DOI:

УДК 534.6:621.45

И.В. Храмцов, О.Ю. Кустов, Е.С. Федотов, В.В. Пальчиковский, А.А. Синер

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С ОБРАЗЦАМИ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Численное моделирование акустических процессов в интерферометре при высоких уровнях звукового давления представляет собой один из способов исследования процессов снижения шума резонансными звукопоглощающими конструкциями (ЗПК). Для исследований были созданы разборные образцы ЗПК на основе отдельных модульных резонаторов Гельмгольца с единичным отверстием по центру образца. С помощью комбинаций данных резонаторов был собран двух- и трехслойный образец ЗПК. Полученные образцы были испытаны на интерферометре с нормальным падением волн при уровнях звукового давления 130, 140 и 150 дБ. Численное моделирование акустических процессов в интерферометре для указанных образцов и уровней звукового давления выполнялось на основе полной системы уравнений Навье—Стокса с учетом сжимаемости. Для отработки методики и экономии вычислительного времени на данном этапе исследований расчеты проводились в осесимметричной постановке. Производилось сравнение действительной и мнимой частей импеданса образца, полученных с помощью численного моделирования и измеренных в эксперименте. Отмечено хорошее качественное и количественное совпадение результатов численного моделирования с экспериментом на низких частотах.

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

I.V. Khramtsov, O.Yu. Kustov, E.S. Fedotov, V.V. Palchikovskiy, A.A. Siner

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

NUMERICAL SIMULATION OF ACOUSTIC PROCESSES IN INTERFEROMETER WITH SAMPLES OF MULTILAYER SOUND-ABSORBING LINERS

The numerical simulation of acoustic processes in interferometer at high sound pressure levels is a way to study the processes of noise reduction by resonant sound-absorbing liners. For the studies, sectional liner samples were created based on single Helmholtz resonators with a single hole in the center of the sample. With the help of combinations of the resonators, a two-layer and three-layer sample was assembled. The created samples were tested on an interferometer with normal incidence of waves at sound pressure levels of 130, 140 and 150 dB. Numerical simulation of acoustic processes in the interferometer for the specified samples and sound pressure levels was performed based on the complete system of Navier-Stokes equations with allowance for the compressibility. For testing the computational method and reducing the computational time at this stage of the study, the calculations were carried out in an axisymmetric formulation. A comparison was made between the real and imaginary parts of the sample impedance obtained by numerical simulation and experiment. A good qualitative and quantitative agreement of the numerical simulation results with experiment was noted at low frequencies.

Keywords: aeroacoustics, aircraft engine, sound-absorbing liners, interferometer, impedance, Helmholtz resonator, numerical simulation, Navier-Stokes equations.

Введение

Для борьбы с шумом вентилятора авиационного двигателя используют резонансные звукопоглощающие конструкции (ЗПК). В настоящее время для современных двигателей чаще используются двух- и трехслойные конструкции [1]. При этом существующие полуэмпирические модели [2–5] определения акустических характеристик ЗПК не в состоянии учесть в полной мере всё разнообразие факторов, влияющих на акустические процессы, происходящие в резонаторах, и описывают импеданс с приемлемой точность только для определенного класса конструкций.

Применение численного моделирования позволяет учитывать особенности, недоступные для существующих полуэмпирических моделей (сложная геометрия резонатора, пограничный слой, образование и затухание вихрей), и, как следствие, создавать новые математические модели, более точно предсказывающие акустические характеристики ЗПК. Одним из перспективных направлений можно назвать прямое численное моделирование процессов, происходящих в резонаторах ЗПК. Существующий уровень вычислительной техники, однако, позволяет проводить расчеты только для малых образцов конструкций, состоящих из одного или нескольких резонаторов Гельмгольца [6–14].

Ранее в работе [14] авторами было получено хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом по определению импеданса одиночного резонатора Гельмгольца при нормальном падении волны. В данной работе предлагается развить этот подход для исследования акустических характеристик многослойных ЗПК с помощью численного моделирования.

Экспериментальное исследование образцов ЗПК

В данной работе проводилось экспериментальное и численное исследование двух-и трехслойных образцов ЗПК на интерферометре с нормальным падением волн. Определение импеданса того или иного образца ЗПК на интерферометре заключается в воздействии акустическим сигналом на образец и обработке входных сигналов с микрофонов методом передаточной функции [15]. В данной работе использовался интерферометр нормального падения лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа (рис. 1). Подробнее конструкция и характеристики данной установки представлены в работах [16, 17].



