

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРАЖДАНСКИХ САМОЛЕТОВ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ПО ШУМУ В САЛОНЕ

Мошков П.А.

*«Гражданские самолеты Сухого»,
ул. Ленинская Слобода, 26, с. 5, Москва, 115280, Россия
e-mail: p_moshkov@scac.ru*

Статья поступила в редакцию 04.10.2019

Рассмотрена проблема шума в салоне современных гражданских самолетов. На базе акустических испытаний SSJ-100 показано, что основными источниками шума в салоне самолета с классической компоновкой силовой установки (два турбовентиляторных двигателя на пилонах под крылом) на режиме крейсерского полета являются система кондиционирования и вентиляции воздуха и поля пульсаций давления в турбулентном пограничном слое на поверхности фюзеляжа. Рассмотрена проблема проектирования таких самолетов с учетом требований по шуму в салоне. Представлены структура проблемы и основные направления инженерных и фундаментальных исследований, необходимых для проектирования самолета по заданным параметрам акустического комфорта. Рассмотрены основные методы снижения шума в салоне.

Ключевые слова: проектирование самолетов, шум в салоне, методы снижения шума, акустические испытания, гражданские самолеты, звукоизоляция, акустический комфорт.

Введение

Шум в салоне оказывает утомляющее и раздражающее воздействие на пассажиров и членов экипажа, а также вызывает помехи речевой связи. Международных стандартов, ограничивающих уровни шума в кабинах экипажей и пассажирских салонах воздушных судов, нет, однако существует методика определения уровней шума в салонах самолетов [1]. В Российской Федерации уровни шума внутри летательных аппаратов нормируются в соответствии с ГОСТ 20296-2014 [2]. Решение проблемы проектирования самолета по заданным с учетом требований рынка параметрам акустического комфорта является сложной научно-технической задачей, требующей выполнения комплекса фундаментальных и прикладных исследований [3, 4].

В настоящей работе на основе анализа шума в кабине экипажа самолета SSJ-100, а также данных о шуме в салоне с VIP-интерьером определены основные источники шума в салоне современного пассажирского самолета и сформулированы важнейшие этапы работ, необходимых для проектирования самолетов по заданным параметрам акустического комфорта.

Нормирование шума

в салонах пассажирских самолетов

Шум в салонах и кабинах экипажей самолетов нормируется на крейсерском прямолинейном режиме полета предельными спектрами (ПС) уровней звукового давления в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами в диапазоне 31,5—8000 Гц и суммарными уровнями звука в дБА [2]. Метрика дБА отражает восприятие шума человеком и используется в ГОСТах, санитарных нормах и при оценке слышимости летательных аппаратов [5, 6].

Уровни шума в салоне экономического класса и на рабочем месте бортпроводников для дальних, средних и ближних магистральных самолетов не должны превышать требований ПС-80, а для кабины экипажа — ПС-75. При контрольных измерениях допускается измерение суммарного взвешенного по шкале А стандартного шумомера уровня звукового давления. При этом уровни звука не должны превышать 85 дБА для ПС-80 и 80 дБА — для ПС-75. Превышение уровней звука допускается не более чем на 3 дБА для 10 % контрольных точек. Отметим, что требование ГОСТ 20296-2014 к уровням звукового давления в кабинах экипажей

эквивалентно требованию санитарных норм [7] к предельно допустимым уровням звука на рабочих местах членов экипажа.

При проектировании современных гражданских самолетов необходимо ориентироваться на более низкие уровни шума и в качестве требований к самолету задавать непревышение предельного спектра ПС-75 для пассажирского салона и ПС-70 — для кабины экипажа. С учетом конкуренции на рынке административных самолетов уровни шума в салонах таких самолетов должны быть на 3—5 дБА ниже, чем в самолетах с серийной компоновкой салона. Среди особых требований по шуму в салоне выделим требования к зонам отдыха членов экипажей на маршрутах большой протяженности, которые не рассматриваются в рамках ГОСТ 20296-2014. Для обеспечения комфортных условий необходимо проектировать комнату отдыха с учетом требований ПС-60, т.е. непревышения суммарного уровня шума в 65 дБА на режиме крейсерского полета.

Отдельное место в проблеме шума в кабине экипажа занимает вопрос обеспечения разборчивости речи при записи звуковой информации на бортовой регистратор. Уровень звукового давления «громкой» и «очень громкой» речи на расстоянии 1 м от рта говорящего соответствует диапазону 72—78 дБА [8]. При этом при использовании авиагарнитуры летчики во время разговора снижают голосовое усилие в среднем на 3 дБА. В таком случае уровень фонового шума в кабине экипажа может превышать уровень звукового давления речи, что приводит к отрицательному соотношению «сигнал-шум». При соотношении «сигнал-шум» от -4 до -6 дБА невозможно обеспечить разборчивость более 50% предложений, и поэтому допускается многократное прослушивание записей, а также применение таких специальных средств, как фильтры или предусилители.

Методы оценки разборчивости речи можно разделить на субъективные и объективные [8]. В авиации применяется объективный параметр разборчивости речи — индекс передачи речи (STI — speech transmission index). Если $STI > 0,75$, то можно говорить об «отличной разборчивости речи» при записи звуковой информации на бортовой регистратор. Если $STI < 0,3$, то следует ожидать «плохой разборчивости речи». Для расчетной оценки данного параметра, помимо измерений фонового шума, необходимо определение времени реверберации в кабине экипажа.

Еще одним важным параметром, используемым при оценке шума в салоне, является уровень помех речи (SIL3 — speech interference level), оп-

ределяемый как среднее арифметическое уровней звукового давления в трех октавных полосах частот 1000, 2000 и 4000 Гц.

Также отметим, что данные о шуме в кабине экипажа используются при расследовании авиационных происшествий [9], и поэтому важно иметь звуковые сигналы, записанные на различных этапах полета самолета типовой конструкции при штатной работе всех систем.

Структура проблемы шума в салоне пассажирского самолета по результатам испытаний самолета SSJ-100

Шум в салоне самолета представляет собой суперпозицию звуковых полей различных источников, среди которых выделим:

- турбулентный пограничный слой на поверхности фюзеляжа [10—13];
- систему кондиционирования и вентиляции воздуха (СКВ) [14, 15];
- вибрационное воздействие двигателей (структурный шум) [16];
- акустическое воздействие силовой установки на фюзеляж (шум вентилятора и реактивной струи) [17];
- авионику самолета, различные системы и оборудование.

