DOI: 10.15593/2224-9982/2020.60.08

УДК 534.833.534

П.В. Писарев, А.Н. Аношкин, К.А. Ахунзянова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ЯЧЕЕК РАЗНЫХ ФОРМ НА НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

В XXI в. идет бурное развитие гражданской авиации и рынка авиаперевозок, являющееся катализатором роста экономики городов и регионов. При этом усиливается негативное воздействие авиации на окружающую среду, особенно на приаэродромных территориях. Экология авиационного транспорта стала второй по актуальности проблемой, выделяемой Международной организацией гражданской авиации, уступая первое место только безопасности полетов. Одной из доминирующих составляющих вредного воздействия авиации на окружающую среду является шум на местности, создаваемый воздушными судами. Международная организация гражданской авиации постоянно ужесточает международные стандарты по шуму самолетов на местности, нормируя его уровень на взлетно-посадочных режимах, заставляя производителей авиационной техники развивать новые технологии снижения авиационного шума. Одной из основных составляющих авиационного шума является шум, генерируемый двигательными установками.

Для успешного решения задач снижения шума авиационного двигателя в заданном частотном диапазоне возникает необходимость проведения комплексных расчетно-экспериментальных исследований по оценке и оптимизации затухания звука в модельных каналах. Кроме того, требуется проведение исследований влияния параметров резонатора Гельмгольца и ЗПК на импеданс с учетом закономерностей акустических механизмов и нелинейных процессов взаимодействий между шумом и стенками канала. На основе исследований необходимо разработать новые эффективные формы, гибридные схемы размещения и размеры резонансных ячеек ЗПК.

Сформулированы физическая и математическая модели прогнозирования эффективных акустических характеристик конусообразных резонаторов на нелинейных режимах работы. Представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований образцов звукопоглощающих конструкций конусообразных форм на интерферометре с нормальным падением звуковой волны при уровне звукового давления 130 дБ. Выявлено, что при совместной работе конусообразных резонаторов не наблюдается эффекта взаимовлияния на нелинейных режимах работы ЗПК. Обнаружено, что сочетание конусообразного и перевернутого конусообразного резонаторов приводит к значительному увеличению широкополосности на нелинейных режимах работы ЗПК. Экспериментально подтверждена акустическая эффективность конусообразных резонаторов. Проведена верификация разработанных моделей.

Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, резонатор Гельмгольца, резонансная частота, конические ячейки, взаимовлияние, акустическая эффективность, нелинейные режимы работы, численное моделирование, эксперимент, интерферометр с нормальным падением звуковой волны.

P.V. Pisarev, A.N. Anoshkin, K.A. Akhunzianova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH OF THE DIFFERENT SHAPES CELLS MUTUAL INFLUENCE IN NON-LINEAR OPERATING MODES

A rapid development of civil aviation and air transportation market is going on in the XXI century, which is a catalyst for the growth of urban and regional economies. At the same time, the negative impact of aviation on the environment is intensifying, especially in the near-aerodrome territories. The ecology of aviation has become the second most important issue highlighted by the International Civil Aviation Organization, giving way to safety only. One of the dominant components of the aviation harmful effects on the environment is the noise created by the aircraft on the ground. The International Civil Aviation Organization is constantly tightening international standards for aircraft noise on the ground, normalizing its level on take-off and landing modes, forcing aircraft manufacturers to develop new aircraft noise reduction technologies. One of the main components of aircraft noise is the noise generated by propulsion systems.

To successfully solve the problems of reducing the aircraft engine noise in a given frequency range, it becomes necessary to conduct complex computational and experimental research to evaluate and optimize sound attenuation in model channels. In addition, it is necessary to research the Helmholtz resonator and SAS parameters effect on the impedance, taking into account the acoustic mechanisms laws and non-linear processes of interactions between the noise and the channel walls. Based on the research, it is necessary to develop new effective forms, hybrid layouts and sizes of the SAS resonant cells.

In the present work, physical and mathematical models were formulated for predicting the effective acoustic characteristics of cone-shaped resonators in non-linear operating modes. The results of computational and experimental research of cone-shaped

sound-absorbing structures samples on an interferometer with a normal sound wave incidence at a sound pressure level of 130 dB are presented. It was revealed that during the joint operation of cone-shaped resonators, the effect of mutual influence on the SAS nonlinear operating modes was not observed. It was found that the combination of a cone-shaped and an inverted cone-shaped resonator leads to a significant increase in broadband in the SAS non-linear operating modes. The acoustic efficiency of cone-shaped resonators was experimentally confirmed. The verification of the developed models was carried out.

