DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.06

УДК 534.6:621.45

**В.В. Пальчиковский, О.Ю. Кустов, И.А. Корин,
И.Е. Черепанов, И.В. Храмцов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ В ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ С РАЗНЫМ ДИАМЕТРОМ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ КАНАЛА

Проводится исследование акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций (ЗПК) в интерферометрах с разным диаметром поперечного сечения канала с целью отработки методики надежной идентификации акустических характеристик ЗПК при учете распространения в канале азимутальной моды для дальнейшего применения методики к измерению крупногабаритной ЗПК портативным интерферометром. Основу проверки составляет положение о независимости импеданса локально реагирующих ЗПК от диаметра образца при нормальном падении волн.

Кратко описаны основы определения импеданса образцов ЗПК по измерениям двумя и четырьмя микрофонами в канале интерферометра. Представлена конструкция нового интерферометра с диаметром канала 50 мм. Исследован частотный диапазон работы созданного интерферометра. Разработаны и созданы однослойные и двухслойные образцы ЗПК диаметром 30 и 50 мм. Обработка результатов измерений выполнялась с применением метода передаточной функции на основе двух микрофонов и метода модальной декомпозиции на основе четырех микрофонов. Для всех исследованных образцов ЗПК наблюдается хорошее качественное согласование импедансов между соответствующими образцами диаметром 30 и 50 мм. Также в большей части частотного диапазона наблюдается хорошее количественное совпадение. Некоторые количественные расхождения объясняются трудностью воспроизводства абсолютной одинаковости условий проведения эксперимента в двух разных интерферометрах.

Ключевые слова: авиационный двигатель, шум вентилятора, звукопоглощающие конструкции, импеданс, интерферометр с нормальным падением волн, метод модальной декомпозиции, метод передаточной функции.

V.V. Palchikovskiy, O.Yu. Kustov, I.A. Korin, I.E. Cherepanov, I.V. Khramtsov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

INVESTIGATION OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF LINER SAMPLES IN INTERFEROMETERS WITH DIFFERENT DUCT DIAMETER

The investigation of acoustic characteristic of sound-absorbing liner samples in normal incidence interferometers with different diameters of a duct is carried out. The object of the investigation is the test of the technique for reliable identification of the liner acoustic characteristics, taking into account the propagation of azimuthal mode in the duct, for further application of the technique to measuring the large-scale liners by portable interferometer. The basis of the verification is the independence of the impedance of locally reacting liner on the sample diameter when the normal waves incident.

The fundamentals of the determination of the liner sample impedance based on 2- and 4-microphones measurements in the interferometer are briefly described. The design of a new interferometer with a duct diameter of 50 mm is presented. The frequency range of the created interferometer is investigated. Single-layer and double-layer liner samples with diameter of 30 and 50 mm were developed and produced by additive technology. The processing of the measurement results was carried out using the transfer function method based on 2 microphones, and the modal decomposition method based on 4 microphones. For all investigated liner samples, a good qualitative matching of the impedances between the corresponding samples with diameter of 30 and 50 mm is observed. The good quantitative matching is also observed for the most part of the frequency range. Some quantitative discrepancies are due to the difficulty of reproducing the absolute uniformity of the experimental conditions in two different interferometers.

Keywords: aircraft engine, fan noise, sound-absorbing liners, impedance, normal incidence interferometer, modal decomposition method, transfer function method.

Введение

Для снижения шума вентилятора каналы авиационного двигателя облицовывают резонансными звукопоглощающими конструкциями (ЗПК), например с сотовым наполнителем.

Данные конструкции относятся к локально реагирующим ЗПК, т.е. конструкциям, в которых отклик получается в той же точке, где было приложено входное воздействие. В качестве входного воздействия выступает акустическое давление p , а откликом является акустическая скорость v , нормальная к поверхности ЗПК. Связь между ними устанавливается через такую характеристику, как акустический импеданс:

$$Z = \frac{1}{\rho c} \frac{p}{v}. \quad (1)$$

Здесь ρ – плотность среды; c – скорость звука в среде.