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

На рис. 1 представлено изменение суммарных взвешенных по шкале А стандартного шумомера уровней звукового давления вдоль левого борта самолета SSJ-100 с VIP-интерьером при штатной работе системы кондиционирования и вентиляции воздуха. Измерения выполнены на крейсерском режиме полета (число Маха полета 0,8, высота 11 км). Данная зависимость согласуется с расчетной зависимостью при оценке шума турбулентного пограничного слоя в салоне самолета MC-21 [10], а также с открытыми данными о шуме в салонах самолетов Ту-204 [14], B737 и B787. Наблюдается некоторое увеличение суммарного уровня звукового давления в хвостовой части салона, это может быть связано с увеличением интенсивности пульсаций давления в турбулентном пограничном слое на поверхности фюзеляжа при смещении контрольной точки измерения шума от носа к хвосту, что согласуется с расчетными исследованиями [10, 18], а также с возможным воздействием

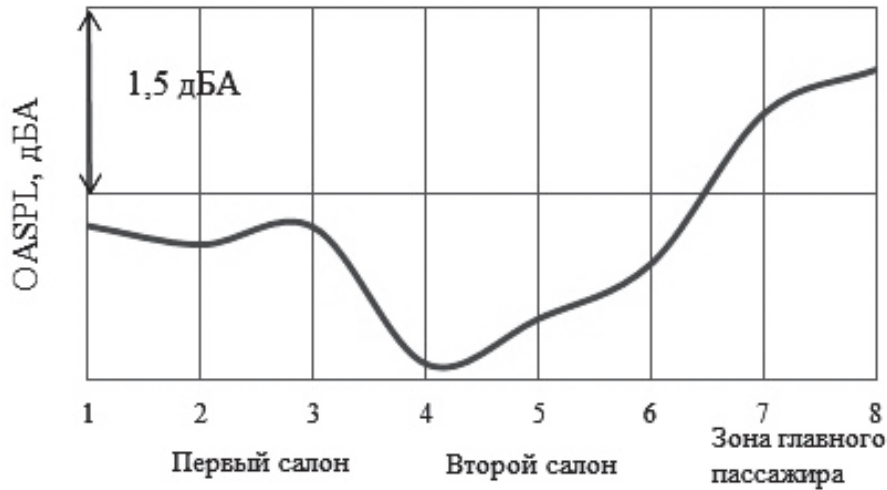


Рис. 1. Изменение по длине салона (по левому борту самолета с VIP-интерьером) суммарных взвешенных по шкале А стандартного шумомера уровней звукового давления (число Маха полета 0,8, высота 11 км)

реактивной струи двигателя и увеличением вклада СКВ за счет вклада шума выпускных клапанов.

Для определения вклада реактивной струи двигателя в звуковое поле в хвостовой части салона были выполнены измерения шума при дросселировании двигателей самолета с крейсерского до режима малого газа при снижении с постоянной скоростью с небольшим углом тангажа; результаты измерений сравнивались с крейсерским полетом на эшелоне (рис. 2). Измерения выполнялись при штатной работе системы кондиционирования и вентиляции воздуха. Спектр шума в хвостовой части салона включает в себя тональную и широкополосную составляющие. Максимум широкополосного шума расположен в области средних частот 315 Гц. Можно видеть, что дросселирование двигателей приводит к снижению спектральных

уровней звукового давления на частотах свыше 1600 Гц на величину до 7 дБ, что связано с уменьшением интенсивности акустического излучения реактивной струи. Поэтому будем считать, что уровни шума в хвостовой части салона самолета на частотах свыше 1600 Гц определяются шумом реактивной струи. Также наблюдается смещение тональной составляющей с частоты 100 Гц на частоту 50 Гц, что связано с уменьшением частоты вращения вала вентилятора двигателя в два раза при переходе с крейсерского на режим малого газа. При этом спектральный уровень структурного шума от вибраций вала вентилятора двигателя увеличивается на 10 дБ. В целом, если оценивать вклад реактивной струи в суммарную интенсивность звука, рассчитываемую через суммарные уровни звукового давления в дБА, то для крейсер-



Рис. 2. Влияние дросселирования двигателя на 1/3-октавные спектры уровней звукового давления в хвостовой части салона самолета SSJ-100 с VIP-интерьером

ского режима полета он не превышает 1,5 %, а вклад структурного шума от вибраций вала вентилятора двигателя не выше 4 %. Уровни широкополосного шума до частоты 1600 Гц определяются шумом турбулентного пограничного слоя и шумом системы кондиционирования воздуха. Для разделения вклада этих источников необходимо выполнять измерения на экспериментальном самолете, имея возможность отключения СКВ.

Как было отмечено ранее, проблема шума в кабине экипажа самолетов занимает отдельное место. Учитывая сложную форму, различные импедансные характеристики ограждающих поверхностей (стен, пола и лобового остекления), следует ожидать сложную зависимость затухания звука [24] при определении времени реверберации и неоднородность звукового поля по пространству в кабине экипажа.

На рис. 3 представлено сравнение третьоктавных спектров уровней звукового давления, измеренных в одной из контрольных точек на режиме крейсерского полета при штатной работе СКВ, а также при отключении СКВ (число Маха полета 0,8, высота 11 км). Дополнительно в наземных испытаниях были выполнены измерения шума при подключении самолета к внешнему источнику питания и определен спектр уровней звукового давления при работе авионики самолета. Испытания были выполнены на экспериментальном самолете с доработанной, с целью снижения шума и реверберационных помех, кабиной экипажа [20, 21].

Можно видеть, что спектр уровней звукового давления в кабине экипажа включает в себя то-

нальную и широкополосную составляющие. Тональная составляющая в третьоктавной полосе 100 Гц соответствует структурному шуму на роторной частоте вала вентилятора двигателя. Тональный шум вентилятора двигателя не выделяется на фоне шума турбулентного пограничного слоя, а интенсивность широкополосного шума вентилятора, как правило, ниже интенсивности тональной составляющей, поэтому можно заключить, что акустическое излучение силовой установки самолета на режиме крейсерского полета не влияет на уровни шума в кабине экипажа. Отключение СКВ приводит к уменьшению спектральных уровней звукового давления в диапазоне третьоктавных полос частот 160—2500 Гц на величину до 8 дБ. Уровни шума на частотах свыше 3150 Гц не зависят от работы СКВ и, следовательно, обусловлены шумом турбулентного пограничного слоя.

Уровни звукового давления при работе авионики самолета в наземных испытаниях существенно ниже уровней шума на крейсерском режиме полета во всем рассматриваемом диапазоне частот, и данный источник фактически не влияет на звуковое поле в кабине экипажа. Отметим также, что несмотря на высокий уровень звукового давления тонального структурного шума, его вклад при оценке суммарного взвешенного по шкале А стандартного шумомера будет незначительным за счет искусственного занижения уровня звукового давления на 19,1 дБ в третьоктавной полосе 100 Гц.

