DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.08

УДК 534.6:621.45

Н.Н. Остриков^{1, 2}, С.Л. Денисов¹, А.Л. Медведский³

¹ Центральный аэрогидродинамический институт
им. профессора Н.Е. Жуковского, Москва, Россия

² Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

³ Национальный исследовательский центр
«Институт им. Н.Е. Жуковского», Жуковский, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ЭКРАНИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ШУМА НА МАЛОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЯХ

Рассматриваются экспериментальные исследования эффекта экранирования экранами простых геометрических форм для маломасштабных моделей авиационных источников шума, выполненных в заглушенной камере Центрального аэрогидродинамического института АК-2. В качестве источника шума струи использовалась модель двухконтурного сопла перспективного двигателя большой двухконтурности, а в качестве источника шума винта – винтовой прибор с установленной на нем моделью шестилопастного винта. Экранами служили выполненные из различных материалов прямоугольные пластины различной толщины. Все измерения проводились при отсутствии спутного потока. Показано, что снижение шума струи двигателя большой двухконтурности при помощи эффекта экранирования зависит от угла наблюдения, взаимного расположения сопла и экрана, а также обработки края сопла. В целом эффективность экранирования шума круглой струи, истекающей из сопел без элементов шумоглушения, невелика и наблюдается на частотах выше 2 кГц, а на частотах ниже 1,5 кГц, наоборот, имеет место усиление шума струи. Такое поведение объясняется эффектом взаимодействия струи с острой кромкой экрана. Экранирование сопел с шевронной и гофрированной обработкой приводит к существенно большему снижению шума струи. Однако, как и для случая круглой струи, при близком расположении экрана к соплу наблюдается усиление шума на частотах ниже 1,5 кГц. При экранировании шума винта проявляются разнонаправленные эффекты: экранирование тонального шума носит нерегулярный характер и может привести как к снижению шума тональных гармоник, так и к его усилению в зависимости от номера гармоники, угла наблюдения и расстояния между экраном и кончиком винта. В отличие от тонального шума экранирование широкополосного шума имеет достаточно высокую эффективность, которая слабо зависит от расстояния между экраном и кончиком винта.

Ключевые слова: дифракция, экранирование шума струи, экранирование шума винта, эффективность экранирования шума, акустическая долговечность.

N.N. Ostrikov^{1, 2}, S.L. Denisov¹, A.L. Medvedskiy³

¹ Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³ National Research Center "Institute named after N.E. Zhukovsky",
Zhukovsky, Russian Federation

SMALL SCALE EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF SHIELDING AVIATION NOISE SOURCES

This work deals with experimental investigations of shielding phenomena of the aviation noise sources at small scale models by means of simple screens. All experiments were made in Central Aerohydrodynamic Institute anechoic chamber AC-2. The dual jet nozzle model of the next generation engine with high by-pass ratio was used as a jet noise source and the six blade rotor model was used as a rotor noise source. Shielding was realized by means of different kinds of rectangular screens with different thickness. All experiments were made without co-flow. It was showed that dual jet noise reduction for high by-pass ration engine by shielding depends on: observation angle, nozzle and screen relative position, and from nozzle tip treatment (serrated or corrugated nozzle). The round dual jet shielding efficiency for the nozzle without edge treatment is small enough. Experiments showed that noise obtains reduction at frequencies upper 2 kHz, but at frequencies lower than 1.5 kHz jet noise amplification is observed. This behavior can be explained by interaction between jet and screen trailing edge. Serrated and corrugated nozzles showed better shielding efficiency than round nozzle. But as in case of round jet while screen installed near the nozzle tip the jet noise amplification at frequencies lower than 1.5 kHz is observed. In case of rotor noise shielding the different effects are observed. The tonal noise shielding has irregular behavior and leads both to tonal noise reduction and to tonal noise amplification, which is strongly depending from the observation angle, distance between screen and rotor tip, and harmonic number. Unlike tonal noise, broadband noise shielding has a high efficiency, which is little depend on distance between shielding screen and rotor tip.

Keywords: diffraction, jet noise shielding, propeller noise shielding, noise shielding efficiency, acoustic fatigue.

Введение

Одним из наиболее перспективных методов снижения шума двигателя на местности является его экранирование планером самолета. Первые расчетные работы, посвященные оценке эффективности экранирования, были выполнены в 70-х гг. прошлого века [1–3]. Эти расчеты продемонстрировали чрезвычайно высокую эффективность экранирования шума двигателя планером самолета и дали импульс активному поиску различных компоновочных решений, благодаря которым возможно обеспечить экранирование шума двигателя планером самолета.

Выполненные в последнее время расчетные [4–8] и экспериментальные работы [9–13] показали, что реальная эффективность экранирования существенно ниже заявленных ранее значений. Эти же работы показали, что, тем не менее, снижение шума на местности при помощи

эффекта экранирования потенциально возможно, хотя и является сложной многофакторной задачей, существенно зависящей от типа силовой установки и аэродинамической компоновки воздушного судна.