В случае падения по нормали к образцу плоской волны входное воздействие получается везде одинаковым. Поскольку резонаторы изолированы друг от друга жесткими стенками, то при условии одинаковых геометрических характеристик резонаторов отклик на входное воздействие также получается везде одинаковым. Таким образом, при испытаниях в условиях нормально падающих волн полученные акустические характеристики не должны зависеть от размеров образца ЗПК. Например, несмотря на то, что на образец диаметром 30 мм приходится всего одна полная ячейка резонатора (рис. 1, а), а на образец диаметром 50 мм приходится семь полных ячеек (рис. 1, б), их акустические характеристики должны быть одинаковы.

Рис. 1. Образцы однослойной ЗПК диаметром 30 (а) и 50 (б) мм

Данное обстоятельство указывает на преимущество испытаний в интерферометрах с нормальным падением волн малогабаритных образцов локально реагирующих ЗПК, поскольку помимо того, что требуется меньший расход материала на их изготовление, условия испытаний оказываются более простыми, что вызвано следующими причинами.

Как известно, распределение акустического давления при заданной частоте в цилиндрическом канале может быть представлено выражением

$$p(r, \theta, z, t) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \left(A_{mn} e^{i(k_z z + m\theta)} + B_{mn} e^{-i(k_z z + m\theta)} \right) J_m(k_r r) e^{-i\omega t}, \quad (2)$$

где M, N – число распространяющихся азимутальных и радиальных мод; m, n – номер азимутальной и радиальной моды; A_{mn}, B_{mn} – амплитуда падающей и отраженной моды с номером (m, n) ; J_m – функция Бесселя 1-го рода порядка m ; k_r – радиальное волновое число, $k_r = \mu_{mn}/R$; R – радиус цилиндрического канала; μ_{mn} – n -й корень характеристического уравнения $dJ_m(x)/dx = 0$; i – мнимая единица; k_z – осевое волновое число, $k_z = \sqrt{k^2 - k_r^2}$; k – пространственное волновое число, $k = \omega/c$; ω – круговая частота, $\omega = 2\pi f$; f – линейная частота. Необходимо отметить, что выражение $k_z = \sqrt{k^2 - k_r^2}$ является комплексной функцией, в которой для

выполнения условия причинности решения (2) выбраны ветви $\text{Im } k_z \geq 0$, а соответствующие разрезы проведены по линиям $\text{Im } k_z = 0$. Зависимость от времени t в выражении (2) далее будет опускаться.

Если у моды с номером (m, n) осевое волновое число k_z действительное, то эта мода распространяется по каналу. Если k_z является мнимым числом, то эта мода в канале затухнет, если даже и имело место ее локальное возбуждение. Таким образом, из последнего выражения для осевого волнового числа k_z легко выводится так называемая «частота отсечки» f_c (это частота, ниже которой мода будет затухать):

$$f_c = \frac{\mu_{mn} c}{2\pi R}. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что чем меньше радиус канала, тем выше частота возникновения первой азимутальной моды, следовательно, тем в более широком частотном диапазоне можно проводить испытания образцов ЗПК в условиях распространения в канале интерферометра только поршневой моды $(0, 0)$. В этом случае выражение (2) сводится к более простому виду:

$$p(z) = A_{00}e^{ikz} + B_{00}e^{-ikz}. \quad (4)$$

Таким образом, для нахождения неизвестных коэффициентов A , B достаточно провести измерения акустического давления в двух точках. Полученные экспериментальные данные обрабатываются стандартизованным методом передаточной функции на основе двух микрофонов¹ [1], в результате чего определяется коэффициент отражения

$$R = \frac{H_{12} - e^{-ik(z_1 - z_2)}}{e^{ik(z_1 - z_2)} - H_{12}} e^{2ikz_1},$$

где H_{12} – передаточная функция между микрофонами; z_1 , z_2 – координаты микрофонов.