Таким образом, на основании выполненного анализа шума в салоне и кабине экипажа самолета

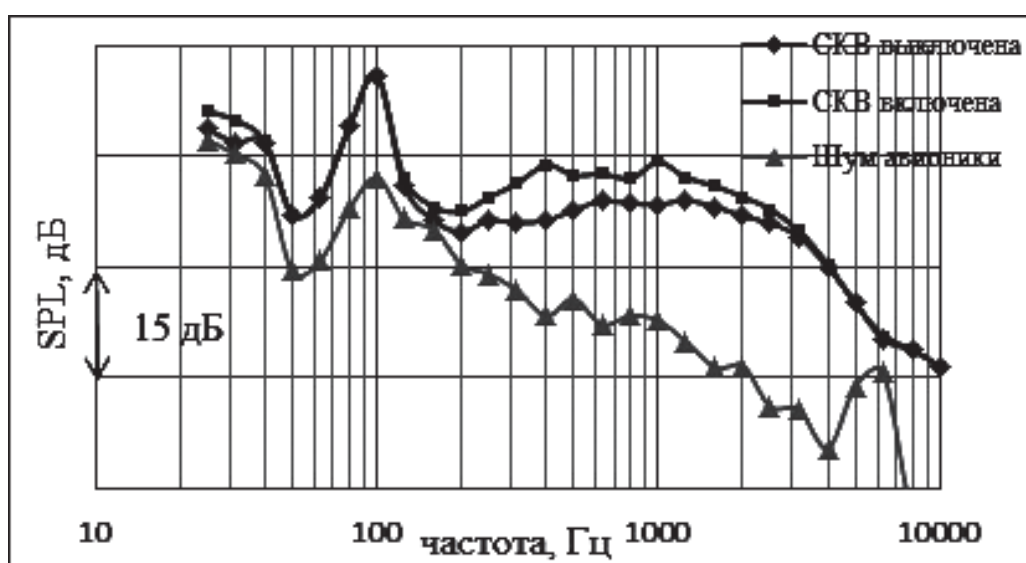


Рис. 3. 1/3-октавные спектры уровней звукового давления, измеренные в кабине экипажа SJS-100 на режиме крейсерского полета при работе СКВ, при отключенной СКВ, а также при работе только авионики самолета при наземных испытаниях [20, 21]

та SSJ-100 можно сделать следующие основные выводы.

1. Определение относительного вклада различных источников в суммарный взвешенный по шкале А стандартного шумомера уровень звукового давления по длине салона необходимо для правильного выбора методов и средств его снижения. Основными источниками шума в салоне и кабине экипажа самолета с компоновкой турбовентиляторных двигателей на пилонах под крылом являются система кондиционирования и вентиляции воздуха и поля пульсаций давления в пограничном слое на поверхности фюзеляжа.

2. Шум от вибрационного воздействия двигателей не представляется существенным при оценке суммарного уровня шума в дБА. Тем не менее, для снижения интенсивности излучения данного источника необходимо разработать требования к балансировке валов, более жесткие, чем в требованиях ГОСТ 26382-84 [22], а также обеспечить вибродемпфирование в системе «двигатель-крепление-планер» [23].

3. Акустическое излучение силовой установки (шум вентилятора и реактивной струи) не влияет на суммарные взвешенные по шкале А стандартного шумомера уровни звукового давления в салоне и кабине экипажа на крейсерском режиме полета. Шум авионики самолета также не является существенным источником, но в целом можно сказать, что размещение агрегатов систем оборудования самолета необходимо проводить с учетом их акустических характеристик. Уровень шума, создаваемого ими в салоне, должен быть на 10–15 дБА ниже расчетного уровня звукового давления в салоне проектируемого самолета, определяемого в контрольной точке салона как энергетическая сумма уровней шума СКВ и шума турбулентного пограничного слоя.

Представленные результаты и выводы, полученные автором при исследовании шума в салоне и кабине экипажа самолета SSJ-100, не противоречат исследованиям других авторов [24, 25].

Рассмотрим подробно основные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), которые необходимо выполнять на различных этапах проектирования самолета по заданным параметрам акустического комфорта для ранее определенных основных источников шума.

Шум турбулентного пограничного слоя

Структура проблемы шума турбулентного пограничного слоя при проектировании гражданского самолета представлена на рис. 4. Условно исследования в рамках данной тематики можно разде-



Рис. 4. Структура проблемы шума турбулентного пограничного слоя при проектировании гражданского самолета

лить на расчетные и экспериментальные. Конечной целью работ является оптимальное размещение акустических материалов (теплозвукоизолирующих, звукопоглощающих и вибродемпфирующих) в бортовой конструкции самолета на базе расчетных и экспериментальных исследований.

При отключении СКВ в салоне самолета-прототипа на режиме крейсерского полета с использованием сферических микрофонных решеток (рис. 5), 3D-сканера и алгоритмов сферического бимформинга [26, 27] можно выполнить анализ звукового поля в салоне самолета от пульсаций давления в турбулентном пограничном слое. Эти данные могут быть использованы для валидации численного метода оценки шума турбулентного пограничного слоя.

Первым этапом экспериментальных работ в рамках предлагаемой структуры является определение структуры полей пульсаций давления на поверхности фюзеляжа как на модели при ее «про-

счет изменения расстояний между шпангоутами и стрингерами.

Традиционная конструкция фюзеляжа гражданских самолетов — двустенная (рис. 6). Пространство между обшивкой фюзеляжа и панелью интерьера заполняется слоями теплозвукоизоляционных рыхло-волоконистых материалов различной плотности и толщины. Причем, как было показано ранее, уровни шума по длине салона самолета могут существенно различаться и конструкция теплозвукоизоляции должна обеспечивать минимальную интенсивность проходящего звука. С этой целью теплозвукоизоляция должна выполняться дифференцированной по отсекам, как показано на



Рис. 5. Применение сферической микрофонной решетки для исследования структуры звукового поля в салоне самолета с помощью методов сферического бимформинга [31]

дудке» в аэродинамической трубе, так и на поверхности фюзеляжа самолета-прототипа на базе летного эксперимента. Эти данные необходимы для валидации численного метода оценки полей пульсаций давления на поверхности самолета и расчета отклика конструкции при динамическом нагружении [28, 29]. В итоге, с помощью валидированного метода оценки шума в салоне от пульсаций давления в пограничном слое можно выполнить параметрическое исследование конструкции фюзеляжа с целью поиска оптимального шага стрингеров и шпангоутов. Известно [30], что шум в салоне пассажирского самолета от турбулентного пограничного слоя может быть снижен на величину до 4 дБ без дополнительных весовых затрат только за



Рис. 6. Традиционная двустенная конструкция фюзеляжа самолета

рис. 7. Для увеличения звукоизоляции конструкции на панели или отдельно на шпангоуты и стрингеры могут наклеиваться вибродемпфирующие материалы.



Рис. 7. Пример выполнения дифференцированной по отсекам теплозвукоизоляции

Немаловажную роль в проблеме шума в салоне играет выбор панелей интерьера. Они должны обладать высокой звукопоглощающей способностью в широкой полосе частот и иметь минимально возможное число точек крепления с фюзеляжем во избежание дополнительного увеличения шума за счет наличия структурной связи между обшивкой и панелью интерьера.