Рис. 1. Акустический интерферометр в ЛМГШиМА

Для проведения экспериментальных исследований были созданы разборные образцы на основе отдельных модульных резонаторов Гельмгольца с единичным отверстием по центру образца (рис. 2). С помощью комбинаций данных резонаторов был собран двух- и трехслойный образец ЗПК. Характеристики образцов представлены в таблице.



Рис. 2. Составные части двух- и трехслойного образца

Параметр	Значение	
	Двухслойный образец	Трехслойный образец
Толщина перфорированного листа для всех слоев, мм	2	2
Высота каждого слоя, мм	10	10
Наружный диаметр образца, мм	30	30
Внутренний диаметр образца, мм	28	28
Диаметр отверстия первого слоя, мм	8	8
Диаметр отверстия второго слоя, мм	5	5
Диаметр отверстия третьего слоя, мм	_	3

Геометрические характеристики образцов ЗПК

Образцы ЗПК были испытаны на интерферометре ЛМГШиМА при уровнях звукового давления 130, 140 и 150 дБ. Результаты экспериментов использовались далее в целях верификации результатов численного моделирования акустических процессов в интерферометре.

Численное моделирование акустических процессов в интерферометре с образцами многослойных ЗПК

Исследование процессов в интерферометре с образцами ЗПК проводится с помощью коммерческого пакета ANSYS Fluent. Для расчета используется система нелинейных уравнений Навье–Стокса для вязкого теплопроводного газа:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (\chi \nabla T + \tau \cdot \vec{v}).$$
(1)

Тензор вязких напряжений определяется выражением

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

Полная энергия имеет вид

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

где ρ – плотность; \vec{v} – вектор скорости; p – давление; T – температура; h – энтальпия; η – коэффициент динамической вязкости; χ – коэффициент теплопроводности; I – единичная матрица.

Для замыкания системы уравнений (1)–(3) используется уравнение состояния совершенного газа

$$\rho = \frac{p_{op} + p}{\frac{R_0}{M_w}T},$$

где p_{op} — опорное давление; R_0 — универсальная газовая постоянная; M_w — молярная масса.

В целях отработки методики численного моделирования акустических процессов в многослойных резонаторах и экономии вычислительного времени на данном этапе исследований

расчеты проводились в осесимметричной постановке по методике, представленной в работе [14]. Расчетная геометрическая модель включала в себя воздушный объем внутри интерферометра и воздушный объем внутри резонаторов с одиночным отверстием. При выполнении осесимметричного расчета длина воздушного объема интерферометра от динамика до образца составляла 120 мм. Параметры сетки выбирались аналогично работе [14]. Использовалась подробная сетка, состоящая из прямоугольных элементов, со средним линейным размером элемента 0.5 мм и сгущением на стенке из 20 слоев с коэффициентом роста 1.2. Размер пристеночной ячейки $2 \cdot 10^{-3}$ мм. Полученная расчетная сетка для осесимметричного расчета состояла из 30 тысяч расчетных ячеек.

Схема граничных условий представлена на рис. 3.

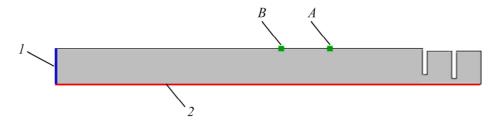


Рис. 3. Схема граничных условий

На входной границе I использовалось граничное условие Outlet, для которого было задано нестационарное изменение давления. При такой постановке задачи граничные условия примут вид

$$\vec{v} \mid_{S_2} = \vec{0},$$

$$p \mid_{S_1} = p_{rand}(t),$$

где $p_{rand}(t)$ — временная функция с равномерным частотным спектром в заданном диапазоне частот 500–3600 Γ ц.

В работах [18, 19] показано влияние типа сигнала на свойства образцов ЗПК, в связи с этим в расчет был заложен сигнал, взятый непосредственно из эксперимента. На рис. 4, a представлена зависимость давления $p_{rand}(t)$ от времени для сигнала с суммарным уровнем 140 дБ, на рис. 4, δ показан спектр данного сигнала. Сигнал в зависимости от времени представляет собой случайный процесс с равномерным спектром в диапазоне частот от 500 до 3600 Γ ц и суммарным уровнем звукового давления 130, 140 и 150 дБ.

