DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.08

УДК 534.286:534.283.2

А.Г. Захаров¹, А.Н. Аношкин², А.А. Паньков², П.В. Писарев²

¹ Пермский завод “Машиностроитель”, Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

АКУСТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХ- И ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ПАНЕЛЕЙ

Проведено математическое и физическое моделирование резонансных и звукопоглощающих акустических характеристик двух- и трехслойных сотовых панелей с целью повышения эффективности звукоглушения в конструкциях современных авиационных двигателей. Показано существенное расширение полосы звукопоглощения панели при увеличении числа слоев сотовых ячеек на примере экспериментального определения коэффициентов звукопоглощения одно-, двух- и трехслойных сотовых панелей. Разработана методика выбора геометрических параметров двухслойных звукопоглощающих сотовых панелей на основе многопараметрической математической модели расчета их резонансных частот. Рассмотрено решение обратной задачи по нахождению соответствующих значений геометрических параметров двухслойных звукопоглощающих сотовых панелей для заданного частотного диапазона звукоглушения и некоторых оптимальных значений обеих резонансных частот внутри рабочего диапазона. Отмечена важность попадания как можно большего числа резонансных частот проектируемых сотовых панелей внутрь рабочего диапазона звукопоглощения. Определены области допустимых значений параметров ячеек сотовых панелей для заданного рабочего частотного диапазона звукоглушения. Сравнение аналитических решений с экспериментальными данными подтвердило достоверность и хорошую точность результатов математического моделирования.

Ключевые слова: сотовая панель, ячейка Гельмгольца, резонансная частота, звукопоглощение, математическая модель.

A.G. Zakharov¹, A.N. Anoshkin², A.A. Pan'kov², P.V. Pisarev²

¹ Perm Plant “Mashinostroitel”, Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ACOUSTIC RESONANT CHARACTERISTICS OF TWO- AND THREE-LAYERED CELLULAR SOUND ABSORBING PANELS

Mathematical and physical modeling of resonant and sound-attenuating acoustic characteristics of two- and three-layered cellular panels for the purpose of increase of sound suppression efficiency in designs of modern aviation engines is carried out. Essential expansion of a range of sound absorption of the panel at increase in number of layers of cellular cells on the example of experimental determina-

tion of sound absorption coefficients of one- two- and three-layer cellular panels is shown. The technique of the choice of geometrical parameters of two-layer sound-attenuating cellular panels based on multiparameter mathematical model of calculation of their resonant frequencies is developed. The solution of the inverse problem of finding the corresponding values of geometrical parameters of two-layer sound-absorbing cellular panels for the set frequency range of sound suppression and some optimum values of both resonant frequencies in working range is considered. It is noted importance of hit as much as possible number of resonant frequencies of the designed cellular panels in the working range of sound-absorbing. Acceptable region of parameters of cells of cellular panels for the set working frequency range of sound suppression is determined. Comparison of analytical solutions with experimental data corroborates reliability and good accuracy of results of mathematical modeling.

Keywords: cellular panel, Helmholtz's cell, resonant frequency, sound absorption, mathematical model.

Введение

Задача акустического совершенствования авиационных двигателей становится всё более актуальной, так как акустические характеристики являются важнейшими показателями конкурентоспособности самолетов [1–3], поэтому современные звукопоглощающие конструкции являются предметом исследований многих отечественных и зарубежных ученых¹ [1–14]. Перспективным путем решения данной задачи является использование резонансных звукопоглощающих сотовых панелей, устанавливаемых в канале воздухозаборника и во внешнем контуре двигателя [3–5]. Принцип действия звукопоглощающих сотовых панелей основан на эффекте поглощения и рассеяния излучения отдельными резонансными ячейками. Эффективность работы резонансной ячейки ограничена узким спектром частот в окрестности одной резонансной частоты ячейки, поэтому актуальной является разработка систем взаимодействующих резонансных ячеек с эффективным звукоглушением в широком диапазоне рабочих частот.

Таким образом, целью работы является повышение эффективности звукоглушения в конструкциях современных авиационных двигателей на основе математического моделирования резонансных акустических характеристик двухслойных звукопоглощающих сотовых панелей.