Далее с учетом определения коэффициента отражения как $R = B/A$, выражений (1), (4), а также уравнения Эйлера для скорости частиц, направленной по внешней нормали к полупространству, в котором распространяется падающая волна [2],

$$v = \frac{i}{k\rho c} \left(-\frac{\partial p}{\partial z} \right)$$

можно найти импеданс

$$Z = \frac{1 + R}{1 - R}. \quad (5)$$

Как известно, наиболее энергонесущие гармоники шума вентилятора на разных режимах работы авиационного двигателя сосредоточены в диапазоне 500–6000 Гц, что можно видеть на спектрах, например в работах [3, 4]. При измерениях в этом частотном диапазоне в случае применения интерферометра с диаметром канала 30 мм согласно выражению (3) частота отсечки первой азимутальной моды равна 6700 Гц (при скорости звука 343 м/с), и для определения неизвестных коэффициентов A , B можно применить двухмикрофонный метод.

В случае использования интерферометра с диаметром канала 50 мм частота отсечки первой азимутальной моды равна 4020 Гц и выражение (2) при условии установки микрофонов в линию (в этом случае можно принять $\theta = 0$) принимает вид

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

$$p(z) = A_{00}e^{ikz} + B_{00}e^{-ikz} + A_{10}e^{ikz} + B_{10}e^{-ikz}. \quad (6)$$

Здесь множитель $J_1(\mu_{10})$ уже включен в коэффициенты A_{10} , B_{10} . Таким образом, чтобы определить все неизвестные коэффициенты A , B , необходимо составить на основе выражения (6) систему из четырех уравнений и решить ее, для чего предварительно нужно провести измерения акустического давления $p(z)$ в четырех точках на стенке канала интерферометра. Данный подход носит название «Метод модальной декомпозиции» [5, 6]. При этом импеданс образца ЗПК (5) определяется только по коэффициенту отражения нулевой моды, которая не зависит от поперечных размеров канала.

Отметим, что для нахождения импеданса ЗПК с учетом первой азимутальной моды также может применяться четырехмикрофонный метод передаточных функций. Впервые он был представлен в работе [7] и использовался для определения импеданса образцов ЗПК в более широком диапазоне частот 500–11 000 Гц.

Несмотря на более сложный комплекс работ, связанный с использованием интерферометров большего размера, их применение может быть актуально на этапе исследований изготовленных крупногабаритных конструкций ЗПК на соответствие импеданса конечного изделия заложенному при проектировании значению. Как известно, эти значения могут отличаться по технологическим причинам: допуски на изготовление элементов конструкции, заливание клеем отверстий перфорации и полости резонаторов, попадание ребер резонаторов на отверстия перфорации. В этом случае можно использовать портативный вариант интерферометра. Соответственно, использование интерферометра с большим диаметром канала позволит охватить большее число резонаторов и получить более представительные данные о качестве акустических характеристик в области измерения на поверхности крупногабаритной ЗПК.

Кроме того, в последнее время активно проводятся исследования, направленные на повышение широкополосности звукопоглощения резонансных ЗПК путем применения в одном слое резонаторов разной глубины [8–11]. При проведении данных исследований в условиях нормально падающих волн для лучшей регистрации эффекта совместной работы таких резонаторов стоит использовать более представительные образцы ЗПК, испытание которых возможно в интерферометрах с каналом большего диаметра.

Для реализации данных задач важно знать, что имеющаяся методика измерений на интерферометре с большим сечением канала и обработки экспериментальных данных обеспечивает получение достоверных значений акустических характеристик ЗПК. Далее в статье представлены результаты исследований по данному вопросу.

Подготовка экспериментальной базы для проведения исследований образцов ЗПК в интерферометрах с разным диаметром канала

Исследования выполнялись в лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ПНИПУ. Ранее в лаборатории был создан двухмикрофонный интерферометр с диаметром канала 30 мм (далее используется обозначение «Интерферометр-30»). Конструкция и комплектация установки подробно представлены в работах [12, 13]. Адекватность работы «Интерферометра-30» неоднократно была проверена в различных экспериментах, например описанных в работах [13–15], поэтому в данном исследовании результаты, получаемые на этой установке, рассматривались как своего рода эталонные, с которыми сравниваются результаты испытаний, полученные на интерферометре большего размера.

Для проведения исследований образцов ЗПК с большим диаметром был создан четырехмикрофонный интерферометр с диаметром канала 50 мм (далее используется обозначение «Интерферометр-50»). Конструкция данной установки представлена на рис. 2.

