DOI: 10.15593/2224-9982/2017.50.11

УДК 534.6:621.45

Е.С. Федотов, О.Ю. Кустов, И.В. Храмцов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА ОБРАЗЦОВ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Первичная оценка акустических свойств образцов звукопоглощающих конструкций (ЗПК) авиационных двигателей проводится на акустическом интерферометре с нормальным падением волн. Изучение работы образцов ЗПК при высоких уровнях звукового давления с использованием различных видов акустического сигнала представляет интерес в связи с тем, что шум авиационного двигателя имеет как недетерминированные составляющие, так и тональные компоненты.

В данной работе отражены результаты исследований, посвященных определению импеданса ЗПК с использованием чистого тона в качестве сигнала динамика. Представлены результаты численного моделирования и верификации с физическим экспериментом на чистом тоне. Кроме того, приведены результаты сравнения значений действительной части импеданса образца ЗПК на чистом тоне и белом шуме при одинаковом уровне звукового давления на поверхности образца. Также предложен способ определения уровня звукового давления на поверхности образца ЗПК без использования третьего микрофона. Предложенный способ верифицировался с использованием численного моделирования на основе системы линеаризованных уравнений Навье–Стокса. Полученные результаты могут представлять интерес при проектировании ЗПК для снижения шума вентилятора как одного из доминирующих источников шума авиационного двигателя.

Ключевые слова: аэроакустика, авиационный двигатель, звукопоглощающие конструкции, интерферометр, импеданс, резонатор Гельмгольца, численное моделирование, уравнения Навье–Стокса, метод конечных элементов.

E.S. Fedotov, O.Yu. Kustov, I.V. Khramtsov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH OF INFLUENCE OF ACOUSTIC SIGNAL TYPE ON IDENTIFICATION OF IMPEDANCE OF SOUND-ABSORBING LINER SAMPLES

The primary evaluation of acoustic properties of the sound-absorbing liner samples of aircraft engines is carried out on an acoustic interferometer with normal incidence of waves. The study of the liner sample operation at high sound pressure levels using various types of acoustic signal is of interest in connection with the fact that the noise of an aircraft engine has both nondeterministic and tonal components.

The article reflects the studies on the determination of the liner impedance using pure tone as a loudspeaker signal. The results of numerical simulation and verification with a physical experiment on pure tone are presented. In addition, the results of a comparative analysis of the real part of the liner sample impedance on pure tone and white noise are presented at the same level of sound pressure on the sample surface. A method for determination of the sound pressure level on the liner sample surface without using a third microphone is also proposed. The method was verified using numerical simulation based on the system of linearized Navier-Stokes equations. The results obtained may be of interest in designing sound-absorbing liners for reduction of fan noise, which is one of the dominant noise sources of the aircraft engine.

Keywords: aeroacoustics, aircraft engine, liners, interferometer, impedance, Helmholtz resonator, numerical simulation, Navier-Stokes equation, finite element method.

Введение

Авиационный двигатель является сложным источником шума, поскольку шум образуется во всех его узлах: вентиляторе, компрессоре, камере сгорания, турбине и реактивном сопле. В современных турбореактивных двухконтурных двигателях (ТРДД) магистральных самолетов

главным источником шума можно считать вентилятор, так как его шум на взлетном режиме сопоставим с шумом струи, а на режиме посадки является доминирующим в общем шуме двигателя [1, 2]. Исходя из этого снижение шума вентилятора является одним из необходимых условий удовлетворения самолетом норм по шуму на местности.

Генерация шума вентилятором обусловлена взаимодействием неравномерностей набегающего потока с лопатками, в результате чего возникают флуктуации давления, преобразующиеся в звуковые волны. При этом спектральный состав шума вентилятора содержит как широкополосный шум, так и дискретные составляющие на частоте следования лопаток рабочего колеса и ее гармониках [3]. Для снижения шума вентилятора каналы двигателя облицовывают звукопоглощающими конструкциями (ЗПК) резонансного типа, настроенными в первую очередь на гашение тональных компонентов шума вентилятора. В то же время геометрические параметры ЗПК (степень перфорации, глубина полости резонатора, диаметр отверстий, толщина перфорированного листа и др.) стараются подобрать так, чтобы полученный при этом импеданс также обеспечивал как можно лучшее поглощение и широкополосного шума. Таким образом, при экспериментальных исследованиях ЗПК в лабораторных условиях, например на интерферометре с нормальным падением волн [4–7], идеальным случаем являлось бы использование звукового сигнала, максимально близкого по спектральному составу к реальному шуму вентилятора, однако пока исследования проводятся в основном на сигналах «чистый тон» и «белый шум», что имеет свои особенности.