Keywords: sound-absorbing structures, Helmholtz resonator, resonant frequency, conical cells, mutual influence, acoustic efficiency, nonlinear operating modes, numerical simulation, experiment, interferometer with normal sound wave incidence.

Введение

В настоящее время экология авиационного транспорта стала второй по актуальности проблемой, выделяемой Международной организацией гражданской авиации (ИКАО), уступая первое место только безопасности полетов. Одной из доминирующих составляющих вредного воздействия авиации на окружающую среду является шум на местности, создаваемый воздушными судами. Одним из наиболее эффективных способов снижения шума авиационных двигательных установок является включение в ее состав звукопоглощающих конструкций (ЗПК) [1]. ЗПК представляют собой совокупность резонаторов Гельмгольца, выполненных в виде сотовой конструкции из полимерных композиционных материалов.

Принцип действия резонаторных ЗПК базируется на эффектах поглощения (диссипация) и отражения набегающей звуковой волны резонатором. В первом случае падающая волна возбуждает колебания воздуха в горле резонатора, приводя к поглощению (переходу энергии в поступательные степени свободы) [2–4]. Во втором случае волна, входящая в резонатор, за счет двойного прохода в нем изменяет свою фазу на обратную и, складываясь с излучаемой источником первичной волной, гасит последнюю [4, 5].

При совместной работе нескольких близкорасположенных резонаторов происходит взаимодействие (компенсация) волн, сгенерированных соседними резонаторами, что приводит к значительному снижению акустической эффективности группы [6–9].

Для снижения или полного исключения взаимовлияния необходимо провести исследование эффекта резонансного взаимодействия близкорасположенных ячеек на основе численного моделирования акустических процессов в канале и ячейках с варьированием

геометрической формы и их взаимного расположения вдоль канала [5].

В рамках настоящей работы предложены новые подходы и методы снижения шума в каналах при использовании новых типов резонаторных ячеек. Исследуются процессы взаимодействия акустических волн, распространяемых в канале с нормальным падением звуковой волны, с волнами, генерируемыми резонансными ячейками. Исследуется влияние форм и комбинаций ячеек на эффективность снижения интенсивности акустических волн в модельных каналах на нелинейных режимах работы ЗПК (130 дБ) в диапазоне частот 500–3000 Гц.

Численная модель

Для проведения вычислительных экспериментов по исследованию акустической эффективности резонаторов были построены геометрические модели группы А и Б (рис. 1, 2). Модели группы А содержат пары конусообразных резонаторов, модели группы Б – единственный конусообразный (Б1) и перевернутый конусообразный (Б2) резонаторы. Модель А1 содержит два близкорасположенных конусообразных резонатора, модель А2 – два близкорасположенных перевернутых конусообразных резонатора, модель А3 – сочетание конусообразного и перевернутого конусообразного резонатора. Все геометрические модели содержат свободный объем интерферометра длиной 150 мм. Для всех ячеек задавался одинаковый свободный внутренний объем и одинаковые характеристики перфорации.

В рамках вычислительных экспериментов осуществлялся расчет акустической эффективности конусообразных резонаторов в диапазоне рабочих частот 500–3000 Гц при уровне звукового давления 130 дБ.

Для решения поставленной задачи сформулирована математическая модель, описывающая нелинейные процессы взаимодействия звуковых волн между собой, со стенками

Рис. 1. Геометрические модели группы А:

a – с парой конусообразных резонаторов (А1); *б* – с парой перевернутых конусообразных резонаторов (А2); *в* – с парой конусообразного и перевернутого конусообразного резонаторов (А3)

Рис. 2. Геометрические модели группы Б:

a – конусообразный резонатор (Б1); *б* – перевернутый конусообразный резонатор (Б2)

канала, резонаторов конусообразной формы, работающих на нелинейных режимах. Математическая постановка включает в себя следующие соотношения:

1) система нелинейных уравнений Навье – Стокса для вязкого теплопроводного газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \tau; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) &= \nabla \cdot (\chi \nabla T + \tau \vec{v}); \end{aligned} \quad (1)$$

2) тензор вязких напряжений определяется выражением

$$\tau = \eta \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right]; \quad (2)$$

3) полная энергия имеет вид

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}, \quad (3)$$

где ρ – плотность; $\vec{v}$ – вектор скорости; p – давление; T – температура; h – энтальпия; η – молекулярная вязкость; χ – теплопроводность; I – единичный вектор. Для замыкания системы уравнений (1)–(3) используется уравнение состояния совершенного газа.

$$\rho = (p_{\text{оп}} + p) / \left(\frac{R_0}{M_w} T \right),$$

где $p_{\text{оп}}$ – опорное давление; R_0 – универсальная газовая постоянная; M_w – молярная масса.

Для лучшей сходимости решения и снижения погрешностей получаемых результатов применялась расчетная сетка, ячейки которой имеют форму, близкую к форме треугольной призмы. Сетка адаптировалась в области горла резонатора так, чтобы по высоте горла было 20 ячеек. При удалении от горла происходило увеличение линейных размеров элемента до достижения среднего линейного размера 2 мм. Дополнительно использовалось сгущение на стенке из 20 слоев с коэффициентом роста 1,2. В результате была получена расчетная сетка из 120 014 элементов. Помимо прочего, при измельчении сетки избегали резких отличий геометрических размеров соседних ячеек – линейные размеры соседних ячеек не отличаются более чем в 2 раза.

В качестве граничных условий при проведении численного исследования на входе задавался сигнал, имитирующий белый шум в диапазоне частот от 500 до 3000 Гц.

Для вычисления импеданса методом передаточной функции [10] в контрольных точках расчетной области осуществлялась запись звукового давления. Контрольные точки размещались на расстоянии 38 и 58 мм от поверхности ЗПК, что соответствует положению микрофонов в интерферометре при проведении лабораторного эксперимента. Схема размещения контрольных точек представлена на рис. 3.

По результатам вычислительных экспериментов были получены зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты (рис. 4).

Рис. 3. Схема размещения контрольных точек

Рис. 4. Графики зависимости акустической эффективности от собственной частоты единичных резонаторов и пары резонаторов:

- единичный конусообразный резонатор;
- единичный перевернутый конусообразный резонатор;
- пара конусообразных резонаторов;
- пара перевернутых конусообразных резонаторов

Сравнительный анализ полученных зависимостей выявил, что единичный конусообразный резонатор акустически эффективнее единичного перевернутого конусообразного резонатора. Коэффициент звукопоглощения единичного конусообразного резонатора выше, чем у единичного перевернутого конусообразного резонатора, на 9 %. Вместе с тем широкополосность единично перевернутого конусообразного резонатора больше, чем широкополосность единичного конусообразного резонатора. Диапазон рабочих частот для единичного конусообразного резонатора составил 1150–1450 Гц, для единичного перевернутого конусообразного резонатора – 1310–1850 Гц при значении коэффициента звукопоглощения 0,4.

Выявлено, что для конусообразных и перевернутых конусообразных резонаторов не наблюдается эффекта взаимовлияния на нелинейных режимах работы. Коэффициент звукопоглощения модели Б1 составил 0,87 при резонансной частоте 1290 Гц, тогда как коэф-

фициент звукопоглощения модели А1 составил 0,98 при резонансной частоте 1290 Гц. Коэффициент звукопоглощения модели Б2 – 0,79 при резонансной частоте 1500 Гц, тогда как коэффициент звукопоглощения модели А2 составил 0,97 при резонансной частоте 1520 Гц. Сравнительный анализ единичных и парных конусообразных резонаторов выявил, что эффективность пары конусообразных резонаторов повышается на 12 %, а пары перевернутых конусообразных резонаторов повышается на 18 %.

Анализ результатов, полученных с использованием моделей группы А, выявил, что акустическая эффективность пары конусообразного и перевернутого конусообразного резонаторов ниже, чем пары резонаторов с одинаковой формой. Однако обнаружено, что сочетание конусообразного и перевернутого конусообразного резонаторов приводит к увеличению широкополосности группы резонаторов при нелинейном режиме работы ЗПК. Диапазон рабочих частот сочетания конусо-

образного и перевернутого конусообразного резонаторов составил 1110–1710 Гц, для пары конусообразных резонаторов – 1100–1450 Гц, для пары перевернутых конусообразных резонаторов – 1210–1810 Гц при значении коэффициента звукопоглощения 0,4.