Рис. 2. Четырехмикрофонный интерферометр с диаметром канала 50 мм: *a* – условная схема установки (1 – динамик; 2 – опорное кольцо; 3 – образец ЗПК; 4 – поршень); *б* – изготовленный интерферометр

Результаты измерений на указанных установках обрабатываются приведенными выше методами передаточной функции на основе двух микрофонов² [1] и модальной декомпозиции на основе четырех микрофонов [5, 6].

Для проведения сравнительных исследований по определению импеданса образцов ЗПК диаметром 30 и 50 мм специально были разработаны конструкции образцов с максимально одинаковыми геометрическими характеристиками, значения которых представлены в таблице. Диаметр отверстий перфорации у всех образцов был равен 2 мм, высота горла резонатора 1 мм.

Геометрические характеристики исследуемых образцов ЗПК

Обозначение	Число слоев	Степень перфорации по слоям, %	Высота резонатора по слоям, мм
%12h26	1	12	10
%8h20	1	8	10
%12h10	1	15	10
%5h10	1	5	10
%8h20+%5h10	2	8/5	20/10
%12h26+%12h10	2	12/12	26/10
%12h26+%5h10	2	12/5	26/10
%8h20+%3h10	2	8/3	20/10

² ISO 10534-2:1998.

Первичное тестирование созданного «Интерферометра-50» с нормальным падением волн проводилось на однослойных образцах %8h20. На рис. 3, а представлены результаты, полученные для обоих образцов методом передаточной функции на основе измерений двумя микрофонами. На этом и других графиках мнимые и действительные части импеданса вычислены для зависимости от времени вида $e^{i\omega t}$. Видно, что начиная с частоты 4020 Гц действительная и мнимая части импеданса в «Интерферометре-50» перестают согласовываться с результатами «Интерферометра-30», поскольку появляется азимутальная мода, не учитываемая в двухмикрофонном методе передаточной функции.

Рис. 3. Определение импеданса образца ЗПК %8h20 разными методами: а – двухмикрофонный метод; б – двух- и четырехмикрофонный методы; синяя кривая – образец 30 мм; красная кривая – образец 50 мм

Результаты обработки четырехмикрофонным методом данных экспериментов, полученных в «Интерферометре-50», показаны на рис. 3, б (красная кривая). Видно, что при возникновении первой азимутальной моды в диапазоне частот 4–5 кГц еще сохраняется относительно приемлемое соответствие между импедансами образцов диаметрами 30 и 50 мм, однако начиная с частоты 5197 Гц наблюдается существенное расхождение результатов. Данная особенность связана с обращением в ноль на некоторых частотах интересующего диапазона исследований определителя системы из четырех уравнений, сформированной на основе выражения (6).

Определитель системы уравнений для случая одинакового расстояния между микрофонами d (в нашем случае 0,033 м) принимает следующий вид:

$$\begin{vmatrix} e^{ik_{00}z_1} & e^{-ik_{00}z_1} & e^{ik_{10}z_1} & e^{-ik_{10}z_1} \\ e^{ik_{00}(z_1+d)} & e^{-ik_{00}(z_1+d)} & e^{ik_{10}(z_1+d)} & e^{-ik_{10}(z_1+d)} \\ e^{ik_{00}(z_1+2d)} & e^{-ik_{00}(z_1+2d)} & e^{ik_{10}(z_1+2d)} & e^{-ik_{10}(z_1+2d)} \\ e^{ik_{00}(z_1+3d)} & e^{-ik_{00}(z_1+3d)} & e^{ik_{10}(z_1+3d)} & e^{-ik_{10}(z_1+3d)} \end{vmatrix} = \quad (7)$$

$$= e^{-3id(k_{00}+k_{10})} (e^{2idk_{00}} - 1)(e^{2idk_{10}} - 1)(e^{idk_{00}} - e^{idk_{10}} - e^{id(2k_{00}+k_{10})} + e^{id(k_{00}+2k_{10})})^2.$$

На рис. 4 представлено изменение значения определителя в зависимости от частоты, на котором можно видеть, что в исследуемом диапазоне частот 500–6000 Гц находится два нулевых значения. В целом на всем диапазоне частот определитель имеет бесконечное множество нулей.