Экспериментальное определение коэффициента звукопоглощения одно-, двух- и трехслойных сотовых панелей

На рис. 1–3 приведены результаты экспериментального определения [11] коэффициентов звукопоглощения α одно-, двух- и трех-

¹ Pat. US5041323 A United States of America, Rohr Industries, Inc. / Rose P.M., Yu Jia. No. US 07 / 426.764, appl. 10.26.1989, publ. 20.08.1991.

слойной сотовых звукопоглощающих панелей с параметрами: высота камер H_i ; относительная площадь перфораций p_i и толщина t_i перфорированных несущих слоев двухслойной ($i = \overline{1, 2}$) и трехслойной ($i = \overline{1, 3}$) сотовых панелей, нумерация начинается от неперфорированного (без нумерации) несущего слоя.

Рис. 1. Коэффициент звукопоглощения однослойной сотовой панели с параметрами: $H = 10$ мм, $p = 0,05$, $t = 1$ мм для $L = 150$ дБ (1), 140 дБ (2), 130 дБ (3)

Рис. 2. Коэффициент звукопоглощения двухслойной сотовой панели с параметрами: $H_1 = 10$ мм, $p_1 = 0,03$; $H_2 = 15$ мм, $p_2 = 0,08$; $t_1 = 1$ мм, $t_2 = 1$ мм для $L = 150$ дБ (1), 140 дБ (2), 130 дБ (3)

Рис. 3. Коэффициент звукопоглощения для трехслойной сотовой панели с параметрами: $H_1 = 10$ мм, $p_1 = 0,02$; $H_2 = 10$ мм, $p_2 = 0,05$; $H_3 = 10$ мм, $p_3 = 0,12$; $t_1 = 1$ мм, $t_2 = 1$ мм, $t_3 = 1$ мм для $L = 155$ дБ (1), 150 дБ (2), 140 дБ (3)

Коэффициент звукопоглощения зависит не только от геометрических параметров сотовой панели, но и от частоты f и уровня звукового давления L ; при возрастании уровня звукового давления увеличиваются значения коэффициентов звукопоглощения при незначительном изменении резонансных частот одно- и двухслойной сотовых панелей (см. рис. 1, 2). Графики на рис. 1–3 наглядно показывают существенное расширение полосы звукопоглощения при увеличении числа слоев ячеек в звукопоглощающих панелях. Отметим, что случай наличия потока у внешнего перфорированного слоя панели и его влияние на значения коэффициентов звукопоглощения и резонансные частоты здесь не рассматривался.

Математическая модель расчета резонансных акустических характеристик двух- и трехслойных звукопоглощающих сотовых конструкций

Резонансную частоту однослойной сотовой панели можно найти как экспериментально (см. рис. 1), так и по известной формуле Гельмгольца

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s_0}{hSH}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{hH}}, \quad (1)$$

где c – скорость звука в воздухе; s_0 , S – площади поперечных сечений горла и камеры соответственно; H – высота камеры; «эффективная

длина» горла h связана с толщиной перфорированного слоя t неравенством $h > t$ и зависит от геометрических параметров горла и камеры ячейки [10]; p – относительная площадь перфорации ячейки, $p = s_0/S$. Эффективную длину горла $h \approx 1,8t$ можно найти, в частности, из приравнивания результатов расчета резонансной частоты (1) к определенному из эксперимента значению (см. рис. 1). Расчет резонансных частот двух- и трехслойных звукопоглощающих панелей можно провести на основе акустомеханической аналогии [11].