Экспериментальное определение акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций

В рамках верификации численной модели проводилось сравнение результатов вычислительных экспериментов с результатами лабораторных испытаний, проведенных на интерферометре с нормальным падением звуковой волны на нелинейных режимах работы ЗПК (130 дБ).

Проведение акустических испытаний в интерферометре с нормальным падением звуковых волн широко распространено в связи с относительной простотой реализации эксперимента. Экспериментальная установка представляет собой трубу круглого сечения, на одном конце которой располагается образец ЗПК, на другом – динамик, который облучает образец акустическими волнами (рис. 5). Также на некотором расстоянии от образца ЗПК в канале интерферометра заподлицо со стенкой установлены микрофоны, которые записывают акустическое давление падающих и отраженных волн во времени (рис. 6). Далее записанное давление обрабатывается по алгоритму быстрого преобразования Фурье, в результате которого вычисляется импеданс образца ЗПК.

Импеданс связывает между собой давление и нормальную скорость на границе, акустические свойства которой он характеризует. В большинстве работ влияние высоких уровней звукового давления падающей волны описывается через скорость движения частиц среды в отверстии [11–15]. Основой большинства полуэмпирических моделей служат работы Крэндалла и Меллинга. В работе Крэндалла [15] приводится выражение для импеданса круглого отверстия, а в работе Меллинга [16] исследуется влияние высоких уровней звукового давления, которое приводит к нелинейному поведению ЗПК.

Рис. 5. Укомплектованный и готовый к работе интерферометр со следующими характеристиками: звуковое давление до 160 дБ; частотный диапазон 500–6400 Гц; размер испытываемого образца 30 мм

Рис. 6. Внутренний канал интерферометра:
1 – динамик; 2 – шайба, фиксирующая образец;
3 – образец ЗПК; 4 – шток; 5 – направляющая втулка

Согласно определению, безразмерный удельный акустический импеданс выражается в виде соотношения

$$Z = X + iY = \frac{p}{\rho c u_n}, \quad (4)$$

где p – акустическое давление; ρ – плотность воздуха; c – скорость звука в воздухе; u_n – акустическая скорость.

Несмотря на кажущуюся простоту выражения (4), определение импеданса звукопоглощающей конструкции на практике является сложной задачей. На сегодняшний день предпочтение отдают экспериментальному определению импеданса того или иного образца ЗПК.

Обычно для измерений используют два микрофона, поскольку применяемый для определения импеданса «метод передаточной функции» получается наиболее простым для вычислений. В то же время этот вариант можно реализовать при наличии в канале только поршневой моды, что ведет к зависимости частотного диапазона установки от размеров канала импедансной трубы.

Верификация проводилась на образцах моделей Б1 и Б2. Для проведения лаборатор-

ных экспериментов были изготовлены образцы ЗПК методом 3D-печати, которые представляют собой цилиндрические образцы диаметром 30 мм (рис. 7).

По результатам экспериментальных исследований были получены зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты (рис. 8).

Рис. 7. Образцы ЗПК после печати:
а – модель Б1; б – модель Б2

Рис. 8. График зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты:
— единичный конусообразный резонатор;
— единичный перевернутый конусообразный резонатор

Сравнительный анализ результатов численных расчетов с результатами лабораторных испытаний выявил, что для модели Б1 расхождение по коэффициенту звукопоглощения не превышает 8 %, для модели Б2 – 7,5 %. Погрешность результатов обусловлена

отличием геометрических размеров образцов, напечатанных с помощью аддитивных технологий, что может быть связано с усадкой материала.

Заключение

В рамках настоящей работы было исследовано влияние форм и комбинаций ячеек на эффективность снижения интенсивности акустических волн в модельных каналах на нелинейных режимах работы ЗПК (130 дБ) в диапазоне частот 500–3000 Гц.

По результатам вычислительных экспериментов выявлено, что для конусообразных резонаторов при нелинейном режиме работы ЗПК не наблюдается значительного эффекта взаимовлияния.