Например, использование в качестве сигнала белого шума значительно сокращает время испытаний и позволяет за несколько секунд определить импеданс образца ЗПК в широком диапазоне частот. В то же время характер изменения действительной части импеданса ЗПК, получаемого по полуэмпирическим моделям [8–10], которые учитывают изменение импеданса за счет высоких уровней звукового давления (что актуально для шума в каналах ТРДД), соответствует применению тонального сигнала. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные, полученные с использованием чистого тона в качестве сигнала, излучаемого динамиком.

На рис. 1, *а* представлены результаты определения действительной части импеданса образца однослойной ЗПК с диаметром отверстий 2 мм, толщиной перфорированного листа 1,3 мм, высотой полости 25 мм и долей перфорации 10 % на основе полуэмпирической теории [11] и эксперимента для разных уровней звукового давления (SPL). Аналогичные исследования отражены в работе [12], где использовался образец со следующими характеристиками: диаметр отверстий 0,8 мм; толщина перфорированного листа 0,8 мм; высота полости 25,4 мм; доля перфорации 6,7 %. Действительная часть импеданса представлена на рис. 1, *б*. Примечательным для полуэмпирических моделей и экспериментальных исследований на чистом тоне является то, что на графиках действительной части импеданса с увеличением уровня звукового давления на поверхности образца появляется некий «горб» в окрестности частоты резонанса образца ЗПК.

В результатах экспериментальных исследований с использованием белого шума наблюдается не только количественное, но и существенное качественное отличие от экспериментов с чистым тоном. Несмотря на то, что при использовании белого шума и чистого тона выдерживается один и тот же уровень звукового давления, наблюдается принципиальная разница в поведении образца ЗПК в зависимости от вида сигнала. Из рис. 2, *а* и *б* видно, что в окрестности частоты резонанса образца ЗПК (примерно 2000 Гц) отсутствует нарастание какого-либо «горба» на графике действительной части импеданса в зависимости от уровня звукового давления. Использовался однослойный образец ЗПК со следующими характеристиками: диаметр отверстий 1,3 мм; толщина перфорированного листа 1 мм; высота полости 19 мм; доля перфорации 5,1 %.

Подобные результаты поведения действительной части импеданса образцов однослойных резонансных ЗПК для белого шума можно найти также в работах [13, 14]. Стоит отметить, что в одной из редких работ по исследованию влияния типа сигнала на импеданс резонансной ЗПК

[15] приведен график для двухслойной ЗПК, на котором можно видеть хорошее совпадение значений импеданса как на белом шуме, так и на чистом тоне, однако результаты для однослойной ЗПК в этой работе не представлены.

Рис. 1. Действительная часть импеданса образца ЗПК при тональном сигнале: *а* – сплошная линия – расчет по полуэмпирической теории [11], точки – эксперимент; *б* – сплошная линия – расчет по полуэмпирической теории [12], разные значки – эксперимент

Рис. 2. Импеданс образца ЗПК при широкополосном сигнале: *а* – действительная часть; *б* – мнимая часть; 1 – SPL 110 дБ; 2 – SPL 120 дБ; 3 – SPL 130 дБ; 4 – SPL 140 дБ

Принципиальная разница в поведении образцов ЗПК в зависимости от вида сигнала, который используется в интерферометре, становится усложняющим фактором в процессе выбора геометрических характеристик ЗПК, поэтому задача по определению импеданса образцов ЗПК на высоких уровнях звукового давления при различных видах сигнала является актуальной.