Следует обратить внимание, что при расположении двигателей над фюзеляжем существенно увеличивается площадь планера, подверженная воздействию акустических нагрузок. Эти нагрузки могут привести к появлению усталостных повреждений в конструкции обшивки планера самолета [14–16]. Подобный аспект проблемы особенно важен в связи с тем, что в последнее время всё большее применение в авиации находят композитные материалы, вопрос долговечности которых до сих пор является объектом активных исследований [17]. Именно поэтому определение структуры акустического поля вблизи экранирующих поверхностей планера самолета на сегодняшний день является актуальным.

Таким образом, проблема снижения шума на местности при помощи реализации эффекта экранирования требует не только учета акустических характеристик силовой установки самолета, но и знания свойств материалов, используемых в конструкции планера.

Экспериментальные исследования экранирования шума струи

Исследования эффекта экранирования шума высокоскоростной двухконтурной струи на взлетном режиме были проведены в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) в заглушенной камере АК-2 для экранов различных геометрических размеров, выполненных из различных материалов. На рис. 1 представлены фотографии экспериментальной установки для изучения экранирования шума струи. В качестве экранов использовались две композитные прямоугольные пластины размерами $1500 \times 1000 \times 11$ мм (экран № 1) и $1500 \times 1000 \times 5,5$ мм (экран № 2) и одна металлическая прямоугольная пластина размерами $1500 \times 900 \times 6$ мм (экран № 3). Пластины располагались на расстоянии d от нижней кромки сопла внешнего контура; при проведении измерений величина d принимала значения $1D$ и $2D$ (где D – диаметр сопла внешнего контура). Расстояние от среза сопла внешнего контура до задней кромки пластины L изменялось от $L = 0D$ до $L = 4,3D$. Также был изучен эффект экранирования с использованием шевронных и гофрированных сопел для тех же значений параметров d и L (рис. 2).

Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования экранирования шума струи с металлическим (слева) и композитным (справа) экранами

Рис. 2. Исследование экранирования шума шевронных (слева) и гофрированных (справа) сопел

Металлическая пластина была выполнена из сплава Д16, а композитные пластины состояли из слоя углеткани, слоя стеклоткани, листа пенопласта Herix, слоя стеклоткани и слоя углеткани. Связующим элементом служила смола холодного отверждения Lorit+Lorit 285 (отвердитель).

Измерения проводились в заглушенной камере ЦАГИ АК-2 с использованием микрофонной решетки, состоявшей из восьми микрофонов. Измерительные микрофоны типа 4961 фирмы Bruel & Kjaer устанавливались на стойках по дуге, центр которой располагался на оси сопла. Апертура решетки составляла 70° (от 30 до 100°), а радиус дуги 2 м. Угловое расстояние между микрофонами составляло 10° .

Сначала рассмотрим случай экранирования круглой двухконтурной струи. На рис. 3, 4 представлены экспериментально полученные

Рис. 3. Эффективность экранирования шума струи металлическим экраном при разных значениях параметра d (микрофон 30° , $L = 4,3D$):
 — — — эффективность экранирования для $d = 1D$; — — — эффективность экранирования для $d = 2D$

Рис. 4. Эффективность экранирования шума струи металлическим экраном при разных значениях параметра d (микрофон 90° , $L = 4,3D$):
 — — — эффективность экранирования для $d = 1D$; — — — эффективность экранирования для $d = 2D$

значения для эффективности экранирования (шум экранированной струи минус шум свободной струи). Анализируя полученные экспериментальные результаты, можно сказать следующее: под углом наблюдения 30° к направлению скорости в струе (угол максимального акустического излучения круглой струи) эффект экранирования достаточно слаб (ослабление излучения не более 1,8 дБ) независимо от рассмотренной геометрии взаимного расположения экрана и сопла.

Однако при наблюдении в зоне геометрической тени под углом 90° отмечены разнонаправленные эффекты: в диапазоне высоких частот от 1500 Гц до 25 кГц наблюдается эффект экранирования, увеличивающийся при удалении экрана от струи до 4,5–5 дБ. А в диапазоне низких частот наблюдается усиление шума, возрастающее при приближении экрана к струе до 5,2 дБ. Зависимость от параметра L достаточно слабая, однако зависимость от параметра d существенно влияет на усиление шума на низких частотах.

По результатам обнаруженных особенностей эффекта экранирования шума струи можно сделать вывод о том, что усиление излучения в области геометрической тени возникает благодаря эффекту усиления излучения звука при работе источников звука вблизи острых кромок твердых поверхностей вследствие усиления интенсивности дифрагированных волн при поднесении источника к острой кромке.