При проектировании самолета с учетом требований акустического комфорта необходимо выполнение комплекса исследований акустических материалов, виброакустических характеристик типовых фюзеляжных панелей, лобового остекления, панелей пола и интерьера. Эксперименты [32–35] проводятся на специализированных уникальных установках, таких как АК-11 (ЦАГИ). В натурном

эксперименте на самолете-прототипе можно выполнять параметрические экспериментальные исследования с целью поиска наиболее удачных конструктивных решений с точки зрения борьбы с шумом в салоне.

В последнее время ведутся работы над созданием гибридных активно-пассивных систем шумоподавления, которые могут быть эффективными в широкой полосе частот и могут рассматриваться, в первую очередь, для обеспечения низких уровней шума в кабине экипажа.

Принципиальная схема управления шумом турбулентного пограничного слоя в кабине экипажа с использованием «умной пены» представлена на рис. 8. Общая концепция [36, 37] применения «умной пены» для снижения шума в салоне мало отличается от концепции использования чисто активного метода. Ее суть состоит в размещении вторичных источников шума между обшивкой и панелью интерьера. Эти источники генерируют «антишум» с характеристиками, позволяющими минимизировать уровни звукового давления в «тихой зоне» салона.

Отличие «умной пены» от традиционных активных систем заключается в ее конструкции, активным элементом которой является тонкая пленка из пьезоэлектрического материала, расположенная внутри ячейки из пористого звукопоглощающего материала в виде полуцилиндра (рис. 9,а).

В зависимости от полярности приложенного напряжения пленка расширяется или сжимается, что при фиксированных границах приводит к ее колебаниям, как это показано на рис. 9,б. Таким образом, пленка работает аналогично мембране электродинамического излучателя, не занимая при

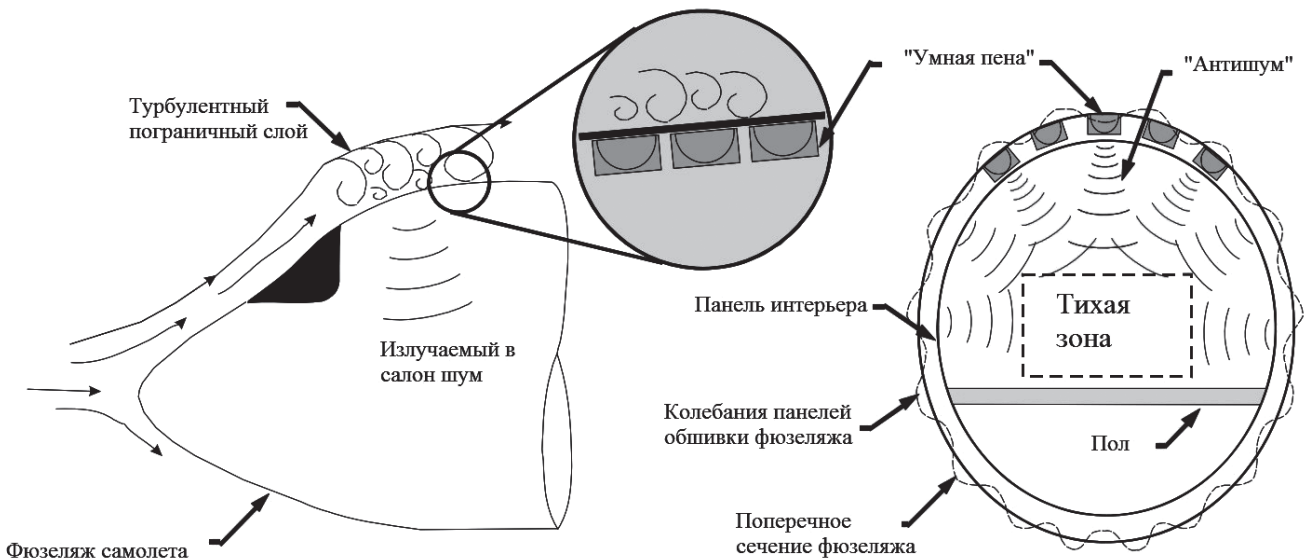


Рис. 8. Схема активного управления шумом турбулентного пограничного слоя с использованием «умной пены»

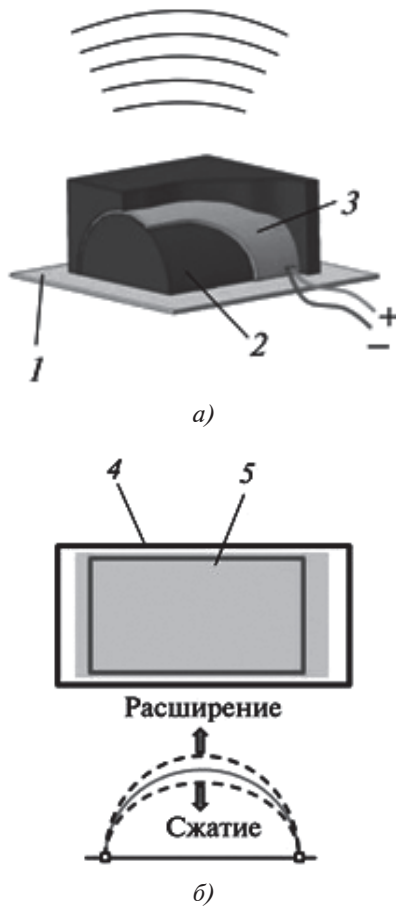


Рис. 9. Конструкция «умной пены»: *а* – ячейка «умной пены», установленная на конструкцию; *б* – преобразование деформации пленки в полезное движение; 1 – излучающая конструкция; 2 – звукопоглощающая пена; 3 – пьезоэлектрическая пленка; 4, 5 – деформация пленки при положительной и отрицательной полярности [36]

этом никакого дополнительного объема и практически не имея веса. В случае готовности данной технологии и наличия на рынке готовых решений такой подход может быть применен для обеспечения пониженных уровней шума в кабинах экипажей проектируемых самолетов.

Шум системы кондиционирования и вентиляции воздуха

Другим основным источником шума в салоне современного гражданского самолета является система кондиционирования и вентиляции воздуха. Для самолета Ту-204 с VIP-компоновкой данный источник был определен в работе [14] как доминирующий. Основными источниками шума СКВ [38, 39] являются нагнетающие, вытяжные вентиляторы и вентиляторы системы рециркуляции воздуха, агрегаты установки охлаждения воздуха, воздухорегулирующие устройства (клапаны и заслонки), элементы воздухопроводов (повороты, раз-

ветвления, отводы), воздухораспределительные устройства (решетки, насадки, жалюзи), а также выпускные клапаны системы регулирования давления.