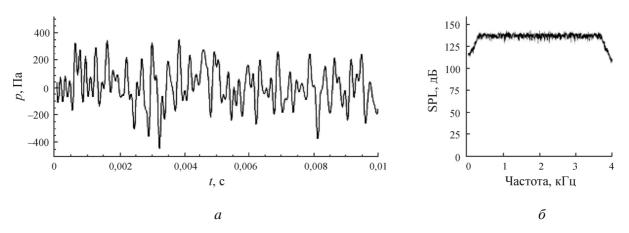


Рис. 4. Генерируемый сигнал при эксперименте на 140 дБ: a – временная зависимость; δ – спектр сигнала

На границе, представляющей собой ось симметрии, 2 (см. рис. 3) использовалось граничное условие осевой симметрии типа Axis. Для всех остальных границ использовалось граничное условие типа Wall. При расчетах стенки трубы принимались теплоизолированными. Точки A и B соответственно находятся на расстоянии 38 и 58 мм до поверхности образца и соответствуют положению микрофонов в интерферометре. В ходе расчетов в данных точках сохранялось значение давления для каждого временного шага.

Расчеты проводятся с временным шагом 1/65 536 с. Расчет проводится в течение 65 536 временных шагов, это позволяет построить спектр сигнала с шагом 1 Гц. Расчеты проводятся методом недоразрешенного прямого численного моделирования (DNS). Используется сопряженный решатель по давлению (Pressure Based Coupled Solver), неявная разностная схема по времени второго порядка точности и численные схемы второго порядка точности по пространственным переменным для аппроксимации конвективных членов в уравнениях.

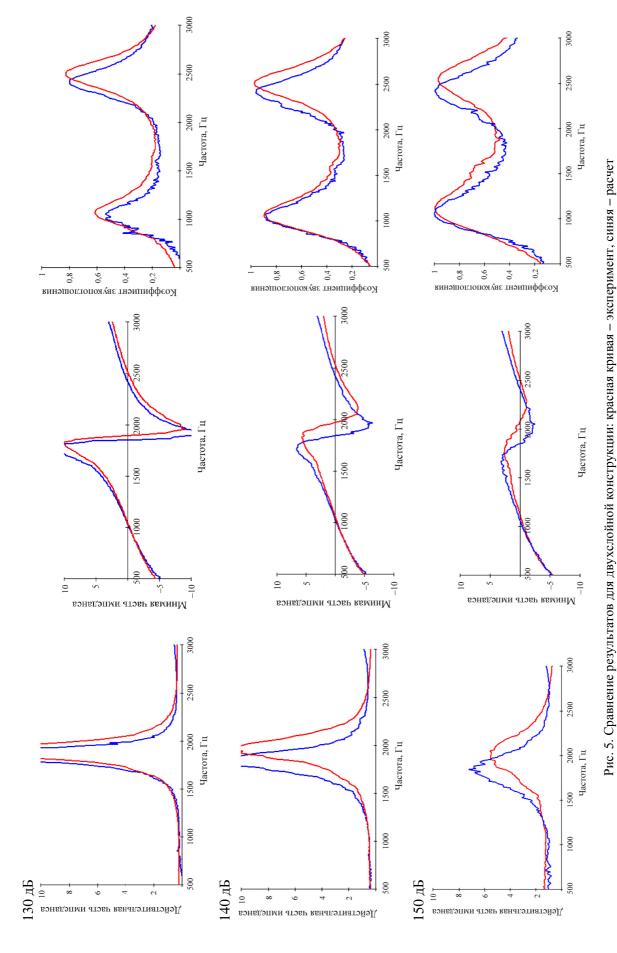
Анализ результатов

С использованием описанной выше математической модели были выполнены расчеты двух- и трехслойных образцов звукопоглощающей конструкции при нормальном падении звуковой волны. Проведено сравнение результатов расчета и эксперимента. Сравнение проводилось для одинаковых уровней звукового давления в расчетных точках A и B и микрофонах. На рис. 5, 6 представлены действительная и мнимая части импеданса, а также коэффициент звукопоглощения для разных уровней звукового давления.

