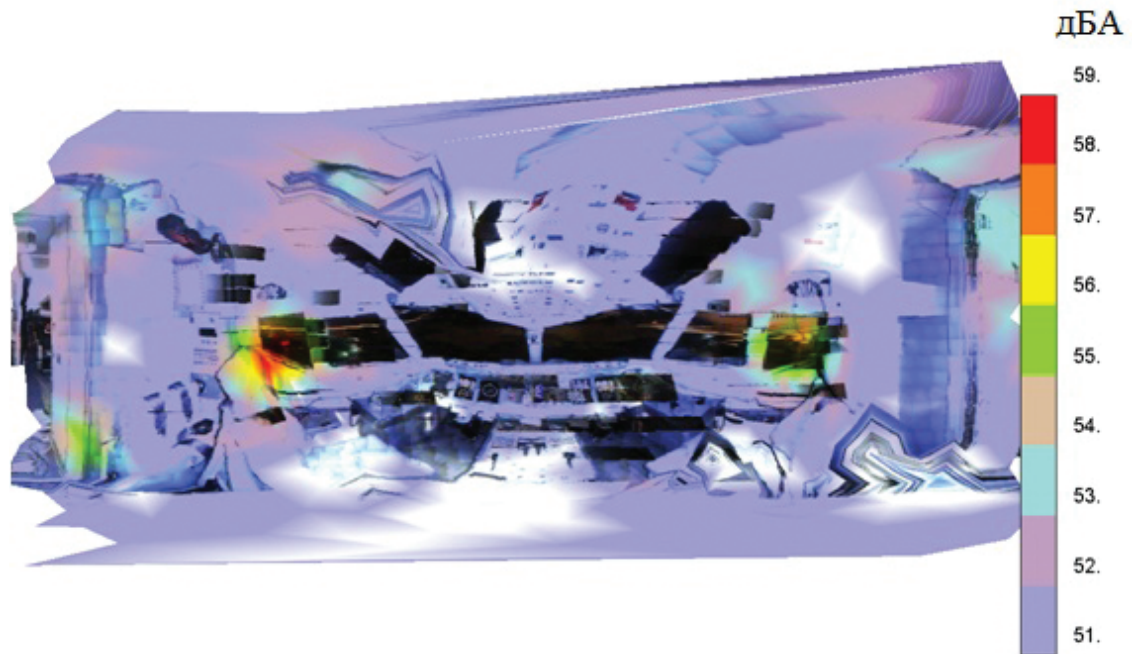


б)

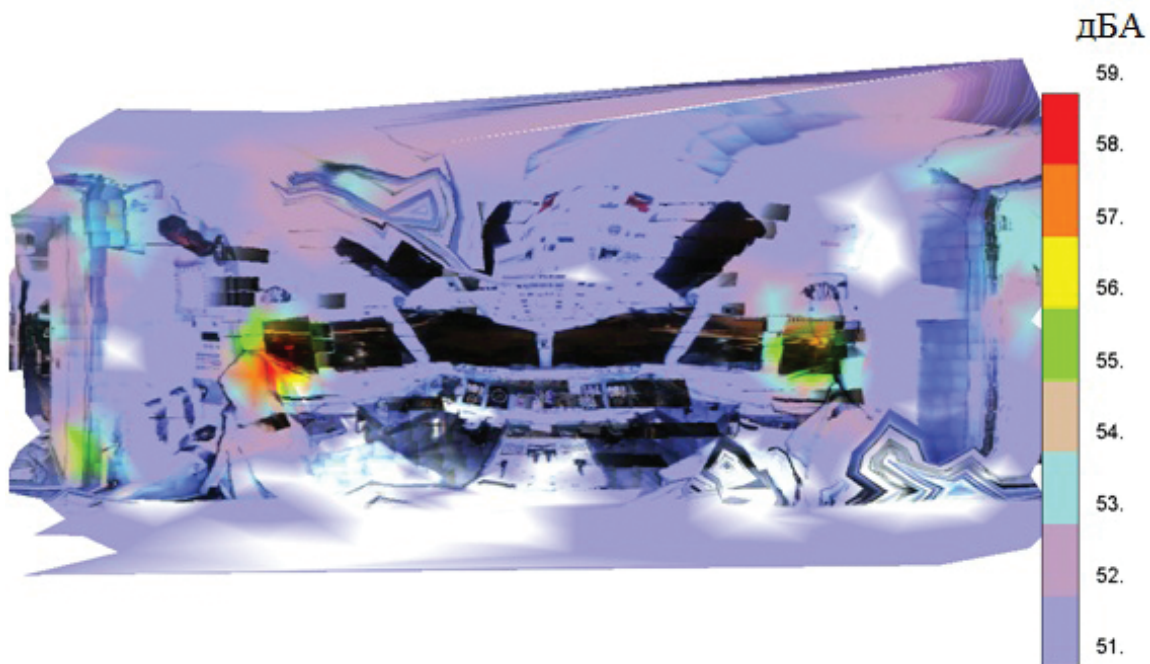
Рис. 9. Карта локализации источников шума в кабине экипажа в третьоктавной полосе частот 2500 Гц: а — СКВ выключена; б — СКВ включена