Структура проблемы шума СКВ рассмотрена на рис. 10. Как правило, разработчик самолета не проектирует систему кондиционирования воздуха. Его задача – компоновка агрегатов системы и разработка технического задания на систему, где не последнее внимание уделяется акустическим характеристикам агрегатов и системы в целом. Поэтому в рамках схемы (рис. 10) все НИОКР в рамках акустики СКВ подразделяются на работы, выполняемые поставщиком системы, и работы, выполняемые разработчиком самолета. В обоих случаях их можно условно разделить на экспериментальные и расчетные.

Разработчик самолета должен выполнить комплекс экспериментальных исследований на самолете-прототипе с целью определения вклада СКВ и отдельных составляющих (система рециркуляции, выпускной клапан и т.д.) по результатам наземных и летных испытаний. Данные этих испытаний необходимы для формирования требований к потенциальным поставщикам СКВ для нового проектируемого самолета. В рамках расчетных исследований первым этапом всегда является инженерная оценка шума в салоне с помощью известных методик [15, 17].

Современные аппаратно-программные средства для аэроакустических исследований позволяют в наземных испытаниях с помощью миниатюрных источников звука моделировать звуковое поле в салоне самолета с его визуализацией при помощи ранее упомянутых алгоритмов сферического бимформинга. Результаты моделирования шума в салоне могут быть использованы для валидации численного метода оценки шума в салоне при работе СКВ.

Поставщик СКВ должен проектировать все агрегаты с учетом требований по шуму, моделируя «ротор-статор»-взаимодействие, генерацию звука и его распространение по воздуховодам. Совершенствование агрегата с точки зрения виброакустики может быть достигнуто за счет оптимизации проточной части вентиляторов [40], по критерию минимальной мощности акустического излучения. При невозможности обеспечения требований по шуму СКВ устанавливаются глушители [41] снаружи корпусов вентиляторов и в воздуховодах. Для этого необходимо выполнение проекторочных расчетов и экспериментальных стендовых испытаний глушителей.

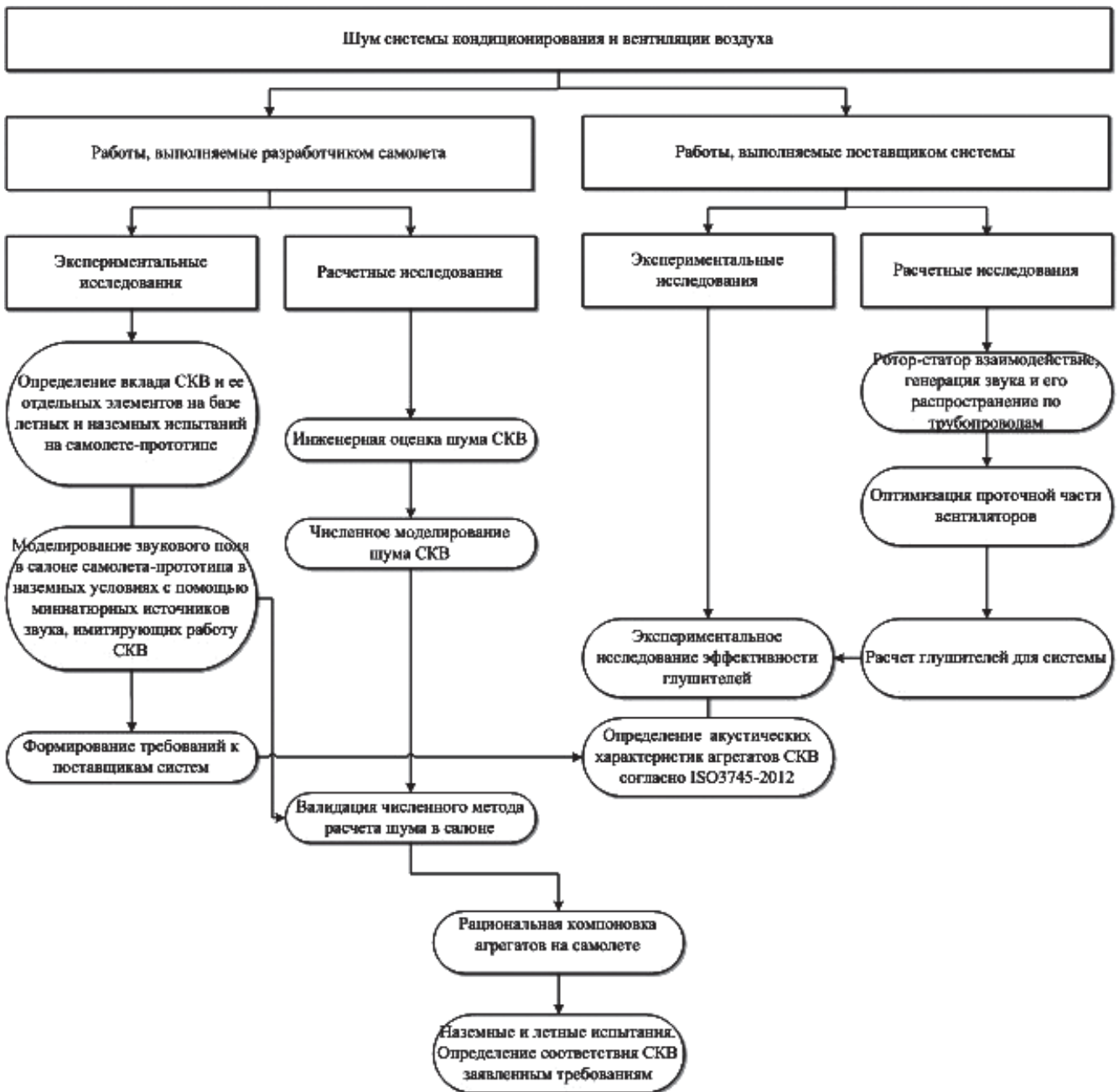


Рис. 10. Структура проблемы шума системы кондиционирования и вентиляции воздуха при проектировании гражданского самолета

Поставщик СКВ предоставляет информацию о шуме системы на основании испытаний агрегатов, выполняемых по методике ISO 3745:2012 [42]. В соответствии с этой информацией разработчик самолета обеспечивает рациональную компоновку агрегатов СКВ на самолете. При установке агрегатов СКВ необходимо обеспечивать их вибродемпфирование с целью снижения интенсивности звука, проникающего в салон по косвенному пути передачи энергии, т.е. через узлы креплений. При выполнении представленных мероприятий уровни шума при работе СКВ будут минимальными.

Выводы

Рассмотрена проблема шума в салоне гражданских самолетов. На базе летных испытаний самолета SSJ-100 показано, что доминирующими источниками шума в салоне являются турбулентный пограничный слой и система кондиционирования и вентиляции воздуха. Для этих двух основных источников сформулированы основные направления НИОКР, необходимые для проектирования самолета по заданным параметрам акустического комфорта. Рассмотрены основные методы снижения шума в салоне.