Выражение (7) представляет собой произведение четырех множителей, поэтому для отыскания корней необходимо рассматривать их в отдельности. Первый множитель корней не имеет. Корни второго множителя находятся по формуле

$$k_{00} = \frac{\pi n}{d}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Рис. 4. Значение определителя в зависимости от частоты

Из полученного выражения длина волны и частота находятся по формулам

$$\lambda_{00} = \frac{2\pi}{k_{00}} = \frac{2d}{n}, \quad (8)$$

$$f_{00} = \frac{k_{00}c}{2\pi} = \frac{cn}{2d}.$$

Для $n = 1$ частота $f_{00} = 5197$ Гц (при скорости звука 343 м/с), что соответствует первому корню на рис. 4. Из соотношения (8) видно, что данный корень соответствует длине полуволны поршневой моды, кратной расстоянию между микрофонами.

Аналогичное решение имеет третий множитель выражения (7):

$$k_{10} = \frac{\pi n}{d}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (9)$$

$$\lambda_{10} = \frac{2\pi}{k_{10}} = \frac{2d}{n}.$$

Значение частоты соответствует положительному решению квадратного уравнения

$$k_{10} = \sqrt{k_{00}^2 - k_r^2},$$

откуда

$$f_{10} = \frac{c\sqrt{(\mu_{10}d)^2 + (\pi nR)^2}}{2d\pi R},$$

где R – радиус канала интерферометра.

Для $n = 1$ частота $f_{10} = 6570$ Гц, что соответствует третьему корню на рис. 4. Из соотношения (9) видно, что данный корень соответствует длине полуволны азимутальной моды, кратной расстоянию между микрофонами.

После выполнения перехода к тригонометрической форме по формуле Эйлера последний множитель выражения (7) может быть переписан в виде

$$-4\sin\left(\frac{k_{00} + k_{10}}{2}d\right)\sin\left(\frac{k_{00} - k_{10}}{2}d\right)\left(\cos((k_{00} + k_{10})d) + i\sin((k_{00} + k_{10})d)\right).$$

Данное выражение обращается в ноль при

$$\frac{k_{00} + k_{10}}{2}d = \pi n, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

После подстановки выражений для волновых чисел получается квадратное уравнение относительно частоты, положительный корень которого равен

$$f_{00+10} = \frac{c \left((\mu_{10} d)^2 + (2n\pi R)^2 \right)}{8dn\pi^2 R^2}.$$

Для $n=1$ частота $f_{00+10} = 5974$ Гц, что соответствует второму корню на рис. 4. Физически данный корень может быть интерпретирован как волна, полученная в результате суперпозиции поршневой и азимутальной моды, с волновым числом $k^* = k_{00} + k_{10}$.

Таким образом, для смещения нулей определителя (7) за пределы интересующего диапазона частот была выполнена модификация «Интерферометра-50» путем рассверливания между микрофонами дополнительных отверстий, в результате чего для дальнейших исследований расстояние между микрофонами d было уменьшено до 0,0165 м.

Результаты экспериментальных исследований образцов ЗПК в интерферометрах с разным диаметром канала

Результаты определения импеданса для указанных в таблице образцов ЗПК с диаметром 30 и 50 мм представлены на рис. 5 и 6. Видно, что для некоторых образцов, например %12h26 и %8p20, получено хорошее согласование импедансов по данным измерений в «Интерферометре-30» и «Интерферометре-50».

Рис. 5. Импедансы однослойных образцов ЗПК при уровне звукового давления 150 дБ:
синяя кривая – образец 30 мм; красная кривая – образец 50 мм

Рис. 6. Импедансы двухслойных образцов ЗПК при уровне звукового давления 150 дБ:
синяя кривая – образец 30 мм; красная кривая – образец 50 мм