Полученные экспериментальные результаты легко объясняются с точки зрения дифракции волн. Итак, при расположении сопла вдали от экранирующей поверхности ($d = 2D$) волна, падающая на острую кромку экрана, которая перпендикулярна оси струи и располагается вниз по потоку, имеет характер звуковой волны. В этом случае дифрагированная волна достаточно слаба и ее роль под углом 30° фактически маскируется интенсивным излучением струи в этом направлении (см. рис. 3). При этом в силу распределения частоты источников звука вдоль оси струи большим геометрическим экранированием обладают более высокие частоты. В связи с этим слабое экранирование наблюдается именно для высоких частот (они при данной конфигурации сопло – экран наиболее геометрически экранированы). Под углом 90° проникают только дифрагированные волны (см. рис. 4). Их амплитуда уменьшается с ростом частоты и увеличением толщины экрана, что и наблюдается в эксперименте.

Если сопло располагается близко от экрана ($d = 1D$) и достаточно сильно удалено от рассматриваемой острой кромки ($L = 4,3D$), то острая кромка оказывается в области интенсивных псевдозвуковых пульсаций ближнего поля сдвигового слоя внешнего контура струи. Причем при рассмотренной конфигурации сопло – экран в области расположения острой кромки доминируют псевдозвуковые пульсации именно на низкой частоте, поэтому на острой кромке порождаются интенсивные дифрагированные волны именно на низкой частоте.

При угле наблюдения 30° (см. рис. 3) источник звука на низких частотах геометрически не экранируется, так как локализован достаточно далеко вниз по потоку струи. Интенсивность дифрагированных волн в этом направлении не оказывается доминирующей на фоне шума свободной струи, так как под этим углом наблюдения отмечается максимальное излучение свободной струи именно на низких частотах. Как следствие, дифрагированная волна оказывается замаскированной прямым шумом струи в этом направлении и общий уровень шума не поднимается на низких частотах.

При угле наблюдения 90° (см. рис. 4) излучение свободной струи существенно уменьшается, в том числе на низких частотах. При этом интенсивная дифрагированная волна, распространяющаяся во всех направлениях, оказывается доминирующей на фоне падающей волны, что приводит к общему усилению излучения на низких частотах. Интенсивность дифрагированных волн монотонно спадает с увеличением толщины экрана, что и наблюдается в эксперименте.

Волны, падающие на острую кромку на высоких частотах, излучаются из части сдвигового слоя струи, расположенного вблизи сопла, что означает повышение геометрического экранирования с повышением частоты. Интенсивность падающей волны на острой кромке оказывается существенно меньшей, чем в области низких частот, поэтому интенсивность дифрагированной волны оказывается достаточно малой. Таким образом, на высоких частотах во всех направлениях наблюдается только эффект экранирования на всех углах наблюдения. Тем не менее присутствие в точках наблюдения дифрагированных волн, рожденных на острой кромке, наблюдается в эксперименте. Оно проявляется при увеличении толщины экрана, в результате которого эффективность экранирования возрастает с ростом частоты и увеличением толщины экрана (рис. 5). Именно при этих обстоятельствах амплитуда дифрагированных волн спадает.

В целом необходимо сделать вывод о том, что существуют оптимальные конфигурации струя – экран, при которых эффективность экранирования струи оказывается максимальной. Это следует из того обстоятельства, что при приближении струи к экрану запускается механизм увеличения излучения в область геометрической тени, который нивелирует экранирование, а при отдалении струи от экрана эффективность экранирования уменьшается.

Рис. 5. Экранирование шума струи экранами из разных материалов (микрофон 90° , $L = 4,3D$, $d = 1D$): черная кривая – струя без экрана; синяя кривая – металлический экран № 3 ($h = 6$ мм); зеленая кривая – композитный экран № 1 ($h = 11$ мм); красная кривая – композитный экран № 2 ($h = 5,5$ мм)

Эксперименты с тремя плоскими прямоугольными экранами различных толщин (приблизительно 5, 6 и 10 мм) показали, что отмеченный эффект усиления излучения под углом наблюдения 90° в области низких частот снижается с увеличением толщины экранирующей пластины (см. рис. 5).

Приведенный анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что при близком расположении экрана к струе двигателя, помимо акустического воздействия от шума струи, наблюдаются интенсивные псевдозвуковые пульсации давления, которые способны вызывать колебания отдельных элементов обшивки планера в этой области. При удалении струи от экранирующей поверхности интенсивность псевдозвуковых пульсаций снижается, однако возрастает роль непосредственного акустического воздействия шума струи. И если в первом случае задача определения реакции конструкции обшивки планера самолета будет весьма сложной и трудоемкой, то во втором случае, используя различные модели для шума струи в ближнем поле [18, 19], можно получить приемлемую оценку отклика, а следовательно, и долговечности конструкции.