Обнаружено, что сочетание конусообразного и перевернутого конусообразного резонаторов приводит к значительному увеличению широкополосности на нелинейных режимах работы ЗПК.

Сравнительный анализ результатов численных расчетов с результатами лабораторных испытаний выявил, что расхождение по коэффициенту звукопоглощения для рассматриваемых ячеек ЗПК не превышает 8 %. Экспериментально подтверждена акустическая эффективность конусообразных резонаторов на нелинейных режимах работы ЗПК.

На следующих этапах работы планируется провести расчетно-экспериментальные исследования эффекта взаимовлияния ячеек ЗПК различной формы в интерферометре с касательным падением звуковой волны при наличии потока.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 18-79-00295.

Библиографический список

1. Акустические резонансные характеристики двух- и трехслойных сотовых звукопоглощающих панелей / А.Г. Захаров, А.Н. Аношкин, А.А. Паньков, П.В. Писарев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 46. – С. 144–159.
2. Numerical and experimental studies of resonant multilayer sound-absorbing structures / A.N. Anoshkin, A.G. Zakharov, N.A. Gorodkova, V.A. Chursin // PNIPU Mechanics Bulletin. – 2015. – Vol. 1. – P. 5–20.
3. Pisarev P.V., Anoshkin A.N., Pankov A.A. Acoustic resonance in the cylindrical two-chamber cell with the elastic permeable membrane // ISJ Theoretical and Applied Science. – 2016. – Vol. 44, iss. 12. – P. 55–61.

4. Бакланов В.С., Постнов С.С., Постнова Е.А. Расчет резонансных звукопоглощающих конструкций для современных авиационных двигателей // Математическое моделирование. – 2007. – Т. 19, № 8. – С. 22–30.
5. Pisarev P.V., Anoshkin A.N., Pankov A.A. Effect of neck geometry of resonance cells on noise reduction efficiency in soundabsorbing structures // AIP Conf. Proceed. – 2016. – Vol. 1770. – Art. 030119. – P. 8.
6. Pisarev P.V., Anoshkin A.N. Numerical study of the acoustic efficiency of a group of Helmholtz resonators of various configurations // MATEC Web of Conf. – 2018. – Vol. 243. – Art. 00018. – P. 6.
7. A Comparative study between different helmholtz resonator systems / Md.A. Mahmud, Md.Z. Hossain, Md.S. Islam, M.M.M. Morshed // Acoustique Canadienne. – 2016. – Vol. 44, iss. 4. – P. 12–17.
8. Kim H., Selamet A. Effect of flow on a dual Helmholtz resonator // J. of Mech. Sci. and Techn. – 2020. – Vol. 34. – P. 581–588.
9. Noise attenuation by two one degree of freedom helmholtz resonators / Md.A. Mahmud, Md.Z. Hossain, Md.S. Islam, M.M.M. Morshed // Global Sci. and Techn. J. – 2015. – Vol. 3, no. 1. – P. 1–9.
10. Ипатов М.С., Остроумов М.Н., Соболев А.Ф. Определение импеданса образцов ЗПК на интерферометре при нормальном падении звука в расширенной области частот // Тр. 1-й Всерос. конф. по акустике, г. Москва, 6–9 октября 2014 г. – М., 2014. – С. 58–68.
11. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // Акустический журнал. – 2007. – № 53, вып. 6. – С. 861–872.
12. Elnady T., Boden H. On the modeling of the acoustic impedance of perforates with flow // AIAA Paper. – 2003. – № 2003–3304. – С. 1815–1825.
13. Yu J., Ruizand M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data // AIAAPaper. – 2008. – № 2008–2930. – 10 p.
14. Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев В.Е. Аэродинамические источники шума. – М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.
15. Crandall I. Theory of vibrating systems and sound. – New York: D. Van Nostrand & Co. Inc., 1927. – 272 p.
16. Melling T. The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels // J. of Sound and Vibration. – 1973. – Vol. 29, iss. 1. – P. 1–65.