Искомые резонансные частоты f_1, f_2 двухслойных звукопоглощающих сотовых панелей будут корнями > 0 биквадратного уравнения

$$f^4 - f^2(f_{11}^2 + f_{22}^2 + f_{12}^2) + f_{11}^2 f_{22}^2 = 0, \quad (2)$$

где коэффициенты f_{11}, f_{22}, f_{12} рассчитываем по формуле Гельмгольца (1)

$$f_{ij} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p_i}{h_i H_j}}. \quad (3)$$

Индексы $i, j = \overline{1, 2}$, первый индекс у коэффициентов f_{ij} в уравнениях (2), (3) относится к перфорации i -го перфорированного несущего слоя, а второй – к глубине камер j -го слоя ячеек, отсчет слоев начинается от жесткой неперфорированной нижней стенки. Отметим, что аналогично уравнению (2) искомые резонансные частоты f_1, f_2, f_3 трехслойных звукопоглощающих сотовых панелей будут корнями > 0 бикубического уравнения

$$\begin{aligned} f^6 - f^4(f_{11}^2 + f_{22}^2 + f_{33}^2 + f_{12}^2 + f_{23}^2) + \\ + f^2(f_{11}^2 f_{22}^2 + f_{11}^2 f_{33}^2 + f_{22}^2 f_{33}^2 + \\ + f_{11}^2 f_{23}^2 + f_{33}^2 f_{12}^2 + f_{12}^2 f_{23}^2) - f_{11}^2 f_{22}^2 f_{33}^2 = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где коэффициенты f_{ij} рассчитываются по формуле (3), индексы $i, j = \overline{1, 3}$. Отметим, что наличие корней $\pm f_{1,2}, \pm f_{1,2,3}$ соответствующим

щих уравнений (2), (4) определяется условиями, накладываемыми на коэффициенты этих уравнений, например дискриминант ≥ 0 для биквадратного уравнения (2). Таким образом, многослойные резонансные звукопоглощающие панели с расширенной полосой звукопоглощения (см. рис. 2, 3) можно рассчитывать по формулам (2), (4) с использованием вспомогательных резонансных частот f_{ij} однокамерных ячеек, найденных экспериментально (см. рис. 1) или с использованием формулы Гельмгольца (1), (3).

Ранее было показано [11], что резонансные частоты, найденные из решения уравнений (2), (4) с использованием полученных экспериментально на интерферометре вспомогательных резонансных частот f_{ij} однокамерных ячеек, близки к экспериментальным значениям резонансных частот для двух- и трехслойной сотовых панелей, например: для образца с параметрами $H_1 = 10$ мм, $p_1 = 0,03$, $H_2 = 15$ мм, $p_2 = 0,08$ расчетные резонансные частоты $f_1 = 1619$ Гц, $f_2 = 3565$ Гц, а измеренные в эксперименте $f_1 = 1572$ Гц, $f_2 = 3576$ Гц. Погрешность составляет 3 и 0,3 % соответственно; для трехслойной звукопоглощающей сотовой панели погрешность менее 3 %.

Численный расчет двухслойных звукопоглощающих сотовых панелей

На рис. 4–7 представлены результаты расчета зависимостей резонансных частот двухслойной звукопоглощающей сотовой панели при постоянном значении общей высоты камер $H = H_1 + H_2 = 20$ мм от различных геометрических параметров перфорированных ячеек: отношения $q_H = H_1/H_2$, высот камер ячеек (рис. 4)

$$H_1 = q_H H_2, \quad H_2 = H / (1 + q_H), \quad (5)$$

отношения эффективных длин каналов перфораций $q_h = h_1/h_2$ (рис. 5), относительной площади перфорации p_1 внутреннего перфорированного слоя (рис. 6), относительной площади перфорации $p \equiv p_1 = p_2$ внутреннего и наружного слоев (рис. 7), где величины перфорации $p_{1,2} = S_{1,2}/S$ и суммарная эффективная длина $h = h_1 + h_2 = 2$ мм каналов перфораций несущих слоев.

Рис. 4. Двухкамерные ячейки для случая $q_H < 1$ (а), $q_H > 1$ (б) и резонансные частоты двухслойной панели в зависимости от отношения высот камер q_H (в) при значениях величин перфораций $p_1 = p_2 = 0,03$, эффективных длин каналов перфораций $h_1 = h_2 = 1$ мм ($\circ$) и при удвоенных значениях параметров: $p_1 = p_2 = 0,06$ ($h = 1$ мм) (Δ), $h_1 = h_2 = 2$ мм ($p = 0,03$) ($\square$)