Особенности определения импеданса образцов ЗПК при чистом тоне на нелинейном режиме

Определение импеданса образца ЗПК на интерферометре с нормальным падением волн заключается в воздействии акустическим сигналом на образец и обработке входных сигналов с микрофонов. Установки типа интерферометр нормального падения имеются в лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ПНИПУ (рис. 3) и в Центре акустических исследований ПНИПУ (рис. 4). Подробно конструкция и характеристики данных интерферометров представлены в работах [14, 16].

Рис. 3. Акустический интерферометр в ЛМГШиМА

Рис. 4. Акустический интерферометр в ЦАИ

В интерферометре ЦАИ предусмотрена возможность установки третьего микрофона для определения уровня звукового давления в непосредственной близости к поверхности образца ЗПК. В интерферометре ЛМГШиМА такая возможность отсутствует, и в ходе проведенных исследований авторами был предложен способ определения уровня звукового давления на поверхности образца ЗПК без использования третьего микрофона. Предложенный способ верифицировался с использованием численного моделирования на основе системы линеаризованных уравнений Навье–Стокса.

Определение уровня звукового давления на поверхности образца ЗПК без использования третьего микрофона заключается в следующем. Звуковая волна излучается динамиком, отразившись от поверхности ЗПК, часть энергии звуковой волны поглощается и со сдвигом фазы движется в обратном направлении. Тогда звуковое давление в каждой точке трубы будет представлять собой сумму прямой и отраженной волн:

$$p = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}, \quad (1)$$

где A и B – амплитуды прямой и отраженной волн; k – волновое число; x – координата вдоль оси трубы.

Схема интерферометра представлена на рис. 5. На схеме заглавными буквами обозначены точки, в которых необходимо измерить звуковое давление с помощью микрофонов. Начало координат совмещено с поверхностью образца ЗПК.

Рис. 5. Схема расчетного интерферометра

В основу определения импеданса положен двухмикрофонный метод передаточной функции¹ [17]. На основании данного метода амплитуды прямой и отраженной волн выразятся следующими соотношениями:

$$A = \frac{e^{-ika} p_a - e^{-ikb} p_b}{e^{-2ika} - e^{-2ikb}}, \quad B = \frac{e^{ika} p_a - e^{ikb} p_b}{e^{2ika} - e^{2ikb}}, \quad (2)$$

где p_a и p_b – измеренное давление в точках A и B. В данной системе координат поверхность образца ЗПК соответствует значению $x=0$, тогда, подставив (2) в (1), получим значение амплитуды звукового давления на поверхности образца ЗПК:

$$p_0 = A + B.$$

Уровень звукового давления определяется по формуле

$$SPL_0 = 20 \log \left(\frac{p_0 / \sqrt{2}}{p_{ref}} \right), \quad (3)$$

где p_{ref} – предел слышимости, $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

В результате наложения прямой и отраженной волн внутри трубы образуется картина стоячих волн, для которой характерно изменение уровня звукового давления для какой-либо фиксированной точки пространства в зависимости от частоты, т.е., несмотря на постоянство амплитуды на входе в трубу, будет наблюдаться различный уровень звукового давления на поверхности образца ЗПК для различных частот.

Для проверки описанного выше утверждения было проведено численное моделирование акустических процессов в интерферометре на основе системы линеаризованных уравнений Навье–Стокса, которая имеет следующий вид:

$$i\omega \rho + \rho_0 (\nabla \cdot \mathbf{U}) = 0,$$

$$i\omega \rho_0 \mathbf{U} = \nabla \cdot \left(-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) - \left(\frac{2\mu}{3} - \mu_B \right) (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} \right),$$

$$i\omega \rho_0 C_p T = -\nabla \cdot (-k \nabla T) + i\omega p T_0 \alpha_0 + Q,$$

$$\rho = \rho_0 (\beta_T p - \alpha_0 T).$$

¹ ISO 10534-2:1998. Acoustics-determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2. Transfer-function method. 1998.