Теперь обратимся к исследованию гофрированных сопел. Задача изучения гофрированных сопел в данной работе была обусловлена ре-

зультатами предшествующих исследований, проведенных в Акустическом отделении ЦАГИ [20–23], в которых сначала было проведено теоретическое исследование [20, 21], обосновавшее возможность снижения шума с помощью гофрированных сопел, а затем было получено экспериментальное подтверждение эффекта снижения излучаемого шума [21]. Эксперименты с гофрированными соплами, однако, выявили следующую особенность. В области низких частот для гофрированных сопел наблюдалось большее снижение шума под всеми углами наблюдения, чем для шевронных сопел, а для высоких частот имело место большее усиление излучения, чем для шевронных сопел. При этом характерная частота перехода от снижения шума к его усилению в случае гофрированных сопел была меньшей, чем для шевронных сопел. Это означало, что для натурных сопел в частотный диапазон наиболее воспринимаемого человеком шума попадало именно усиление шума. Именно поэтому гофрированные сопла оказывались менее эффективными с точки зрения снижения шума на местности для самолета классической компоновки.

Анализ результатов зарубежных исследований [24] по экранированию шума шевронных сопел показал, что механизм снижения шума экранированных неосесимметричных струй основан на двух разнонаправленных эффектах: снижение низкочастотного компонента шума, который не подвержен экранированию, за счет подавления крупномасштабных структур турбулентности и снижение высокочастотного компонента шума за счет эффекта экранирования, поскольку область локализации высокочастотного излучения струй сосредоточена вблизи среза. Тем самым возникла идея испытать экранирование шума гофрированных сопел с целью проверки, насколько низкочастотный переход от снижения шума к его усилению, наблюдающийся для гофрированных сопел, скажется на эффективности экранирования шума высоких частот.

Анализ проведенных экспериментальных работ показывает, что под углом наблюдения 30° к направлению скорости в струе, соответствующим в диаграмме направленности свободной струи максимальному акустическому излучению, эффект экранирования для всех исследованных конфигураций составляет от 0,3–1,2 дБ для круглой струи до 4,5 дБ для экранированной струи, истекающей из гофрированного сопла. При наблюдении в зоне геометрической тени под углом 90° отме-

чены разнонаправленные эффекты. При установке сопла на расстоянии $2D$ от экранирующей поверхности (рис. 6) во всем частотном диапазоне (от 200 Гц до 25 кГц) для экранированного сопла с гофрированной обработкой наблюдается снижение шума как по отношению к свободной струе, так и по отношению к свободной струе с гофрированным насадком на 4,7–7,5 дБ и до 11,5 дБ соответственно. Для сопла с шевронным насадком частотный диапазон также простирается от 200 Гц до 25 кГц, однако величина экранирования меньше (2,3–6,2 дБ). При расположении сопла на расстоянии $1D$ от экранирующей поверхности (рис. 7) на частотах от 200 Гц до 1,5 кГц наблюдается усиление шума для всех типов экранированных струй. Причем максимальная величина усиления (до 5,1 дБ) наблюдается для случая, когда сопло располагалось на максимальном в данных экспериментах ($L = 4,3D$) расстоянии от кромки экрана. Эффективность экранирования на частотах свыше 2 кГц такая же, как и для случая расположения сопел на расстоянии $2D$. Таким образом, при отсутствии спутного потока экранированное гофрированное сопло продемонстрировало максимальную величину снижения шума струи в широком частотном диапазоне. Экранированное шевронное сопло показало меньшую эффективность по сравнению с гофрированным соплом.

Рис. 6. Экранирование шума струи при использовании шевронных и гофрированных сопел (микрофон 90° , $d = 2D$, $L = 4,3D$): — шевронное сопло; — гофрированное сопло; — круглое экранированное сопло; — шевронное экранированное сопло; — гофрированное экранированное сопло

Рис. 7. Экранирование шума струи при использовании шевронных и гофрированных сопел (микрофон 90° , $d = 1D$, $L = 4,3D$):
 — шевронное сопло; — гофрированное сопло; — круглое сопло;
 — шевронное экранированное сопло;
 — гофрированное экранированное сопло

Полученные экспериментальные данные с уверенностью показали, что эффективность экранирования существенно зависит от взаимного расположения сопла и экранирующей поверхности. Приближение сопла к экрану совместно с его удалением от задней кромки приводит к усилению генерации шума в низкочастотной области и общему снижению эффективности экранирования, вызванному усилением излучения шума на низких частотах благодаря эффекту острой кромки. Таким образом, проведенное исследование продемонстрировало большую эффективность гофрированных сопел, и это означало, что небольшое значение критической частоты перехода от снижения шума в области низких частот к его усилению в области высоких частот оказалось, тем не менее, достаточным с точки зрения реализации эффекта экранирования.