Рис. 5. Резонансные частоты двухслойной панели в зависимости от отношения эффективных длин каналов перфораций $q_h = h_1/h_2$ при постоянном значении суммарной длины $h = 2$ мм, взаимнообратные отношения высот камер $q_H = 0,4$ ($\circ$), $q_H = 2,5$ (Δ), относительная площадь перфорации $p = 0,03$

Рис. 6. Резонансные частоты двухслойной панели в зависимости от относительной площади перфорации p_1 внутреннего перфорированного слоя; для наружного перфорированного слоя $p_2 = 0,08$ (Δ , $\blacktriangle$), $p_2 = 0,03$ ($\square$, $\blacksquare$); взаимные отношения высот камер $q_H = 0,4$ (Δ , $\square$), $q_H = 2,5$ ($\blacktriangle$, $\blacksquare$); эффективные длины каналов перфораций $h_1 = h_2 = 1$ мм

Рис. 7. Резонансные частоты двухслойной панели в зависимости от относительной площади перфорации $p \equiv p_1 = p_2$ внутреннего и наружного слоев; взаимные отношения высот камер $q_H = 1$ ($\circ$), $q_H = 0,8$ (Δ), $q_H = 1,25$ ($\blacktriangle$), $q_H = 0,4$ ($\square$), $q_H = 2,5$ ($\blacksquare$); эффективные длины перфораций $h_1 = h_2 = 1$ мм (а), $h_1 = h_2 = 0,3$ мм (б)

Прямоугольная рамка на рис. 4–7 указывает диапазоны рабочих частот шума авиадвигателя и геометрических параметров перфорированных ячеек. Для заданного диапазона рабочих частот шума авиадвигателя параметры ячеек необходимо подбирать из конструктивно допустимых значений так, чтобы в «рамку» попадали обе резонансные частоты рассматриваемой двухслойной звукопоглощающей сотовой панели для расширения полосы звукопоглощения с учетом экспериментальных «двухгорбых» зависимостей коэффициента звукопоглощения α таких панелей (см. рис. 2). Отметим, что аналогично могут быть учтены дополнительные условия или ограничения, накладываемые на значения параметров ячеек сотовой панели, в частности известное условие $2\pi fH/c < 1$ «применимости» формулы (1) для одиночной ячейки Гельмгольца.

Решение обратной задачи. Пусть для заданного частотного диапазона звукоглушения $(f_{\min}, f_{\max})$ заданы некоторые оптимальные значения обеих резонансных частот $f_{1,2}$ внутри рабочего диапазона

$$f_{\min} \leq f_{1,2} \leq f_{\max}, \quad (6)$$

например в виде

$$f_{1,2} = f_{\min, \max} \pm \frac{f_{\max} - f_{\min}}{3}, \quad (7)$$

рассмотрим решение «обратной» задачи по нахождению соответствующих значений геометрических параметров двухслойных звукопоглощающих сотовых панелей.

Эти резонансные частоты $f_{1,2}$ являются корнями уравнения (2), поэтому по теореме Виета имеем систему уравнений

$$\begin{cases} f_1^2 f_2^2 = f_{11}^2 f_{22}^2, \\ f_1^2 + f_2^2 = f_{11}^2 + f_{22}^2 + f_{12}^2, \end{cases} \quad (8)$$

от которой перейдем к соответствующей системе

$$\begin{cases} q_H^2 + \left(2 - \frac{\eta_1 \eta_2}{a_1 a_2}\right) q_H + 1 = 0, \\ (a_1 + a_2) q_H^2 + (2a_1 + a_2 - \eta H) q_H + a_1 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

относительно искомого значения коэффициента q_H при фиксированной общей высоте обеих камер H , где

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{p_1}{h_1}, \quad a_2 = \frac{p_2}{h_2}, \\ \eta_1 &= H \left(\frac{2\pi}{c} f_1 \right)^2, \quad \eta_2 = H \left(\frac{2\pi}{c} f_2 \right)^2, \\ \eta &= \eta_1 + \eta_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Условие ≥ 0 для дискриминантов обоих уравнений (9) приводит к системе неравенств

$$\begin{cases} a_1 \leq \frac{\eta_1 \eta_2}{4a_2}, \\ a_1 \leq \frac{(a_2 - \eta)^2}{4\eta}, \end{cases} \quad (11)$$