Здесь ρ – плотность; $\mathbf{U}$ – вектор колебательной скорости; p – акустическое давление; μ – коэффициент динамической вязкости; μ_v – коэффициент объемной вязкости («вторая вязкость»), который принимался равным нулю; T – температура; C_p – удельная теплоемкость среды при постоянном давлении; k – коэффициент теплопроводности; α_0 – коэффициент теплового расширения; β_T – коэффициент сжимаемости; Q – внешние источники тепловой энергии, которые в нашем случае равны нулю. Незвестными являются переменные p , $\mathbf{U}$, ρ и T , которые описывают акустическое поле. Нулевой индекс относится к равновесным параметрам среды. Граничные условия на стенке выбирались изотермическими, т.е. с заданной температурой (равной температуре окружающей среды) и нулевым вектором скорости (стенка без проскальзывания). На входе задавалось давление с заданной амплитудой.

Система уравнений решалась методом конечных элементов на неструктурированной сетке в осесимметричной постановке в коммерческом пакете COMSOL, использовался частотный решатель. Моделировалась труба длиной 100 мм с одиночным резонатором Гельмгольца на конце. Размеры резонатора: диаметр отверстия 5 мм; толщина перфорированного листа 2 мм; высота полости 20 мм; доля перфорации 3 %. Для уменьшения вычислительных затрат использовалась осесимметричная постановка. На входе задавалось граничное условие в виде давления с заданной постоянной амплитудой в 20 Па. Расчеты проводились в диапазоне частот от 500 до 2000 Гц с шагом 10 Гц.

В результате численного моделирования в точках A и B определялось акустическое давление, на основе которого по формулам (2) и (1) рассчитывалось давление на образце ЗПК (косвенное определение). Полученное значение пересчитывалось по формуле (3) в уровень звукового давления и сравнивалось с уровнем звукового давления на образце ЗПК, взятым непосредственно из численного моделирования (прямое определение). Результаты сравнения представлены на рис. 6.

Рис. 6. Уровень звукового давления на поверхности образца в зависимости от частоты

Из рис. 6 видно, что уровень звукового давления, непосредственно определенный на образце ЗПК численным моделированием, и уровень, определенный по данным от двух точек A и B , хорошо совпадают друг с другом. Это дает основания считать правомерным предложенный подход определения уровня звукового давления на поверхности образца ЗПК и использовать данный подход в дальнейшем.

Численное моделирование интерферометра с одиночным резонатором Гельмгольца

Для наиболее полного изучения процесса поглощения энергии акустической волны резонатором Гельмгольца в интерферометре авторами ранее было проведено численное моделирование с использованием белого шума в качестве входного сигнала [18]. В связи с тем, что наиболее значимой компонентой шума вентилятора является тональная составляющая, появляется интерес к исследованию работы резонатора Гельмгольца в рамках численного моделирования с использованием чистого тона в качестве входного сигнала при высоких уровнях звукового давления.

В рамках данного исследования проводилось численное моделирование акустического интерферометра с одиночным резонатором Гельмгольца в качестве образца ЗПК. Моделирование проводилось с использованием системы уравнений газовой динамики в нестационарной постановке, которая решалась с помощью метода конечных элементов. Система уравнений выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{U} = 0,$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{U} + \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \operatorname{div} \mathbf{U},$$

где ρ – плотность; $\mathbf{U}$ – вектор скорости; p – давление; η и ζ – коэффициенты динамической и объемной вязкости соответственно. Распространение звука является адиабатическим процессом, следовательно, необходимо использовать уравнение сохранения энергии и уравнение состояния идеального газа:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{U} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q,$$

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T,$$

$$p = \rho R T,$$

где C_p – теплоемкость при постоянном давлении; $\mathbf{q}$ – вектор теплового потока; Q – сумма источников тепловой энергии; λ – коэффициент теплопроводности; R – удельная газовая постоянная.

Параметры образца: диаметр отверстия 5 мм; диаметр внутренней полости 29 мм; толщина перфорированного листа 2 мм; высота внутренней полости 20 мм; доля перфорации 3 %.

В качестве граничного условия на входе использовалась гармоническая зависимость давления от времени в виде

$$p(t) = P \cdot \sin(2\pi f t),$$

где частота f менялась от 500 до 2000 Гц с шагом 250 Гц. С целью избежать проявления «растекания» спектра шаг по времени выбирался таким образом, чтобы частота дискретизации была кратна частоте f .