риска развития профессиональной тугоухости // Медицина экстремальных ситуаций. 2018. Т. 20. № 3. С. 340-346.

4. 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
5. Голубев А.Ю., Потокин Г.А. Особенности применения интенсивности для определения мощности акустического излучения панели в поле аэродинамических пульсаций давления // Измерительная техника. 2018. № 12. С. 51-55. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-12-51-55
6. Miah K.H., Nixon E.L. Design and performance evaluation of a broadband three dimensional acoustic



а)



б)

Рис. 10. Карта локализации источников шума в кабине экипажа в третьоктавной полосе частот 3150 Гц: а — СКВ выключена; б — СКВ включена

intensity measuring system // The Journal of the Acoustical Society of America. 2010. Vol. 127. No. 4. pp. 2338-2347. DOI: 10.1121/1.3327508

7. *Comesaña D.F., Korbasiewicz M.* Evaluation of electric vehicle interior noise focused on sound source identification and transfer path analysis // Proceedings of Aachen Acoustics Colloquium. 2015. 8 p.

8. *Nau C., Ag D.* Beamforming within the modal sound field of a vehicle interior // 6th Berlin Beamforming Conference. 2016. BeBeC-2016-S9. 10 p.

9. *Colangeli C., Chiariotti P., Battista G., Castellini P., Janssens K.* Clustering inverse beamforming for interior sound source localization: application to a car cabin mock-up // 6th Berlin Beamforming Conference. 2016. BeBeC-2016-D9. 17 p.

10. Heilmann G., Meyer A., Döbler D. Time-domain beamforming using 3D-microphone arrays // Berlin Beamforming Conference. 2008. BeBeC-2008-20. 10 p.
11. Battista G., Chiariotti P., Castellini P. Spherical harmonics decomposition in inverse acoustic methods involving spherical arrays // Journal of Sound and Vibration. 2018. Vol. 433, pp. 425-460. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.05.001
12. Tiana-Roig E., Torras-Rosell A., Ferrnande-Grande E., Jeong Ch.H., Agerkvist F.T. Enhancing the beamforming map of spherical arrays at low frequencies using acoustic holography // 5th Berlin Beamforming Conference. 2014. BeBeC-2014-03. 14 p.
13. Cariou C., Delverdier O., Paillasseur S., Lamotte L. Tool for interior noise sources detection in aircraft with comparison of configurations // 4th Berlin Beamforming Conference. 2012. BeBeC-2012-13. 8 p.
14. Берсенев Ю.В., Вискова Т.А., Беляев И.В., Пальчиковский В.В., Кустов О.Ю., Ершов В.В., Бурдаков Р.В. Применение метода плоского бимформинга к идентификации вращающихся звуковых мод // Вестник ПНИПУ. Механика. 2016. № 1. С. 26–38. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.02
15. Бычков О.П., Демьянов М.А., Фараносов Г.А. Локализация дипольных источников шума плоскими микрофонными решетками // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 5. С. 675–687. DOI: 10.1134/S032079191905006X
16. Zaytsev M.Yu, Kopiev V.F., Velichko S.A., Belyaev I.V. Fly-over noise source localization during acoustic flight tests of advanced passenger aircraft // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (20-23 May 2019, Delft, The Netherlands). AIAA Paper No. 2019-2426. DOI: 10.2514/6.2019-2426
17. Merino-Martínez R., Sijtsma P., Snellen M. et al. A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays // CEAS Aeronautical Journal. 2019. Vol. 10. No. 1, pp. 197–230. DOI:10.1007/s13272-019-00383-4
18. Technical datasheet. Standard Beamforming and Near-field focusing processing. Simcenter Testlab Version 2019.1. 20 p.
19. 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.
20. 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
21. Samokhin V., Moshkov P., Yakovlev A. Analytical model of engine fan noise // Akustika. 2019. Vol. 32. pp. 168–173.
22. Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф., Халецкий Ю.Д. Влияние технического прогресса на уровни шума силовых установок реактивных самолетов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2019. № 4. С. 3-18.
23. 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
24. 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 (22-26 June 2015, Dallas, TX). AIAA Paper No. 2015-3114. DOI: 10.2514/6.2015-3114
25. 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 1. COCKPIT