решение которой определяет область допустимых значений величин $a_1 = p_1/h_1$, $a_2 = p_2/h_2$ с учетом заданных интервалов

$$p_1/h_1 \in (\alpha_{1\min}, \alpha_{1\max}), \quad p_2/h_2 \in (\alpha_{2\min}, \alpha_{2\max}), \quad (12)$$

где численные значения границ интервалов

$$\alpha_{1\min} = \alpha_{2\min} = p_{\min}/h_{\max} = 5 \text{ м}^{-1}, \quad \alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = p_{\max}/h_{\min} = 500 \text{ м}^{-1} \quad (13)$$

с учетом принятых ранее значений границ для величины $p \in (0,01; 0,15)$ и эффективной длины $h \in (0,3; 2)$ мм перфораций несущих слоев, постоянного значения суммарной высоты камер ячеек $H = 20$ мм, заданного рабочего частотного диапазона звукоглушения $f \in (2; 5)$ кГц и соответствующих ему, согласно формулам (6), (7), значений резонансных частот $f_1 = 3$ кГц, $f_2 = 4$ кГц.

Далее для выбранных из области допустимых (12), (13) численных значений величин $a_1 \equiv p_1/h_1$, $a_2 \equiv p_2/h_2$ находим из решения системы (9) значение параметра

$$q_H = \frac{a_2}{2a_1 + a_2 - \eta - (a_1 + a_2) \left(2 - \frac{\eta_1 \eta_2}{a_1 a_2} \right)}, \quad (14)$$

отношения высот камер ячеек $q_H = H_1/H_2$ (5) с учетом формул (10) и принятых допустимых значений $q_H \in (0,1; 10)$; решение (14) получено из условия, что квадратные уравнения в системе (9) имеют один общий корень.

Область допустимых значений геометрических параметров $a_1 \equiv p_1/h_1$, $a_2 \equiv p_2/h_2$ ячеек на рис. 8 определена из решения системы неравенств (11) для заданного рабочего частотного диапазона звукоглушения $f \in (2; 5)$ кГц (см. рис. 2) с требуемыми значениями резонансных частот $f_1 = 3$ кГц, $f_2 = 4$ кГц внутри рабочего интервала; также на рис. 8 – границы решений первого ($\diamond$) и второго ($\square$) неравенств системы (11), случай одинаковых $p_1/h_1 \equiv p_2/h_2$ перфораций несущих слоев обозначен (Δ). Значения этих $a_{1,2}$ параметров: $a_1^* = 16, (6)$, $a_2^* = 44, (4)$ ($\bullet$) для физической модели в экспериментальных исследованиях на рис. 2 лежат внутри области допустимых значений на рис. 8 с учетом эффективной длины перфораций $h_i \approx 1,8t_i$ ячеек, найденной из сопоставления формулы Гельмгольца (1), (3) со значением резонансной

Рис. 8. Область допустимых значений относительных геометрических параметров p_1/h_1 , p_2/h_2 ячеек для заданного рабочего частотного диапазона звукоглушения

частоты одиночной ячейки (см. рис. 1), $t_i = 1$ мм, $i = \overline{1, 2}$. При выборе (•) величин a_1^* , a_2^* из области допустимых значений (см. рис. 8) из формулы (14) с учетом формул (10) и значения $H = 25$ мм следуют решения для параметра q_H : 0,54 и $2/3$ для заданных резонансных частот $f_1 = 3$ кГц, $f_2 = 4$ кГц и $f_1 = 1,7$ кГц, $f_2 = 3,6$ кГц (см. рис. 2) соответственно; значение $q_H = 2/3$ в точности соответствует принятым в физической модели значениям высот камер ячеек $H_1 = 10$ мм, $H_2 = 15$ мм с учетом уравнения (14).