При этом заметно существенное расхождение, не только количественное, но и качественное, значений импедансов в диапазоне частот 500–900 Гц. Данная особенность обусловлена тем, что нижний частотный диапазон определяется частотой, начиная с которой становится заметным изменение фазы между замерами акустического давления в двух разных точках. В международном стандарте³ считается, что на длине, равной 5 % от длины волны, уже обеспечивается заметное изменение фазы. Однако многочисленные результаты измерений говорят о том, что это расстояние можно сократить и до 3 %. Тогда, учитывая расстояние между микрофонами d , на котором происходит изменение фазы, значение предельной нижней частоты можно определить по формуле

$$f_l = (0,03 \dots 0,05) \frac{c}{d}.$$

Таким образом, для $d = 0,0165$ м нижний предел определения акустических характеристик ЗПК может находиться в диапазоне частот $f_l = 623 \dots 1039$ Гц. В результате для увеличения частотного диапазона с 5152 до 6000 Гц и более (до 10 394 Гц) пришлось сократить частотный диапазон работы «Интерферометра-50» в области низких частот с 500 до 900 Гц.

В целом импедансы всех рассмотренных образцов имеют на большей части диапазона интересующих частот хорошее количественное согласование, что подтверждает теоретические доводы об одинаковости импеданса локально реагирующих ЗПК разных диаметров при нормальном падении волн, а также демонстрирует, что применяемая методика измерений на

³ ISO 10534-2:1998.

«Интерферометре-50» и обработки экспериментальных данных обеспечивает получение адекватных значений акустических характеристик ЗПК.

При этом в результате исследования обнаружено, что достижение данных результатов требует очень высокого качества схожести экспериментов: соблюдение одинаковой ориентации образцов в канале интерферометров относительно линии установки микрофонов; одинаковой силы поджатия образцов; абсолютной одинаковости геометрических характеристик образцов ЗПК и др. Данные особенности оставляют открытым вопрос о надежности получаемой в эксперименте информации в случае измерения портативным интерферометром конечного изделия в виде крупногабаритной ЗПК, что требует проведения отдельного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.625.21.0038 (идентификатор проекта RFMEFI62516X0038).

Библиографический список

1. 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.
2. Скучик Е. Основы акустики. – М.: Мир, 1976. – Т. 1. – 520 с.
3. Fan noise source diagnostic test – far-field acoustic results / R.P. Woodward, C.E. Hughes, R.J. Jeracki, C.J. Miller // AIAA Paper. – 2002. – № 2002-2427.
4. Халецкий Ю.Д., Почкин Я.С. Снижение шума вентилятора авиадвигателя путем наклона лопаток спрямляющего аппарата // Акустический журнал. – 2015. – Т. 61, № 1. – С. 106–113.
5. Akoum M., Ville J.-M. Measurement of the reflection matrix of a discontinuity in a duct // Journal of the Acoustical Society of America. – 1998. – Vol. 103, № 5. – P. 2463–2468.
6. Schultz T., Cattafesta L.N., Sheplak M. Comparison of the two-microphone method and a modal decomposition method for acoustic impedance testing // AIAA Paper. – 2006. – № 2006-2695.
7. Ипатов М.С., Остроумов М.Н., Соболев А.Ф. Четырехмикрофонный метод определения импеданса образцов звукопоглощающих конструкций на интерферометре при нормальном падении звука // Труды ЦАГИ. – 2014. – Вып. 2739. – С. 58–68.
8. Jones M.G., Hoverton B.M., Ayle E. Evaluation of parallel-element, variable-impedance, broadband acoustic liner concepts // AIAA Paper. – 2012. – № 2012-2194.
9. Howerton B.M., Jones M.G., Buckley J.L. Development and validation of an interactive liner design and impedance modeling tool // AIAA Paper. – 2012. – № 2012-2197.
10. Howerton B.M., Jones M.G. Acoustic liner drag: a parametric study of conventional configurations // AIAA Paper. – 2015. – № 2015-2230.
11. Evaluation of variable-depth liner configurations for increased broadband noise reduction / M.G. Jones, W.R. Watson, D.M. Nark, B.M. Howerton // AIAA Paper. – 2015. – № 2015-2697.
12. Кустов О.Ю., Пальчиковский В.В. Интерферометр для высоких уровней акустического давления // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – Т. 1. – С. 157–160.
13. 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.
14. Кустов О.Ю., Лапин И.Н., Пальчиковский В.В. О влиянии дефектов в образцах звукопоглощающих конструкций на их акустические характеристики // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – Т. 1. – С. 112–115.
15. Расчетно-экспериментальное исследование работы интерферометра при высоких уровнях акустического давления [Электронный ресурс] / О.Ю. Кустов, И.В. Храмцов, Е.С. Федотов, А.А. Синер, В.В. Пальчиковский // Материалы 59-й Всерос. науч. конф. МФТИ с междунар. участием, 21–26 ноября 2016 года, М.; Долгопрудный; Жуковский. – URL: http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/2331.pdf (дата обращения: 10.10.2017).