Moshkov P.A.^{1*}, Vasilenkov D.A.^{2**}, Rubanovskii V.V.^{1***}, Stroganov A.I.^{2****}

¹ "Sukhoi Civil Aircraft",

26, Leninskaya Sloboda str., Moscow, 115280, Russia

² "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

Acoustic comfort ensuring for passengers and cockpit personnel is one of the most important tasks while civil aircraft design. Particularly, at present there is a problem of the Russian civil aviation flight crewmembers diminished hearing. The risk factor for this disease developing is the noise in the cockpit.

The problem solution of ensuring acoustic comfort in the aircraft cabin is impossible without performing a complex of engineering and fundamental studies at all stages of creating a new sample of aeronautical engineering. One of the research trends is identification, localization and ranking the main noise sources in the aircraft-prototype cabin. The results of this study are necessary for ensuring optimal placement of sound insulation, sound absorbing and vibration damping materials in the onboard structure and issuing recommendations for noise reduction of the air conditioning system (ACS).

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

Acoustic measurements were performed on the RRJ-95 experimental aircraft No. 95005 with a cockpit modified from the viewpoint of noise reduction and reverberation interference. The tests were carried out at a cruising flight mode at the altitude of 11 km with a flight speed determined by the Mach number of 0.8. The signal recording time was no less than 60 seconds. The measurements were performed while normal ACS operation, and when it was switched off.

As the result of the study, noise sources localization charts in the one-third octave frequency bands of 630-3150 Hz were obtained. The main noise sources in the cockpit are the ACS and the turbulent boundary layer noise. As far as the air-feeding ceases

with the ACS turning-off, but the system fans do not, the ACS effect manifests itself with its turning-off from the side of the air supplying pipelines to the cockpit as well. Two basic mechanisms in the ACS noise can be outlined. They are turbulent flow noise in the air ducts, and the noise caused by the "rotor-with-stator" interaction in the fans. In the one-third octave frequency bands of 1000 Hz, in particular, the noise of turbulent flow dominates the noise caused by the "rotor-with-stator" interaction in the ACS fans, while the noise of the "rotor-with-stator" interaction is dominating in the one-third octave frequency bands of 2500 Hz.

Keywords: civil aircraft, acoustic tests, microphone array, spherical beamforming, cabin noise, noise sources localization chart

References

1. Kop'ev V.F. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tehnicheskii zhurnal*, 2018, no. 11, pp. 60-69.
2. Vil'k M.F., Glukhovskii V.D., Kur'erov N.N., Pankova V.B., Prokopenko L.V. *Medsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2017, no. 3, pp. 27-32.
3. Vil'k M.F., Pankova V.B., Glukhovskii V.D., Kaptsov V.A. *Medsina ekstremal'nykh situatsii*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 340-346.
4. 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
5. Golubev A.Yu., Potokin G.A. Features of the Use of Intensity to Determine the Power of Acoustic Radiation of a Panel in the Field of Aerodynamic Pressure Pulsations, *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, no. 12. pp. 1228-1233. DOI: 10.1007/s11018-019-01574-5
6. Miah K.H., Hixon E.L. Design and performance evaluation of a broadband three dimensional acoustic intensity measuring system, *The Journal of the Acoustical*