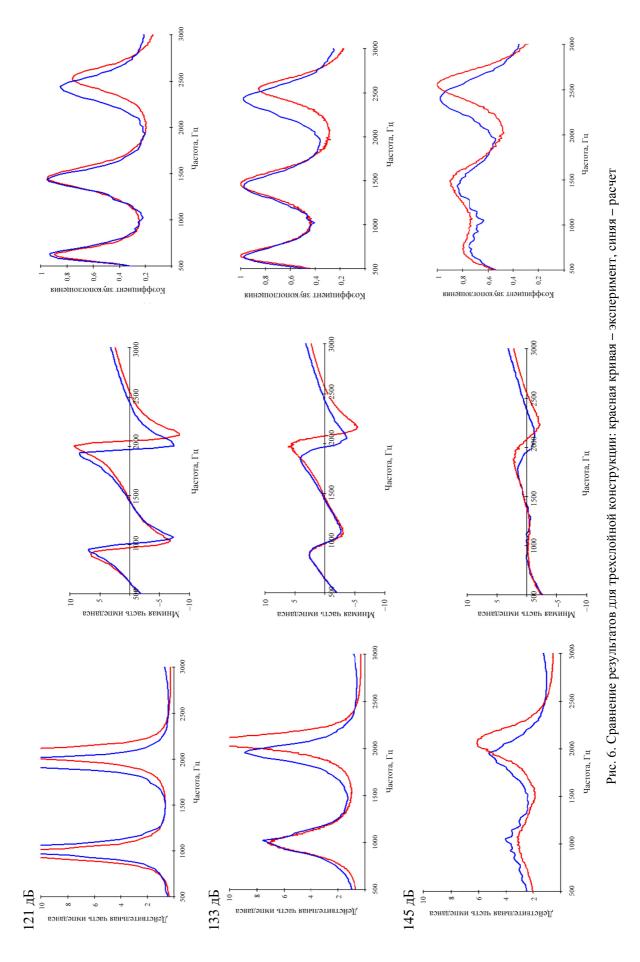
Проводя анализ результатов для двухслойной конструкции, можно видеть, что наблюдается очень хорошее совпадение результатов на первой собственной частоте работы конструкции. Вторая собственная частота в расчете оказывается смещена на 150–200 Гц влево относительно эксперимента. Для трехслойной конструкции наблюдается аналогичная ситуация: на двух первых собственных частотах достаточно точно удается определить импеданс и коэффициент звукопоглощения, однако третья частота также смещена на 150–200 Гц.

Как можно видеть на рис. 7, внутри образцов ЗПК скорости течения достигают 25–30 м/с, что при заданных геометрических характеристиках отверстий в слоях образцов соответствует числам Рейнольдса 50 000 при уровне возбуждающего сигнала 150 дБ и диаметре отверстия 3 мм. Данное обстоятельство определяет формирование развитых турбулентных течений внутри образца ЗПК.

Известно, что двумерная турбулентность обладает другими свойствами, чем трехмерная турбулентность [20], и поэтому двухмерный расчет не моделирует всех свойств трехмерных течений. Таким образом, для улучшения сходимости результатов численного моделирования с экспериментом требуется в первую очередь обеспечить корректное моделирование свойств турбулентности за счет дальнейшего перехода к моделированию процессов в интерферометре и многослойных образцах ЗПК в полной трехмерной постановке.



10



11

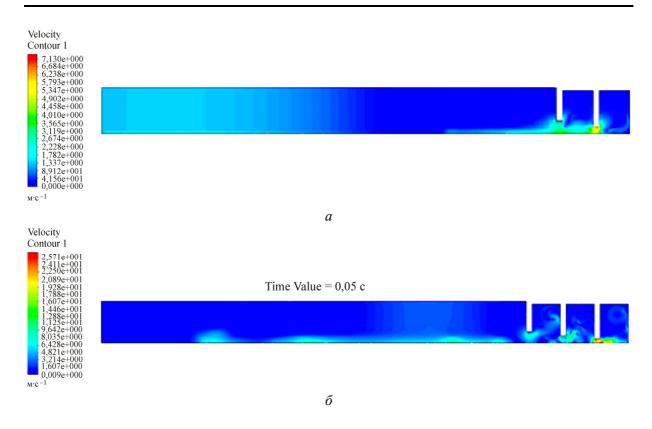


Рис. 7. Картина мгновенного распределения скорости течения для двухслойного (a) и трехслойного (δ) образца при заданном сигнале на входе суммарным уровнем 150 дБ

Заключение

Выполнено определение акустических характеристик образцов двух- и трехслойных ЗПК на основе численного моделирования. Получено хорошее согласование результатов численного моделирования с экспериментом на низких частотах. Для улучшения сходимости результатов в более широком диапазоне частот разработанная методика численного моделирования акустических процессов в интерферометре с многослойным образцом ЗПК должна быть перенесена на расчеты в трехмерной постановке. Впоследствии методика численного моделирования в трехмерной постановке может быть использована для развития полуэмпирических моделей предсказания импеданса ЗПК.