Заключение

Проведено математическое и физическое моделирование резонансных и звукопоглощающих акустических характеристик сотовых панелей с целью повышения эффективности звукоглушения в конструкциях современных авиационных двигателей. Показано существенное расширение полосы звукопоглощения панели при увеличении числа слоев сотовых ячеек на примере экспериментального определения коэффициентов звукопоглощения одно-, двух- и трехслойных сотовых панелей (см. рис. 1–3). Разработана методика выбора геометрических параметров двухслойных звукопоглощающих сотовых панелей на основе многопараметрической математической модели расчета их резонансных частот. Рассмотрено решение обратной задачи по нахождению соответствующих значений геометрических параметров двухслойных звукопоглощающих сотовых панелей для заданного частотного диапазона звукоглушения и некоторые оптимальные значения обеих резонансных частот внутри рабочего диапазона; отмечена важность попадания как можно большего числа резонансных частот проектируемых сотовых панелей внутрь рабочего диапазона звукопоглощения. Определены области допустимых значений параметров ячеек сотовых панелей для заданного рабочего частотного диапазона звукоглушения; сравнение аналитических решений с экспериментальными данными подтвердили достоверность и хорошую точность результатов математического моделирования.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России по проекту № 1969 «Акустико-механическое моделирование перспективных звукопоглощающих контуров из полимерных композиционных материалов для авиационных двигателей».

Библиографический список

1. Мунин А.Г., Квитка В.Е. Авиационная акустика. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.
2. Авиационная акустика: в 2 ч. / под ред. А.Г. Мунина. Ч. 1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов. – М.: Машиностроение, 1986. – 243 с.
3. Чигрин В.С., Белова С.Е. Конструкция форсажных камер и выходных устройств авиационных ГТД / Рыбинск. гос. авиац. техн. ун-т. – Рыбинск, 2004. – 38 с.
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. Писарев П.В., Паньков А.А., Аношкин А.Н. Анализ влияния формы резонатора Гельмгольца на акустическое давление в модельном канале // Тез. докл. четвертой открытой Всерос. конф. по аэроакустике / Центр. аэрогидродинамич. ин-т им. проф. Н.Е. Жуковского (29 сентября – 1 октября 2015 г). – М., 2015. – С. 81–82.
6. Mao Q., Pietrzko S. Experimental study for control of sound transmission through double glazed window using optimally tuned Helmholtz resonators // Applied Acoustics. – 2010. – Vol. 71. – P. 32–38.
7. Ho J.-H., Berkhoff A. Comparisons between various cavity and panel noise reduction control methods in double-panel structures // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2012. – Vol. 131, № 4. – P. 3501.
8. Ho J.-H., Berkhoff A. Development of dynamic loudspeakers modified as incident pressure sources for noise reduction in a double panel structure // 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20). – Bangkok, 2013. – P. 7–11.
9. Pan J., Guo J., Ayres C. Improvement of sound absorption of honeycomb panels // Proceedings of Acoustics. – Busselton, 2005. – P. 9–11.
10. Федотов Е.С., Пальчиковский В.В. Исследование работы резонатора Гельмгольца в волноводе прямоугольного сечения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 38. – С. 107–126.
11. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций / А.Н. Аношкин, А.Г. Захаров, Н.А. Городкова, В.А. Чурсин // Вестник Пермского националь-

ного исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 1. – С. 5–20.

12. Крюкова Ю.В. Обзор зарубежных исследований по снижению уровней авиационных звуков // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2014. – № 4. – С. 133–141.

13. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. Собственная частота резонатора Гельмгольца на стенке прямоугольного канала // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60, № 2. – С. 145–151.

14. Panton R.I., Miller J.M. Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1975. – Vol. 57, № 6. – P. 1533–1535.

References

1. Munin A.G., Kvitka V.E. *Aviatsionnaya akustika* [Aviation acoustics]. Moscow: Mashinostroenie, 1973. 448 p.

2. Munin A.G. *Aviatsionnaya akustika. Chast 1. Shum na mestnosti dozvukovykh passazhirskikh samoletov i vertoletov* [Aviation acoustics. Part 1. Noise on the ground of subsonic airliners and helicopter]. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 243 p.

3. Chigrin V.S., Belova S.E. *Konstruktsiya forsazhnykh kamer i vykhodnykh ustroystv aviatsionnykh GTD* [Design of afterburners and output devices in aviation GTE]. Rybinskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskii universitet, 2004. 38 p.