Представленные в работе результаты относятся к самолетам с компоновкой турбовентиляторных двигателей на пилонах под крылом. Для перспективных летательных аппаратов (в частности интегральной компоновки [43, 44], сверхзвуковых деловых самолетов [45]), или при применении на самолете турбовинтовентиляторных двигателей («открытых роторов») [46] причиной шума в салоне могут быть другие источники, что существенным образом повлияет на перечень НИОКР в рамках тематики внутренней акустики при реализации таких проектов.

Библиографический список

1. ISO 5129:200. Acoustics. Measurement of sound pressure levels in the interior of aircraft during flight. 2001. — 10 p.
2. ГОСТ 20296-2014. Межгосударственный стандарт. Самолеты и вертолеты гражданской авиации. Допустимые уровни шума в салонах и кабинах экипажа и методы измерения шума. — М.: Стандартинформ, 2014. — 12 с.
3. Кузнецов В.М. Проблемы снижения шума пассажирских самолетов (обзор) // Акустический журнал. 2003. Т. 49. № 3. С. 293-317.
4. Копьев В.Ф. Традиции и перспективы акустических исследований в ЦАГИ // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 11. С. 60-69.
5. Мошков П.А., Самохин В.Ф., Яковлев А.А. Выбор критерия слышимости беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 2. С. 3-9.
6. Moshkov P., Ostrikov N., Samokhin V., Valiev A. Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (Aeroacoustics 2019) 2019. AIAA Paper No. 2019-2514. DOI: 10.2514/6.2019-2514
7. Санитарные нормы. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки, 1996. URL: <https://base.garant.ru/4174553/#friends>
8. ГОСТ Р ИСО 9921-2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Эргономика. Оценка речевой связи. — М.: Стандартинформ, 2014. — 24 с.
9. Попов Ю.В., Андреев Е.В. Акустическая диагностика обстановки в кабине экипажа воздушного судна / Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 10. С. 25-29.
10. Голубев А.Ю. Пространственно-временная структура неоднородных полей пульсаций давления на поверхности самолета: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Пермь: ПНИПУ, 2016. — 32 с.
11. Голубев А.Ю. Экспериментальная оценка волновых спектров пристенных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя в субконвективной области // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 4. С. 434-442.
12. Голубев А.Ю., Кузнецов С.В. Особенности полей пульсаций давления на поверхности выступов // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2018. № 6. С. 67-75. DOI: 10.31857/S056852810002302-3
13. Голубев А.Ю. Влияние носовой конфигурации обтекаемых моделей на структуру трехмерных полей пульсаций давления // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 5. С. 614-621. DOI:10.7868/S0320791915050081
14. 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.
15. Антонова Н.В., Дубровин Л.Д., Егоров Е.Е. и др. Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха: Учеб. пособие для студентов высших технических учебных заведений / Под ред. Ю.М. Шустрова. — М.: Машиностроение, 2006. — 384 с.
16. 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
17. Мунина А.Г., Ефимцов Б.М., Кудисова Л.Я. и др. Авиационная акустика. В 2-х ч. Ч.2. Шум в салонах пассажирских самолетов / Под ред. А.Г. Мунина. — М.: Машиностроение, 1986. — 264 с.
18. Hu N., Appel C., Haxter S., Callsen S., Klabas A. Simulation of wall pressure fluctuations on Airbus-A320 fuselage in cruise flight condition // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (Aeroacoustics-2019). AIAA Paper No. 2019-2728. DOI: 10.2514/6.2019-2728
19. Канев Н.Г. Реверберация в трапециевидном помещении // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 5. С. 607-612.
20. 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): Тезисы докладов. М.: ЦАГИ, 2019. С. 241-242.
21. 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 (Aeroacoustics-2019). AIAA Paper No. 2019-2726. DOI: 10.2514/6.2019-2726
22. ГОСТ 26382-84. Двигатели газотурбинные гражданской авиации. Допустимые уровни вибрации и общие требования к контролю вибрации. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 14 с.
23. Baklanov V., Denisov S. Multi-connecting system «engine-attachment-airframe» // Journal of Vibroengineering. 2009. Vol. 11. No. 1. pp. 48-55.
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. 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. AIAA Paper. No. 2013-2030. DOI: 10.2514/6.2013-2030
26. *Nau C.* Beamforming within the modal sound field of a vehicle interior // 8th Berlin Beamforming Conference. 2016. BeBeC-2016-S9. 10 p.
27. *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 // 8th Berlin Beamforming Conference. 2016. BeBeC-2016-D9. 17 p.
28. *Ефимцов Б.М., Лазарев Л.А.* Расчет колебаний шпангоутов в подкрепленной оболочке, моделирующей фюзеляж самолета // Акустический журнал. 2014. Т. 60. № 5. С. 518–525. DOI: 10.7868/S0320791914040042
29. *Ефимцов Б.М., Лазарев Л.А.* Комплекс аналитических моделей для прогноза шума в салоне самолета // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 4. С. 443–449.
30. *Ефимцов Б.М., Лазарев Л.А.* Возможность снижения шума в салоне самолета от турбулентного пограничного слоя путем изменения подкрепляющего набора фюзеляжа при неизменной его массе // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 5. С. 631–635. DOI: 10.7868/S0320791915040048
31. *Кулаков С.* Цифровая сертификация. Как цифровой подход Siemens Digital Industries Software позволяет сократить сроки и стоимость сертификации летательных аппаратов // PLM эксперт. 2019. С. 25–29. URL: https://www.plm.automation.siemens.com/media/country/ru_ru/Magazine%20aviation_tcm66-64469.pdf
32. *Зверев А.Я., Лесных Т.О., Паранин Г.В.* Исследование эффективности применения вибропоглощающего материала с армирующим слоем для повышения звукоизоляции элементов конструкции фюзеляжа // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. 47. № 2. С. 82–91.
33. *Зверев А.Я., Черных В.В.* Экспериментальное определение акустических и виброакустических характеристик многослойных композитных панелей // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 6. С. 727–736. DOI: 10.1134/S0320791918060151
34. *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.
35. *Зверев А.Я., Семенова Л.П.* Определение акустической эффективности материалов и конструкций в лабораторных и натуральных условиях. Ч. 2. Вибропоглощение // Ученые записки ЦАГИ. 2019. Т. 50. № 1. С. 43–56.
36. *Зверев А.Я.* Механизмы снижения шума в салоне самолета // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 4. С. 474–479. DOI: 10.7868/S0320791916040183
37. *Griffin J.R.* The control of interior cabin noise due to a turbulent boundary layer noise excitation using smart foam elements. Master's thesis of Science in Mechanical Engineering. Blacksburg, Virginia. 2006. — 102 p.
38. *Копьев П.Г.* Вихревая трубка и турбохолодильник: описание, области применения // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 4. С. 47–54.
39. ОСТ 102551-85. Самолеты гражданской авиации. Методы измерения уровней шума системы кондиционирования воздуха. — 11 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293814/4293814110.htm>
40. *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.
41. Руководство по расчету и проектированию шумоглушения вентиляционных установок. — М.: Стройиздат, 1982. — 87 с.
42. ГОСТ ISO3745-2014. Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Точные методы для заглушенных и полузаглушенных камер. — М.: Стандартинформ, 2015. — 55 с.
43. *Эзрохи Ю.А., Каленский С.М., Морзеева Т.А., Хорева Е.А.* Анализ концепции распределенной силовой установки с механическим приводом вентиляторов при интеграции с летательным аппаратом типа «летающее крыло» // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 96–109.
44. *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.
45. *Сытало К.И.* Сверхзвуковой транспорт: новые возможности и пути развития // Шестая открытая всероссийская (XVIII научно-техническая) конференция по аэроакустике (22–27 сентября 2019, Звенигород): Тезисы докладов. М.: ЦАГИ, 2019. С. 14.
46. *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.