- Society of America*, 2010, vol. 127, no. 4, pp. 2338-2347. DOI: 10.1121/1.3327508
7. Comesaña D.F., Korbasiewicz M. Evaluation of electric vehicle interior noise focused on sound source identification and transfer path analysis. *Proceedings of Aachen Acoustics Colloquium*, 2015, 8 p.
 8. Nau C., Ag D. Beamforming within the modal sound field of a vehicle interior, *6th Berlin Beamforming Conference*, 2016. BeBeC-2016-S9, 10 p.
 9. Colangeli C., Chiariotti P., Battista G., Castellini P., Janssens K. Clustering inverse beamforming for interior sound source localization: application to a car cabin mock-up, *6th Berlin Beamforming Conference*, 2016. BeBeC-2016-D9, 17 p.
 10. Heilmann G., Meyer A., Döbler D. Time-domain beamforming using 3D-microphone arrays, *Berlin Beamforming Conference*, 2008. BeBeC-2008-20, 10 p.
 11. Battista G., Chiariotti P., Castellini P. Spherical harmonics decomposition in inverse acoustic methods involving spherical arrays, *Journal of Sound and Vibration*, 2018, vol. 433, pp. 425-460. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.05.001
 12. Tiana-Roig E., Torras-Rosell A., Fernande-Grande E., Jeong Ch.H., Agerkvist F.T. Enhancing the beamforming map of spherical arrays at low frequencies using acoustic holography, *5th Berlin Beamforming Conference*, 2014. BeBeC-2014-03, 14 p.
 13. Cariou C., Delverdier O., Paillasseur S., Lamotte L. Tool for interior noise sources detection in aircraft with comparison of configurations, *4th Berlin Beamforming Conference*, 2012, no. BeBeC-2012-13, 8 p.
 14. Bersenev Yu.V., Viskova T.A., Belyaev I.V., Pal'chikovskii V.V., Kustov O.Yu., Ershov V.V., Burdakov R.V. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2016, no. 1. pp. 26-38. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.02
 15. Bychkov O.P., Demyanov M.A., Faranosov G.A. Localization of Dipole Noise Sources Using Planar Microphone Arrays, *Acoustical Physics*, 2019, vol. 65, no. 5, pp. 567-577. DOI: 10.1134/S1063771019050063
 16. Zaytsev M.Yu., Kopiev V.F., Velichko S.A., Belyaev I.V. Fly-over noise source localization during acoustic flight tests of advanced passenger aircraft, *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2019. AIAA Paper no. 2019-2426. DOI: 10.2514/6.2019-2426
 17. Merino-Martínez R., Sijtsma P., Snellen M. et al. A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays, *CEAS Aeronautical Journal*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 197-230. DOI:10.1007/s13272-019-00383-4
 18. *Technical datasheet. Standard Beamforming and Near-field focusing processing*. Simcenter Testlab Version 2019.1, 20 p.
 19. Lavrov V.N., Moshkov P.A., Popov V.P., Rubanovskiy V.V. *Materialy Shestoi Otkrytoi Vserossiiskoi (XVIII nauchno-tehnicheskaya) konferentsii po aeroakustike (22-27 September 2019, Zvenigorod)*, Moscow, TsAGI, 2019, pp. 241-242.
 20. 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
 21. Samokhin V., Moshkov P., Yakovlev A. Analytical model of engine fan noise, *Akustika*, 2019, vol. 32, pp. 168-173.
 22. Dmitriev V.G., Samokhin V.F., Khaletskii Yu.D. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tehnicheskii zhurnal*, 2019, no. 4, pp. 3-18.
 23. 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
 24. 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*, 2015, AIAA Paper 2015-3114. DOI: 10.2514/6.2015-3114
 25. 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