Итак, анализ полученных в экспериментах данных показал, что механизм широкополосного снижения шума струй, истекающих из гофрированного и шевронного сопла при наличии экрана, состоит в следующем. Применение шевронного и гофрированного сопел, с одной стороны, приводит к подавлению крупномасштабной турбулентности в слое смешения, ответственной за генерацию шума на низких

частотах, тем самым снижая этот компонент шума (шум на низких частотах слабо экранируется благодаря как большим длинам излучаемых волн, так и дальней локализации источника вниз по потоку вдоль оси струи); а с другой стороны, вблизи сопла возникает мелкомасштабная турбулентность, ответственная за генерацию шума на высоких частотах, который хорошо экранируется благодаря как малым длинам излучаемых волн, так и близкому расположению источников высокочастотного шума к срезу сопла.

Экспериментальные исследования экранирования шума винта

На рис. 8 представлена схема экспериментальной установки для исследования экранирования модели шестилопастного винта. Как и в случае экранирования шума струи, измерения проводились в заглушенной камере АК-2 с использованием микрофонной решетки, состоящей из восьми микрофонов. Измерительные микрофоны типа 4961 фирмы Bruel & Кjaer устанавливались на стойках по дуге, центр которой располагался на оси втулки винта. Апертура решетки составляла 70° (от 50° до 120°), а радиус дуги 2 м. Угловое расстояние между микрофонами составляло 10° . Эксперименты проводились при различных режимах работы винтового прибора.

Рис. 8. Схема экспериментальной установки для исследования экранирования шума винта

В качестве экрана использовалась прямоугольная (1500×900×6 мм) металлическая пластина, размещавшаяся на различных расстояниях от кромки винта. Исследования экранирования проводились при симметричном расположении экрана по отношению к плоскости вращения винта. Расстояние от экрана до кромки лопасти винта d изменялось от $0,3D$ до $0,6D$, где D – диаметр винта.

На рис. 9 представлен узкополосный частотный спектр шума винта под углом наблюдения 70° для различных случаев расположения экрана относительно кромки винта (черная кривая соответствует случаю отсутствия экрана, синяя кривая – $0,3D$, красная кривая – $0,6D$). На графике отчетливо видно, что имеет место экранирование широкополосного шума между гармониками винта на 4–6 дБ. Однако для шума на гармониках вращения винта видно как усиление, так и ослабление уровней звукового давления. Похожая картина имела место и на микрофонах, расположенных под другими углами наблюдения.

Рис. 9. Узкополосный частотный спектр шума винта (микрофон под углом 70° , частота оборотов 6000 об/мин)

Ниже на рис. 10 и 11 представлены диаграммы направленности излучения винта для различных положений экрана по отношению к винту. Черная кривая соответствует случаю отсутствия экрана, синяя штрихпунктирная кривая – экран на расстоянии $0,3D$, а красная штриховая кривая – экран на расстоянии $0,6D$, где D – диаметр винта.

Анализ экспериментальных данных показывает, что тональному и широкополосному шуму винта свойственны различные типы экрани-

рования. Отчетливо видно, что существуют как области снижения, так и области усиления тонального шума. Причем такое явление наблюдается как для первой, так и для второй гармоники. Данное поведение можно объяснить образованием интерференционной картины при дифракции на краях экранирующей поверхности.

Рис. 10. Диаграмма направленности излучения для тонального шума винта на первой гармонике при различных положениях экрана:

Рис. 11. Диаграмма направленности излучения для тонального шума винта на второй гармонике при различных положениях экрана

Также обращает на себя внимание влияние расположения экрана по отношению к кромке винта. И если для первой гармоники поведение зависимостей для диаграммы направленности носит схожий характер (см. рис. 10), то для второй гармоники при приближении экрана

к винту диаграмма направленности имеет максимумы под углом 60, 80 и 110° и минимум под углом 70°. При этом разность между максимумом и минимумом составляет 12 дБ. Такое поведение для диаграммы направленности можно связать с влиянием экранирующей поверхности на обтекание лопаток винта. Таким образом, вопреки ожиданиям анализ зависимостей, представленных на рис. 10 и 11, демонстрирует, что приближение экранирующей поверхности к оси вращения винта приводит не к увеличению, а к снижению эффективности экранирования.

Как было сказано выше, снижение широкополосного шума винта отчетливо наблюдается при анализе узкополосных спектров звукового давления. Это подтверждают зависимости для диаграмм направленности, представленные на рис. 12 и 13. Анализ кривых, представленных на этих рисунках, демонстрирует, что величина эффективности экранирования широкополосного шума не носит сильно изрезанный характер и составляет 4,5–7 дБ.

Рис. 12. Диаграмма направленности излучения для широкополосного шума винта между первой и второй гармониками при различных положениях экрана: $\blacklozenge$ – без экрана; $\blacksquare$ – экран 0,3D; $\blacktriangle$ – экран 0,6D

Для случая экранирования широкополосного шума между второй и третьей гармониками зависимость диаграмм направленности от положения экрана относительно кромки винта достаточно слабая (см. рис. 13). Однако при экранировании широкополосного шума между первой и второй гармониками заметно, что экран, расположенный ближе к кромке винта, обеспечивает несколько большую эффективность эк-

ранирования (на 3–4 дБ) в задней полусфере, в то время как в передней полусфере эффективность экранирования на 2 дБ ниже (см. рис. 12).