PROBLEMS OF CIVIL AIRCRAFT DESIGN WITH REGARD TO CABIN NOISE REQUIREMENTS

Moshkov P.A.

“Sukhoi Civil Aircraft”,
26, bld. 5, Leninskaya Sloboda str., Moscow, 115280, Russia
e-mail: p_moshkov@scac.ru

Abstract

The presented work is devoted to the problem of modern aircraft design with classical power plant layout, i.e. two turbofan engines on pylons under the wing, with account for the cabin noise requirements. The objective of the work consists in developing the list of scientific research and development activities, which execution is necessary for an aircraft design by the specified parameters of acoustic comfort.

The article considers the problem of noise level normalization in the aircraft cabin and cockpit. The main sources noise in the cabin were determined based on SSJ-100 aircraft testing. To minimize their sound pressure levels in the cabin a list of works while civil aircraft design was developed.

Determining relative contribution of various sources to the total sound pressure level along the cabin length, measured with the A-weighted scale of a standard noise level meter, is necessary for the right selection of methods and means for its reduction. The main sources of noise in the cabin and cockpit are the systems for air conditioning and ventilation, as well as pressure pulsation fields in the boundary layer on the aircraft fuselage surface.

Noise from the engines vibrational impact does not appear to be significant while evaluating total noise level in dBA. Acoustic radiation of the power plant, such as ventilator and jet noise, does not affect total levels of sound pressure weighted by A scale of a standard noise level meter in the cabin and cockpit at the cruise flight mode. The sound of aircraft avionics is not a significant source. But it can be said in general that placement of aircraft equipment systems aggregates should be executed with account for their acoustic characteristics.

The noise level they create in the cabin should be 10–15 dBA lower than the calculated sound pressure level in the cabin of the aircraft under development, determined at the control point of the cabin as the energy sum of noises from air conditioning system and turbulent boundary layer.

The results of this work can be used in the design of modern civil aircraft, with regard for the requirements to acoustic comfort.

The cabin noise problems of civil aircraft was considered. It was shown, based on the SSJ-100 flight tests that the dominant sources of noise in the cabin were the turbulent boundary layer and air conditioning system. The main directions of scientific and research activities, necessary for the aircraft design according to the specified parameters of acoustic comfort were formulated for these two main sources. Basic methods for noise reduction in the cabin were considered.

Keywords: aircraft design, cabin noise, noise reduction techniques, acoustic tests, civil aircraft, sound insulation, acoustic comfort.

References

1. *ISO 5129:2001. Acoustics. Measurement of sound pressure levels in the interior of aircraft during flight*, 2001, 10 p.
2. *Mezhgosudarstvennyi standart. Samolety i vertolety grazhdanskoi aviatsii. Dopustimye urovni shuma v salonakh i kabinakh ekipazha i metody izmereniya shuma, GOST 20296-2014* (Interstate Standard. Aircraft and helicopters of civil aviation. Permissible noise levels in cabins and cockpit and noise measurement methods), Moscow, Standartinform, 2014, 12 p.
3. Kuznetsov V.M. Noise control problems of passenger airplanes (a review), *Acoustical Physics*, 2003, vol. 49, no. 3, pp. 241-262. DOI: 10.1134/1.1574351
4. Kop'ev V.F. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2018, no. 11, pp. 60-69.
5. Moshkov P.A., Samokhin V.F., Yakovlev A.A. Selection of an audibility criterion for propeller driven unmanned aerial vehicle, *Russian Aeronautics*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 149-155.
6. Moshkov P., Ostrikov N., Samokhin V., Valiev A. Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions, *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (Aeroacoustics 2019)*, 2019, AIAA Paper no. 2019-2514. DOI: 10.2514/6.2019-2514
7. *Shum na rabochikh mestakh, v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh zdaniy i na territorii zhiloi zastroiki, Sanitarnye normy, SN 2.2.4/2.1.8.562-96* (Noise at workplaces, in premises of residential, public buildings and in the territory of residential development), 1996, 18 p.
8. *Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii. Ergonomika. Otsenka rechevoi svyazi, GOST R ISO 9921-2013* (National standard of the Russian Federation.