Исследование сеточной сходимости решаемой задачи проводилось при гармонической зависимости давления от времени с частотой 1000 Гц в качестве граничного условия на входе в интерферометр. На выбранной частоте было проведено моделирование с использованием шести вариантов сеточного разбиения расчетной области, которые отличались размерами максимального и минимального элемента. На рис. 7 представлены фрагменты расчетной области вблизи отверстия резонатора Гельмгольца с разбиением на конечные элементы с указанием количества элементов.

Рис. 7. Варианты сеточного разбиения расчетной области

Вычисления проводились на обычном персональном компьютере (Intel Core i7-5820K, 3.30 GHz, 48 ГБ ОЗУ) с использованием технологии параллельных вычислений. Требуемое время вычислений в зависимости от числа конечных элементов сетки представлено в виде графической зависимости на рис. 8.

Рис. 8. Требуемое время расчета в зависимости от числа элементов

Из рис. 8 видно, что для наиболее качественной сетки (Extra fine) время, необходимое для вычислений, составило более 3 ч, что говорит о большой продолжительности расчета, если необходимо провести моделирование для различных частот.

Для выяснения целесообразности вычислительных затрат проводилось определение действительной и мнимой частей импеданса при фиксированной частоте и амплитуде давления на входе в канал. Изменялось лишь число конечных элементов в расчетной области. Результаты представлены на рис. 9 и 10.

Рис. 9. Изменение действительной части импеданса в зависимости от числа элементов

Рис. 10. Изменение мнимой части импеданса в зависимости от числа элементов

На основании полученных результатов был выбран вариант сетки Fine как компромиссное решение между точностью и скоростью вычислений. Дальнейшие вычисления для различных частот проводились именно на сетке конечных элементов варианта Fine. Уровень звукового давления на поверхности образца составлял (140 ± 1) дБ в зависимости от частоты.

Динамика картины вихреобразования в отверстии резонатора представлена на рис. 11, где в различные моменты времени отображено поле скорости. Из рисунка видно, что в отверстии резонатора формируется вихревое кольцо и в зависимости от фазы волны в течение одного периода кольцо движется либо в полость резонатора, либо в канал интерферометра. Энергия акустической волны «перекачивается» в энергию вихревого кольца, и таким образом достигается значительное поглощение шума.

Рис. 11. Поле скорости в окрестности отверстия резонатора
в различные моменты времени

Спектры акустического давления представлены на рис. 12, где отображены спектры сигналов с микрофонов и спектры сигналов с точек расчетной области для различных частот гармонического сигнала на входе. Как и ожидалось, частота основной спектральной составляющей совпадает с частотой сигнала на входе в трубу.

На рис. 13 показана верификация действительной части импеданса образца ЗПК при уровнях звукового давления 125, 130, 135 и 140 дБ на чистом тоне и белом шуме. Полученные результаты свидетельствуют не только о количественных, но и о качественных различиях в зависимости от вида сигнала. Вблизи резонансной частоты образца (в данном случае 1000 Гц), как и ожидалось, наблюдается максимальное значение действительной части импеданса образца ЗПК при использовании чистого тона. При использовании белого шума в качестве исходного сигнала данного максимума не наблюдается.

Рис. 12. Спектры сигналов с частотами 500–2000 Гц на микрофонах «А» и «В» при эксперименте и численном моделировании

Рис. 12. Окончание

Рис. 13. Действительная часть импеданса образца ЗПК при различных уровнях звукового давления в зависимости от вида сигнала

Заключение

В результате исследований по определению импеданса ЗПК с использованием чистого тона получено хорошее совпадение результатов численного моделирования и физического эксперимента. Кроме того, верифицированы результаты значений действительной части импеданса образца ЗПК на чистом тоне и белом шуме при одинаковом уровне звукового давления на поверхности образца. Отработана методика создания одного и того же уровня звукового давления на поверхности однослойного образца ЗПК в зависимости от вида сигнала.

Предложен способ определения уровня звукового давления на поверхности образца ЗПК без использования третьего микрофона. Предложенный способ успешно верифицирован с использованием численного моделирования на основе системы линеаризованных уравнений Навье–Стокса.