Рис. 13. Диаграмма направленности излучения для широкополосного шума винта между второй и третьей гармониками при различных положениях экрана: $\blacklozenge$ – без экрана; $\blacksquare$ – экран $0,3D$; $\blacktriangle$ – экран $0,6D$

При рассмотрении долговечности авиационных конструкций, подвергающихся воздействию акустических нагрузок, источником которых является винт или вентилятор, основным критерием является отсутствие резонансного отклика конструкции на частоте следования лопаток и ее гармониках. Это связано с тем, что уровень акустического нагружения на тональных гармониках значительно выше, чем уровень широкополосного шумового воздействия (см., например, рис. 9, где уровень широкополосного шума на 10–12 дБ ниже, чем уровни шума на тональных гармониках). Таким образом, пространственная структура акустического поля на поверхности конструкции при таком виде воздействия не является определяющим фактором. Решающее значение имеют акустический спектр и спектр колебаний конструкции.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования эффекта экранирования шума маломасштабных моделей струи и винта при отсутствии спутного потока показали, что данная задача является сложной многофакторной проблемой, зависящей от взаимного расположения струи

и экрана, а также от режима истечения струи, обработки сопла и параметров работы винтового прибора.

Одним из основных экспериментальных результатов, полученных в данной работе, является то, что при отсутствии спутного потока экранированное сопло с гофрированным насадком продемонстрировало максимальную величину снижения шума струи в широком частотном диапазоне. Экранированное сопло с шевронным насадком показало меньшую эффективность, чем гофрированное сопло. Экранирование струи с традиционным необработанным соплом показало минимальную эффективность экранирования.

При близком расположении экрана к соплу и по мере удаления от кромки экрана наблюдалось усиление шума в области низких частот для всех типов исследованных сопел. Однако при увеличении толщины экранирующей кромки приводило к снижению усиления шума в области низких частот под углом наблюдения 90° .

Зависимость эффективности экранирования от расположения сопла, а также толщины и материала экранирующей поверхности наталкивает на мысль, что при проектировании планера самолета необходимо принимать во внимание свойства материалов, подвергающихся интенсивному акустическому воздействию в области задней кромки. Одним из основных требований при этом будут требования ресурса и долговечности конструкции. Расчетное определение спектра акустических нагрузок в этой области позволит провести анализ как эффективности экранирования, так и долговечности конструкции.

Изучение результатов экранирования шума винта показало, что для данного размера экрана экспериментально обнаружено разнонаправленное влияние экранирующей поверхности на тональные и широкополосные составляющие шума винта. Экранирование широкополосного шума слабо зависит от расстояния между экраном и осью вращения, а тональные составляющие шума винта при приближении экрана к оси вращения усиливаются по отношению к шуму свободного винта.

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что эффект усиления тональных гармоник шума винта при приближении оси винта к экранирующей поверхности связан с обратным влиянием экрана на обтекание лопастей винта: поток, натекающий на диск винта, становится неосесимметричным, что и запускает механизм

усиления акустического излучения винта, находящегося в неоднородном потоке.

Результаты, полученные в данной работе, не только позволяют глубже понять физику явления экранирования авиационных источников шума, но и могут использоваться для верификации вычислительных методов расчета экранирования шума струи и винта, а также для расчета долговечности панелей авиационных конструкций при широкополосном акустическом воздействии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ № 14.628.21.0006 (проект ASPIRE).

Библиографический список

1. Von Glahn U., Groesbeck D., Reshotko M. Geometry considerations for jet noise shielding with CTOL engine-over-the-wing concept // AIAA. – June 1974. – Paper 74–568.
2. Von Glahn U., Groesbeck D., Wagner J. Wing shielding of high-velocity jet and shock-associated noise with cold and hot flow jets // AIAA. – July 1976. – Paper 76–547.
3. Maekawa Z. Noise Reduction by Screens // Journal of Applied Acoustics. – 1968. – Vol. 1. – P. 157–173.
4. Tinetti A., Dunn M. Aeroacoustic noise prediction using the fast scattering code // AIAA. – May 2005. – Paper 2005–3061.
5. Tinetti A., Dunn M. Scattering of high frequency duct noise by full-scale hybrid wing body configurations // AIAA. – May 2009. – Paper 2009–3400.
6. Hileman J., Spakovsky Z., Drela M. Airframe design for silent fuel-efficient aircraft // Journal of Aircraft. – 2010. – Vol. 47, № 3. – P. 956–969.
7. Papamoschou D. Prediction of jet noise shielding // AIAA. – Jan 2010. – Paper 2010–653.
8. Colas D., Spakovszky Z. A turbomachinery noise shielding framework based on the modified theory of physical optics // AIAA. – May 2013. – Paper 2013–2136.
9. Papamoschou D., Mayoral S. Experiments on shielding of jet noise by airframe surface // AIAA. – May 2009. – Paper 2009–3326.
10. Papamoschou D., Mayoral S. Effects of source redistribution on jet noise shielding // AIAA. – Jan. 2010. – Paper 2010–652.