- Ergonomics. Assessment of speech communication), Moscow, Standartinform, 2014, 24 p.
9. Popov Yu.V., Andreev E.V. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2017, no. 10, pp. 25-29.
 10. Golubev A. Yu. *Prostranstvenno-vremennaya struktura neodnorodnykh polei pul'satsii davleniya na poverkhnosti samoleta* (Space-time structure of inhomogeneous pressure pulsations fields on the aircraft surface), Doctor's thesis, Perm, PNIPU, 2016, 32 p.
 11. Golubev A.Yu. Experimental estimate of wave spectra of wall pressure fluctuations of the turbulent boundary layer in the subconvective region, *Acoustical Physics*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 396-403. DOI: 10.1134/S1063771012040070
 12. Golubev A.Yu., Kuznetsov S.V. Distinctive features of pressure fluctuation fields on the surface of steps, *Fluid Dynamics*, 2018, vol. 53, no. 6, pp. 786-794. DOI: 10.1134/S0015462819090015
 13. Golubev A.Yu. Influence of nose configuration of flowed-around models on structure of three-dimensional pressure fluctuation fields, *Acoustical Physics*, 2015, vol. 61, no. 5, pp. 564-571. DOI: 10.1134/S1063771015050085
 14. Tanonin M.S., Kostromitinov S.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, vol. 20, no. 4-3, pp. 362-369.
 15. Antonova N.V., Dubrovin L.D., Egorov E.E., Kalliopin A.K., Petrov Yu.M., Ruzhitskaya V.V., Starostin K.I., Chichindaev A.V., Shustrov Yu.M. *Proektirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* (Design of aviation air conditioning systems), Moscow, Mashinostroenie, 2006, 384 p.
 16. 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
 17. Munin A.G., Efimtsov B.M., Kudisova L.Ya., Morozova N.N., Tkachev A.A., Pankov V.A. *Aviatsionnaya akustika. V 2-kh ch. Ch.2. Shum v salonakh passazhirskikh samoletov* (Aviation acoustics. In 2 vols. Vol. 2 "Noise in passenger cabin of aircrafts"), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 264 p.
 18. Hu N., Appel C., Haxter S., Callsen S., Klabas A. Simulation of wall pressure fluctuations on Airbus-A320 fuselage in cruise flight condition, *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (Aeroacoustics-2019)*, AIAA Paper no. 2019-2728. DOI: 10.2514/6.2019-2728
 19. Kanev N.G. Reverberation in a trapezoidal room, *Acoustical Physics*, 2013, vol. 59, no. 5, pp. 559-564. DOI: 10.1134/S1063771013050102
 20. Lavrov V.N., Moshkov P.A., Popov V.P., Rubanovskii V.V. *Shestaya otkrytaya vserossiiskaya (XVIII nauchno-tekhnicheskaya) konferentsiya po aeroakustike (22-27 September 2019, Zvenigorod)*, Moscow, TsAGI, 2019, pp. 241-242.
 21. 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 (Aeroacoustics-2019)*, AIAA Paper no. 2019-2726. DOI: 10.2514/6.2019-2726
 22. *Dvigateli gazoturbinnye grazhdanskoi aviatsii. Dopustimye urovni vibratsii i obshchie trebovaniya k kontrolyu vibratsii, GOST 26382-84* (Gas turbine engines in civil aviation. Acceptable vibration levels and vibration control general requirements), Moscow, Standarty, 1985, 14 p.
 23. Baklanov V., Denisov S. Multi-connecting system "engine-attachment-airframe", *Journal of Vibroengineering*, 2009, vol. 11, no. 1, pp. 48-55.
 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 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*, AIAA Paper. no. 2013-2030. DOI: 10.2514/6.2013-2030
 26. Nau C. Beamforming within the modal sound field of a vehicle interior, *8th Berlin Beamforming Conference*, 2016, BeBeC-2016-S9, 10 p.
 27. 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, *8th Berlin Beamforming Conference*, 2016, BeBeC-2016-D9, 17 p.
 28. Efimtsov B.M., Lazarev L.A. Calculation of bulkhead vibrations in a supported shell simulating a plane fuselage, *Acoustical Physics*, 2014, vol. 60, no. 5, pp. 562-569. DOI: 10.1134/S1063771014040046
 29. Efimtsov B.M., Lazarev L.A. A complex of analytical models for predicting noise in an aircraft cabin, *Acoustical Physics*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 404-410. DOI: 10.1134/S1063771012040057
 30. Efimtsov B.M., Lazarev L.A. The possibility of reducing the noise produced in an airplane cabin by the turbulent boundary layer by varying the fuselage stiffening set with its mass being invariant, *Acoustical Physics*, 2015, vol. 61, no. 5, pp. 580-584. DOI: 10.1134/S1063771015040041
 31. Kulakov S., *PLM expert*. 2019. pp. 25-29. URL: https://www.plm.automation.siemens.com/media/country/ru_ru/Magazine%20aviation_tcm66-64469.pdf
 32. Zverev A.Ya., Lesnykh T.O., Parandin G.V. Investigation of the efficiency of application of a vibration-absorbing material with a reinforcing layer for improving sound insulation of structural elements of the fuselage, *TsAGI Science Journal*, 2016, vol. 47, no. 2, pp. 223-236. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2016017888
 33. Zverev A.Ya., Chernykh V.V. Experimental determination of acoustic and vibroacoustic characteristics of multilayer composite panels, *Acoustical Physics*, 2018, vol. 64, no. 6, pp. 750-759. DOI: 10.1134/S1063771018060143
 34. Zverev A.Ya., Chernykh V.V. Determining acoustic efficiency of materials and structures in laboratory and real conditions. Part 1 "Sound absorption and sound

- insulation”, *TsAGI Science Journal*, 2018, vol. 49, no. 8, pp. 841-859. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2018029529
35. Zverev A.Ya., Semenova L.P. Determination of the acoustic efficiency of materials and structures in laboratory and real conditions. Part 2 “Vibration absorption”, *TsAGI Science Journal*, 2019, vol. 50, no. 1, pp. 53-69. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2019030190
36. Zverev A.Ya. Noise control mechanisms of inside aircraft, *Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no 4, pp. 478-482. DOI: 10.1134/S1063771016040187
37. Griffin J.R. The control of interior cabin noise due to a turbulent boundary layer noise excitation using smart foam elements. *Master’s thesis of Science in Mechanical Engineering*, Blacksburg, Virginia, 2006, 102 p.
38. Kop’ev R.G. Vortex tube and air cycle machine: description, fields of application. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 47-54.
39. *Samolety grazhdanskoi aviatsii. Metody izmereniya urovnei shuma sistemy konditsionirovaniya vozdukha, OST 102551-85* (Civil aviation aircraft. Methods for measuring noise levels of air conditioning system), 11 p.
40. Aksenov A.A., Gavrilyuk 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: 10.1134/S1063771016040011
41. *Rukovodstvo po raschetu i proektirovaniyu shumoglusheniya ventilyatsionnykh ustanovok* (Guidelines for the calculation and design of noise attenuation of ventilation systems), Moscow, Stroiizdat, 1982, 87 p.
42. *Akustika. Opredelenie urovnei zvukovoi moshchnosti i zvukovoi energii istochnikov shuma po zvukovomu davleniyu. Tochnye metody dlya zaglushennykh i poluzaglushennykh kamer, GOST ISO3745-2014* (Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms. State Standard ISO3745-2014), Moscow, Standartinform, 2015, 55 p.
43. Ezrokhi Yu.A., Kalenskii S.M., Morzeeva T.A., Khoreva E.A. Analysis of a concept of the distributed power plant with mechanical fans drive while integration with a “flying wing” type flying vehicle. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 96-109.
44. Anisimov K.S., Kazhan E.V., Kursakov I.A., Lysenkov A.V., Podaruev V.Yu., 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.
45. Sypalo K.I. *Shestaya otkrytaya vserossiiskaya (XVIII nauchno-tekhnicheskaya) konferentsiya po aeroakustike (22-27 September 2019, Zvenigorod)*, Moscow, TsAGI, 2019, p. 14.
46. Moshkov P.A., Samokhin V.F., Yakovlev A.A. Problem of the community noise reduction for aircraft with open rotor engines, *Russian Aeronautics*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 647-650. DOI: 10.3103/S1068799818040219