Результаты работы подтверждают необходимость обеспечения равенства суммарного уровня звукового давления белого шума или максимального уровня звукового давления чистого тона на каждой частоте генерации при эксперименте на интерферометре и показывают, что под уровнем звукового давления следует понимать суммарный уровень звукового давления с учетом частотного спектра, что ранее отмечено в исследовании [15].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, договор № 17-41-590107\17.

Библиографический список

1. Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P. An overview of aircraft noise reduction technologies // Journal Aerospace Lab. – 2014. – Iss. 7.
2. Проблемы создания эффективных ЗПК для перспективных ТРДД с высокой степенью двухконтурности [Электронный ресурс] / В.Ф. Копьев, Н.Н. Остриков, М.А. Яковец, М.С. Ипатов // Функциональные материалы для снижения авиационного шума в салоне и на местности: материалы II Всерос. науч.-техн. конф., 16 февраля 2017, Москва. – URL: <https://conf.viam.ru/conf/234/proceedings> (дата обращения: 20.06.2017).
3. Муниин А.Г. Авиационная акустика. – М.: Машиностроение, 1986. – Ч. 1. – 244 с.
4. Bodén H. Acoustic characterisation of perforates using non-linear system identification techniques // AIAA Paper. – 2007. – № 2007–3530.

5. A comparison study of normal-incidence acoustic impedance measurements of a perforate liner / T. Schultz, F. Liu, L. Cattafesta, M. Sheplak, M. Jones // *AIAA Paper*. – 2009. – № 2009–3301.
6. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций / А.Н. Аношкин, А.Г. Захаров, Н.А. Городкова, В.А. Чурсин // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2015. – № 1. – С. 5–20.
7. Khaletskiy Yu., Pochkin Ya. Acoustic features of porous ceramic material for application as element of sound absorbing treatment in turbofan nacelle // *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration*, Florence, 12–16 July 2015. – Florence, 2015. – Vol. 2 of 8. – P. 1480–1485.
8. Elnady T., Bodén H. On the modeling of the acoustic impedance of perforates with flow // *AIAA Paper*. – 2003. – № 2003–3304.
9. Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data // *AIAA Paper*. – 2008. – № 2008–2930.
10. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // *Акустический журнал*. – 2007. – Т. 53, № 6. – С. 861–872.
11. Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев В.Е. Аэродинамические источники шума. – М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.
12. Harvey H. Hubbard aeroacoustics of flight vehicles: Theory and practice. Vol. 1. Noise Sources // *NASA Reference Publication 1258*. – 1991. – Vol. 1. – WRDC Technical report 90–3052. – 592 p.
13. Мякотникова А.С., Синер А.А. Численное исследование акустических свойств звукопоглощающих конструкций // *Ученые записки ЦАГИ*. – 2012. – Т. XLIII, № 4. – С. 95–110.
14. Сравнительный анализ акустических интерферометров на основе расчетно-экспериментальных исследований образцов звукопоглощающих конструкций / Е.С. Федотов, О.Ю. Кустов, И.В. Храмцов, В.В. Пальчиковский // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2017. – № 48. – С. 89–103.
15. Ипатов М.С., Остроумов М.Н., Соболев А.Ф. Влияние спектра высокоинтенсивного источника звука на звукопоглощающие свойства облицовок резонансного типа // *Акустический журнал*. – 2012. – Т. 58, № 4. – С. 465–472.
16. Кустов О.Ю., Пальчиковский В.В. Интерферометр для высоких уровней акустического давления // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. – 2015. – Т. 1. – С. 157–160.
17. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory. II. Experiment // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1980. – Vol. 68, № 3. – P. 907–921.
18. Fedotov E.S., Khramtsov I.V., Kustov O.Yu. Numerical simulation of the processes in the normal incidence tube for high acoustic pressure levels // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1770, № 030120. – 7 p.