References

1. A.G. Zakharov, A.N. Anoshkin, A.A. Pankov, P.V. Pisarev. Akusticheskiye rezonansnyye kharakteristiki dvukh- i trekhsloynnykh sotovykh zvukopogloshchayushchikh paneley [Acoustic resonant characteristics of two- and three-layered cellular sound absorbing panels]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2016, no. 46, pp. 144–159.
2. A.N. Anoshkin, A.G. Zakharov, N.A. Gorodkova, V.A. Chursin. Numerical and experimental studies of resonant multilayer sound-absorbing structures. PNRPU Mechanics Bulletin, 2015, vol. 1, pp. 5–20.
3. Pisarev P.V., Anoshkin A.N., Pankov A.A. Acoustic resonance in the cylindrical two-chamber cell with the elastic permeable membrane. ISJ Theoretical and Applied Science, 2016, vol. 44, iss. 12, pp. 55–61.
4. Baklanov V.S., Postnov S.S., Postnova E.A. Raschet rezonansnykh zvukopogloshchayushchikh konstruktсий dlya sovremennykh aviatsionnykh dvigateley [Numerical calculation of sound absorbing structures for modern aircraft engines]. Matematicheskoe modelirovanie, 2007, Vol. 19, no. 8, pp. 22–30.
5. Pisarev P.V., Anoshkin A.N., Pankov A.A. Effect of neck geometry of resonance cells on noise reduction efficiency in soundabsorbing structures. AIP Conference Proceedings [Electronic resource], 2016, vol. 1770, art.030119, 8 p.
6. Pisarev P.V., Anoshkin A.N. Numerical study of the acoustic efficiency of a group of Helmholtz resonators of various configurations. MATEC Web of Conferences [Electronic resource], 2018, vol. 243, art. 00018, 6 p.
7. Mahmud Md.A., Hossain Md.Z., Islam S., Morshed M.M.M. A Comparative Study between Different Helmholtz Resonator Systems. Acoustique Canadienne, 2016, vol. 44, iss. 4, pp. 12–17.
8. Kim H., Selamet A. Effect of flow on a dual Helmholtz resonator. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, vol. 34, pp. 581–588.
9. Mahmud Md. A., Hossain Md. Z., Islam Md. S., Morshed Mir Md.M. Noise Attenuation by Two One Degree of Freedom Helmholtz Resonators. Global Science and Technology Journal, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 1–9.
10. Ipatov M.S., Ostroumov M.N., Sobolev A.F. Opredeleniye impedansa obrastsov ZPK na interferometre pri normal'nom padenii zvuka v rasshirennoy oblasti chastot [A fourmicrophonemethod for determining the

impedance of sound-absorbing liner samples on an normal incidenceinterferometer]. *Trudy TsAGI*, 2014, iss. 2739, pp. 58-68

11. Sobolev A.F. Poluempiricheskaya teoriya odnosloynnykh sotovykh zvukopogloshchayushchikh konstruksiy s litsevoy perforirovannoy panelyu [A semiempirical theory of a one-layer cellularsound-absorbing lining with a perforated face panel]. *Akusticheskij zhurnal*, 2007, vol. 53, no. 6, pp. 861-872

12. Elnady T., Boden H. On the modeling of the acoustic impedance of perforates with flow. *AIAA Paper*, 2003, art. no. 2003–3304, pp. 1815–1825.

13. Yu J., Ruizand M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data. *AIAA Paper*, 2008, art. no. 2008–2930, 10 p.

14. Munin A.G., Kuznetsov V.M., Leontyev V.E. Aerodinamicheskiye istochniki shuma [Aerodynamic noise sources]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981, 248 p.

15. Crandall I. Theory of vibrating systems and sound. New York: D. Van Nostrand & Co. Inc., 1927, 272 p.

16. Melling T. The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels. *Journal of Sound and Vibration*, 1973, vol. 29, iss. 1, pp. 1-65.

Об авторах

Писарев Павел Викторович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: pisarev85@live.ru).

Аношкин Александр Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: aan-02@yandex.ru).

Ахунзянова Карина Алексеевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: karina-maksimova0402@yandex.ru).

About the authors

Pavel V. Pisarev (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Mechanics of Composite Materials and Structures Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: pisarev85@live.ru).

Alexander N. Anoshkin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Mechanics of Composite Materials and Structures Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: aan-02@yandex.ru).

Karina A. Akhunzianova (Perm, Russian Federation) – PhD Student of Mechanics of Composite Materials and Structures Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: karina-maksimova0402@yandex.ru).

Получено 02.03.2020