11. Nurkan T., Ahuja K. Determination of geometric farfield for ducted and unducted rotors // *International Journal of Aeroacoustics*. – 2012. – Vol. 11, № 5, 6. – P. 607–628.

12. Nurkan T., Ahuja K., Gaeta R. Validity of the point source assumption in rotor noise measurements with shielding // *AIAA*. – Jan. 2010. – Paper 2010–3853.

13. Ostrikov N., Denisov S. Airframe shielding of noncompact aviation noise sources: theory and experiment // *AIAA*. – June 2015. – Paper 2015–2136.

14. Clarkson B. Stresses in skin panels subjected to random acoustic loading // *The Aeronautical Journal*. – 1968. – Vol. 72, № 695. – P. 1000–1010.

15. Денисов С.Л., Медведский А.Л. Отклик ортотропных пластин на широкополосное акустическое воздействие при различных видах взаимной спектральной плотности действующей нагрузки // *Механика композиционных материалов*. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 527–543.

16. Денисов С.Л., Медведский А.Л., Паранин Г.В. Изучение долговечности изотропных пластин при широкополосном акустическом нагружении с различными видами функции взаимной спектральной плотности // *Ученые записки ЦАГИ*. – 2014. – Т. XLV, № 2. – С. 118–136.

17. Xiao Y., White R., Aglietti G. Comparison of structural response and fatigue endurance of aircraft flap-like box structures subjected to acoustic loading // *Journal Acoustic Society of America*. – 2005. – Vol. 117, № 5. – P. 2820–2834.

18. Papamoschou D. Wavepacket modeling of the jet noise source // *AIAA*. – June 2011. – Paper 2011–2835.

19. Papamoschou D. Modeling of jet-by-jet siffraction // *AIAA*. – Jan. 2013. – Paper 2013–0614.

20. Kopiev V.F., Ostrikov N.N., Chernyshev S.A., Elliott J.W. Aeroacoustics of supersonic jet issued from corrugated nozzle: new approach and prospects // *International Journal of Aeroacoustics*. – 2004. – Vol. 3, № 3. – P. 199–228.

21. Kopiev V.F., Ostrikov N.N., Axisymmetrical instability wave control due to resonance coupling of azimuthal modes in high-speed jet issuing from corrugated nozzle // *AIAA*. – May 2012. – Paper 2012–2144.

22. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н. Снижение шума дозвуковой струи за счет гофрированной формы сопла // Акустический журнал. – 2013. – Т. 59, № 2. – С. 232–234.

23. Газодинамические и акустические характеристики нетрадиционных схем реактивных сопел / Е.В. Власов, Г.Н. Лаврухин, Д.В. Мерекин [и др.] // Ученые записки ЦАГИ. – 2003. – Т. XXXIV, № 3. – С. 24–34.

24. Papamoschou D., Mayoral S. Jet noise shielding for advanced hybrid wing-body configurations // AIAA. – 2011. – Paper 2011–912.

References

1. Von Glahn U., Groesbeck D., Reshotko M. Geometry considerations for jet noise shielding with CTOL engine-over-the-wing concept. *AIAA*, June 1974, Paper 74-568.

2. Von Glahn U., Groesbeck D., Wagner J. Wing shielding of high-velocity jet and shock-associated noise with cold and hot flow jets. *AIAA*, July 1976, Paper 76-547.

3. Maekawa Z. Noise reduction by screens. *Journal of Applied Acoustics*, 1968, vol. 1, pp. 157-173.

4. Tinetti A., Dunn M. Aeroacoustic noise prediction using the fast scattering code. *AIAA*, May 2005, Paper 2005-3061.

5. Tinetti A., Dunn M. Scattering of high frequency duct noise by full-scale hybrid wing body configurations. *AIAA*, May 2009, Paper 2009-3400.

6. Hileman J., Spakovsky Z., Drela M. Airframe design for silent fuel-efficient aircraft. *Journal of Aircraft*, 2010, vol. 47, no. 3, pp. 956-969.

7. Papamoschou D. Prediction of jet noise shielding. *AIAA*, Jan 2010, Paper 2010-653.

8. Colas D., Spakovszky Z. A turbomachinery noise shielding framework based on the modified theory of physical optics. *AIAA*, May 2013, Paper 2013-2136.

9. Papamoschou D., Mayoral S. Experiments on shielding of jet noise by airframe surface. *AIAA*, May 2009, Paper 2009-3326.

10. Papamoschou D., Mayoral S. Effects of source redistribution on jet noise shielding. *AIAA*, Jan. 2010, Paper 2010-652.