References

1. Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P. An overview of aircraft noise reduction technologies. *Journal Aerospace Lab*, 2014, Iss. 7.
2. Kopiev V.F., Ostrikov N.N., Yakovets M.A., Ipatov M.S. Problemy sozdaniya effektivnykh ZPK dlya perspektivnykh TRDD s vysokoy stepenyu dvukhkонтурности [The problems of creation of effective sound-absorbing liners for the future bypass turbofan engines with high bypass ratio]. *II Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Funktsionalnye materialy dlya snizheniya aviatsionnogo shuma v salone i na mestnosti»*, 16 February 2017, Moscow, available at: <https://conf.viam.ru/conf/234/proceedings> (accessed 20 June 2017).
3. Munin A.G. *Aviatsionnaya akustika. Chast 1* [Aviation acoustics. Part 1]. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 244 p.
4. Bodén H. Acoustic characterisation of perforates using non-linear system identification techniques. *AIAA Paper*, 2007, no. 2007-3530.
5. Schultz T., Liu F., Cattafesta L., Sheplak M., Jones M. A comparison study of normal-incidence acoustic impedance measurements of a perforate liner. *AIAA Paper*, 2009, no. 2009-3301.
6. Anoshkin A.N., Zakharov A.G., Gorodkova N.A., Chursin V.A. Raschetno-eksperimentalnye issledovaniya rezonansnykh mnogoslownykh zvukopogloshchayushchikh konstruktsiy [Computational and experimental studies of resonance sound-absorbing multilayer structures]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 5-20.
7. Khaletskiy Yu., Pochkin Ya. Acoustic features of porous ceramic material for application as element of sound absorbing treatment in turbofan nacelle. *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration*, 12-16 July 2015. Florence, 2015, vol. 2 of 8, pp. 1480-1485.

8. Elnady T., Bodén H. On the modeling of the acoustic impedance of perforates with flow. *AIAA Paper*, 2003, no. 2003–3304.
9. Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data. *AIAA Paper*, 2008, no. 2008-2930.
10. Sobolev A.F. A semiempirical theory of a one-layer cellular sound-absorbing lining with a perforated face panel. *Acoustical Physics*, 2007, vol. 53, no. 5, pp. 762-771.
11. Munin A.G., Kuznetsov V.M., Leontev V.E. Aerodinamicheskie istochniki shuma [Aerodynamic sources of noise]. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 248 p.
12. Harvey H. Hubbard Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice. Vol. 1. Noise Sources, *NASA Reference Publication 1258*, 1991, vol. 1. WRDC Technical report 90–3052, 592 p.
13. Myakotnikova A.S., Siner A.A. Numerical calculation of acoustical properties of liners. *TsAGI Science Journal*, 2012, vol. 63, no. 4, pp. 95-110.
14. Fedotov E.S., Kustov O.Yu., Khrantsov I.V., Palchikovskiy V.V. Sravnitelnyy analiz akusticheskikh interferometrov na osnove raschetno-eksperimentalnykh issledovaniy obraztsov zvukopogloshchayushchikh konstruktsiy [Comparative analysis of acoustical interferometers based on experiment-calculated research of sound-absorbing liner samples]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2017, no. 48, pp. 89-103.
15. Ipatov M.S., Ostroumov M.N., Sobolev A.F. Effect of the spectrum of a high-intensity sound source on the sound-absorbing properties of a resonance-type acoustic lining. *Acoustical Physics*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 426-433.
16. Kustov O.Yu., Palchikovskiy V.V. Interferometr dlya vysokikh urovney akusticheskogo davleniya [Interferometer for high levels of acoustic pressure]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2015, vol. 1, pp. 157-160.
17. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory. II. Experiment. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, vol. 68, no. 3, pp. 907-921.
18. Fedotov E.S., Khrantsov I.V., Kustov O.Yu. Numerical simulation of the processes in the normal incidence tube for high acoustic pressure levels. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1770, no. 030120.

Об авторах

Федотов Евгений Сергеевич (Пермь, Россия) – инженер лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: tesla.prog@rambler.ru).

Кустов Олег Юрьевич (Пермь, Россия) – инженер лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: kustovou@yandex.ru).

Храмцов Игорь Валерьевич (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: igorhrs92@mail.ru).

About the authors

Evgeniy S. Fedotov (Perm, Russian Federation) – Engineer, Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis Laboratory, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: tesla.prog@rambler.ru).

Oleg Yu. Kustov (Perm, Russian Federation) – Engineer, Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis Laboratory, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: kustovou@yandex.ru).

Igor V. Khrantsov (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher, Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis Laboratory, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: igorhrs92@mail.ru).

Получено 02.08.2017