References

1. 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.
2. Skudrzyk E. The foundations of acoustics. Springer, New York, 1971.
3. Woodward R.P., Hughes C.E., Jeracki R.J., Miller C.J. Fan noise source diagnostic test – far-field acoustic results. *AIAA Paper*, 2002, no. 2002-2427.
4. Khaletskiy Yu.D., Pochkin Ya.S. Fan noise reduction of an aircraft engine by inclining the outlet guide vanes. *Acoustical physics*, 2015, vol. 61, no. 1, pp. 101-108.
5. Akoum M., Ville J.-M. Measurement of the reflection matrix of a discontinuity in a duct. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, vol. 103, no. 5, pp. 2463-2468.
6. Schultz T., Cattafesta L.N., Sheplak M. Comparison of the two-microphone method and a modal decomposition method for acoustic impedance testing. *AIAA Paper*, 2006, no. 2006-2695.
7. Ipatov M.S., Ostroumov M.N., Sobolev A.F. Chetyrekhmikrofonnyy metod opredeleniya impedansa obraztsov zvukopogloshchayushchikh konstruktsey na interferometre pri normalnom padenii zvuka [A four-microphone method for determining the impedance of sound-absorbing liner samples on a normal incidence interferometer]. *Trudy TsAGI*, 2014, iss. 2739, pp. 58-68.
8. Jones M.G., Hoverton B.M., Ayle E. Evaluation of parallel-element, variable-impedance, broadband acoustic liner concepts. *AIAA Paper*, 2012, no. 2012-2194.
9. Howerton B.M., Jones M.G., Buckley J.L. Development and validation of an interactive liner design and impedance modeling tool. *AIAA Paper*, 2012, no. 2012-2197.
10. Howerton B.M., Jones M.G. Acoustic liner drag: a parametric study of conventional configurations. *AIAA Paper*, 2015, no. 2015-2230.
11. Jones M.G., Watson W.R., Nark D.M., Howerton B.M. Evaluation of variable-depth liner configurations for increased broadband noise reduction. *AIAA Paper*, 2015, no. 2015-2697.
12. 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.
13. Fedotov E.S., Kustov O.Yu., Khramtsov I.V., Palchikovskiy V.V. 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.
14. Kustov O.Yu., Lapin I.N., Palchikovskiy V.V. O vliyaniy defektov v obraztsakh zvukopogloshchayushchikhsya konstruktsey na ikh akusticheskie kharakteristiki [On the influence of defects in sound-absorbing liner samples on their acoustic characteristics]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2016, vol. 1, pp. 112-115.
15. Kustov O.Yu., Khramtsov I.V., Fedotov E.S., Palchikovskiy V.V., Siner A.A. Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie raboty interferometra pri vysokikh urovnyakh akusticheskogo davleniya [Computational and experimental study of the interferometer operation at high acoustic pressure levels]. *59-ya Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya MFTI s mezhdunarodnym uchastiem*, 21–26 November, 2016, Moscow, Dolgoprudnyy, Zhukovskiy, available at: http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/2331.pdf (accessed 10 October 2017).

Об авторах

Пальчиковский Вадим Вадимович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: vvpal@bk.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).

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

Черепанов Иван Евгеньевич (Пермь, Россия) – студент ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: cherepanovie@sbiw.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

Vadim V. Palchikovskiy (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: vvpal@bk.ru).

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

Ivan A. Korin (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher, Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: korinvanj@mail.ru).

Ivan E. Cherepanov (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: cherepanovie@sbiw.ru).

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

Получено 10.11.2017