4. Baklanov V.S., Postnov S.S., Postnova E.A. Raschet rezonansnykh zvukopogloshchayushchikh konstruktsiy dlya sovremennykh aviatsionnykh dvigateley [The calculation of sound absorbing structures for modern aircraft engines]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2007, vol. 19, no. 8, pp. 22–30.

5. Pisarev P.V., Pan'kov A.A., Anoshkin A.N. Analiz vliyaniya formy rezonatora Gelmgoltsa na akusticheskoe davlenie v modelnom kanale [Impact analysis of Helmholtz resonator geometry on acoustic pressure in model duct]. *Tezisy dokladov chetvertoy otkrytoy Vserossiyskoy konferentsii po aeroakustike*. September 29 – October 1, 2015, Moscow: Tsentralnyy aerogidrodinamicheskii institut imeni professora N.E. Zhukovskogo, 2015. P. 81–82.

6. Mao Q., Pietrzko S. Experimental study for control of sound transmission through double glazed window using optimally tuned Helmholtz resonators. *Applied Acoustics*, 2010, vol. 71, pp. 32–38.

7. Ho J.-H., Berkhoff A. Comparisons between various cavity and panel noise reduction control methods in double-panel structures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, vol. 131, no. 4, pp. 3501.

8. Ho J.-H., Berkhoff A. Development of dynamic loudspeakers modified as incident pressure sources for noise reduction in a double panel structure. *20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20)*. Bangkok, July, 2013, pp. 7-11.

9. Pan J., Guo J., Ayres C. Improvement of sound absorption of honeycomb panels. *Proceedings of Acoustics*. Busselton, November 2005, pp. 9-11.

10. Fedotov E.S., Palchikovskiy V.V. Issledovanie raboty rezonatora Gelmgoltsa v volnovode pryamougolnogo secheniya [A study of Helmholtz resonator operation in rectangular cross-section waveguide]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2014, no. 38, pp. 107-126.

11. Anoshkin A.N., Zaharov A.G., Gorodkova N.A., Chursin V.A. Raschetno-eksperimentalnye issledovaniya rezonansnykh mnogosloynnykh zvukopogloshchayushchikh konstruktsiy [Computational and experimental studies of resonance sound-absorbing multilayer structures]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2015, no. 1, pp. 5-20.

12. Kryukova Yu.V. Obzor zarubezhnykh issledovaniy po snizheniyu urovney aviatsionnykh zvukov [Review of foreign research on decrease in levels of aviation noise]. *Nauchnyy vestnik Gosudarstvennogo nauchno-issledovatel'skogo instituta grazhdanskoy aviatsii*, 2014, no. 4, pp. 133-141.

13. Komkin A.I., Mironov M.A., Yudin S.I. Eigenfrequency of a Helmholtz resonator at the wall of a rectangular duct. *Acoustical Physics*, 2014, vol. 60, no. 2, pp. 142-147.

14. Panton R.I., Miller J.M. Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz resonator. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1975, vol. 57, no. 6, pp. 1533-1535.

Об авторах

Захаров Алексей Генрихович (Пермь, Россия) – главный конструктор АО «Пермский завод “Машиностроитель”» (614014, г. Пермь, ул. Новозвягинская, д. 57, e-mail: a-zakharov@pzmash.perm.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: anoshkin@pstu.ru).

Паньков Андрей Анатольевич (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра «Акустических исследований, разработки и производства композитных и звукопоглощающих авиационных конструкций» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: a_a_pankov@mail.ru).

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: pisarev@pstu.ru).

About the authors

Aleksey G. Zakharov (Perm, Russian Federation) – Chief Designer, Perm Plant “Mashinostroitel” (57, Novozvyaginskaya st., Perm, 614014, Russian Federation, e-mail: a-zakharov@pzmash.perm.ru).

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

Andrey A. Pan'kov (Perm, Russian Federation) – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Scientific and Educational Center for Aviation Composite Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: a_a_pankov@mail.ru).

Pavel V. Pisarev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: pisarev@pstu.ru).

Получено 29.04.2016