11. Nurkan T., Ahuja K. Determination of geometric farfield for ducted and unducted rotors. *International Journal of Aeroacoustics*, 2012, vol. 11, no. 5, 6, pp. 607-628.

12. Nurkan T., Ahuja K., Gaeta R. Validity of the point source assumption in rotor noise measurements with shielding. *AIAA*, Jan. 2010, Paper 2010-3853.

13. Ostrikov N., Denisov S. Airframe shielding of noncompact aviation noise sources: theory and experiment. *AIAA*, June 2015, Paper 2015-2136.

14. Clarkson B. Stresses in skin panels subjected to random acoustic loading. *The Aeronautical Journal*, 1968, vol. 72, no. 695, pp. 1000-1010.

15. Denisov S.L., Medvedskiy A.L. Otklik ortotropnykh plastin na shirokopolosnoe akusticheskoe vozdeystvie pri razlichnykh vidakh vzaimnoy spektralnoy plotnosti deystvuyushchey nagruzki [Response of the orthotropic plates on broadband acoustical action at different cross-spectral density of acting load]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov*, 2012, vol. 18, no 4, pp. 527-543.

16. Denisov S.L., Medvedskiy A.L., Paragin G.V. Izuchenie dolgovechnosti izotropnykh plastin pri shirokopolosnom akusticheskom nagruzhении s razlichnymi vidami funktsii vzaimnoy spektralnoy plotnosti [The study of the isotropic plate endurance under external wideband acoustic excitation with different types of spatial correlation functions]. *Uchenye zapiski Tsentralnogo aerogidrodinamicheskogo instituta*, 2014, vol. XLV, no. 2, pp. 118-136.

17. Xiao Y., White R., Aglietti G. Comparison of structural response and fatigue endurance of aircraft flap-like box structures subjected to acoustic loading. *Journal Acoustic Society of America*, 2005, vol. 117, no. 5, pp. 2820-2834.

18. Papamoschou D. Wavepacket modeling of the jet noise source. *AIAA*, June 2011, Paper 2011-2835.

19. Papamoschou D. Modeling of jet-by-jet siffraction. *AIAA*, Jan. 2013, Paper 2013-0614.

20. Kopiev V.F., Ostrikov N.N., Chernyshev S.A., Elliott J.W. Aeroacoustics of supersonic jet issued from corrugated nozzle: new approach and prospects. *International Journal of Aeroacoustics*, 2004, vol. 3, no. 3, pp. 199-228.

21. Kopiev V.F., Ostrikov N.N., Axisymmetrical instability wave control due to resonance coupling of azimuthal modes in high-speed jet issuing from corrugated nozzle. *AIAA*, May 2012, Paper 2012-2144.

22. Kopiev V.F., Zaytsev M.Yu., Ostrikov N.N. Subsonic jet noise reduction by means of corrugated nozzle. *Acoustical Physics*, 2013, vol. 59, no. 2, pp. 207-209.

23. Vlasov E.V., Lavrukhin G.N., Merekin D.V. [et. al.]. *Gazodinamicheskie i akusticheskie kharakteristiki netraditsionnykh skhem reaktivnykh sopel* [Gas-dynamic and acoustic characteristics of unconventional nozzles design]. *Uchenye zapiski Tsentralnogo aerogidrodinamicheskogo instituta*, 2003, vol. 34, no. 3, pp. 24-34.

24. Papamoschou D., Mayoral S. Jet noise shielding for advanced hybrid wing-body configurations. *AIAA*, 2011, Paper 2011-912.

Об авторах

Остриков Николай Николаевич (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, начальник отдела акустического отделения (ННО-9) Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н.Е. Жуковского (105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru); ведущий научный сотрудник лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

Денисов Станислав Леонидович (Москва, Россия) – инженер акустического отделения (ННО-9) Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н.Е. Жуковского (105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, e-mail: stl.denisov@ gmail.com).

Медведский Александр Леонидович (Жуковский, Россия) – доктор физико-математических наук, доцент, директор департамента координации и сопровождения государственных программ Национального исследовательского центра «Институт им. Н.Е. Жуковского» (140180, Россия, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1, e-mail: mdv66@mail.ru).

About the authors

Nikolay N. Ostrikov (Moscow, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Head of the Unit in Acoustic

Department, Central Aerohydrodynamic Institute (17, Radio st., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru); Leading Researcher, Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komso-molsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Stanislav L. Denisov (Moscow, Russian Federation) – Engineer, Acoustic Department, Central Aerohydrodynamic Institute (17, Radio st., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: stl.denisov@gmail.com).

Alexander L. Medvedskiy (Zhukovsky, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Director of the Department Coordination and Support of Government Programs, National Research Center “Institute named after N.E. Zhukovsky” (1, Zhukovsky st., Zhukovsky, 140180, Russian Federation, e-mail: mdv66@mail.ru).

Получено 14.04.2016