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. Advanced nacelle acoustic lining concepts development. NASA Technical report CR-2002-211672. August 2002.
- 2. Соболев А.Ф. Звукопоглощающие конструкции с расширенной полосой затухания дня каналов авиационных двигателей // Акустический журнал. 2000. Т. 46, № 4. С. 536–544.
- 3. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // Акустический журнал. 2007. Т. 53, № 6. С. 861–872.
- 4. Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data // AIAA Paper. 2008. № 2008-2930.
- 5. Melling T. The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels // Journal of Sound and Vibration. 1973. Vol. 29, iss. 1. P. 1–65.
- 6. Абалакин И.В., Горобец А.В., Козубская Т.К. Вычислительные эксперименты по звукопоглощающим конструкциям // Математическое моделирование. 2007. Т. 19, № 8. С. 15–21.

- 7. 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.
- 8. Комкин А.И., Быков А.И. Инерционная присоединенная длина горла резонаторов Гельмгольца // Акустический журнал. 2016. Т. 62, № 3. С. 277–287.
- 9. Eldredge J.D., Shoeybi M., Bodony D.J. Numerical investigation of the acoustic behavior of a multiperforated liner // AIAA Paper. 2007. № 2007-3683.
- 10. Zhang Q., Bodony D.J. Impedance predictions of 3D honeycomb liner with circular apertures by DNS // AIAA Paper. 2011. № 2011-2727.
- 11. Na W., Boij S., Efraimsson G. Simulations of acoustic wave propagation in an impedance tube using a frequency-domain linearized Navier-Stokes solver // 20th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference, Atlanta, Georgia, 2014. AIAA Paper. 2014. № 2014-2960.
- 12. Aircraft fan noise absorption: DNS of the acoustic dissipation of resonant liners / J.M. Roche, L. Leylekian, G. Delattre, F. Vuillot // 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2009. − AIAA Paper. − 2009. − № 2009-3146.
- 13. A computational and experimental study of slit resonators / C.K.W. Tam, H. Ju, M.G. Jones, W.R. Watson, T.L. Parrott // Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 284. P. 947–984.
- 14. Fedotov E.S., Khramtsov I.V., Kustov O.Y. Numerical simulation of the processes in the normal incidence tube for high acoustic pressure levels // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1770. DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.4964062
- 15. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory // Journal of Acoustical Society of America. 1980. Vol. 68, № 3.
- 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. 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.
- 18. 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.
- 19. Федотов Е.С., Кустов О.Ю., Храмцов И.В. Исследование влияния вида акустического сигнала на определение импеданса образцов звукопоглощающих конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 50. С. 113–127.
- 20. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов / В.М. Головизнин, М.А. Зайцев, С.А. Карабасов, И.А. Короткин. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. 427 с.

References

- 1. Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P. An overview of aircraft noise reduction technologies. Advanced nacelle acoustic lining concepts development. NASA Technical report CR-2002-211672, August 2002.
- 2. Sobolev A.F. Wide-band sound-absorbing structures for aircraft engine ducts. *Acoustical Physics*, 2000, vol. 46, no. 4, pp. 466-473.
- 3. 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.
- 4. 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.
- 5. 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.
- 6. Abalakin I.V., Gorobets A.V., Kozubskaya T.K. Vychislitelnye eksperimenty po zvukopogloshchayushchim konstruktsiyam [Computing experiment on sound-absorbing liners]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2007, vol. 19, no. 8, pp. 15-21.
- 7. 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.

- 8. Komkin A.I., Bykov A.I. Inertial attached neck length of Helmholtz resonators. *Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no. 3, pp. 269-279.
- 9. Eldredge J.D., Shoeybi M., Bodony D.J. Numerical investigation of the acoustic behavior of a multiperforated liner. *AIAA Paper*, 2007, no. 2007-3683.
- 10. Zhang Q., Bodony D.J. Impedance predictions of 3D honeycomb liner with circular apertures by DNS. AIAA Paper, no. 2011-2727.
- 11. Na W., Boij S., Efraimsson G. Simulations of acoustic wave propagation in an impedance tube using a frequency-domain linearized Navier-Stokes solver. 20th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference, Atlanta, Georgia, 2014, AIAA Paper, no. 2014-2960.
- 12. Roche J.M., Leylekian L., Delattre G., Vuillot F. Aircraft fan noise absorption: DNS of the acoustic dissipation of resonant liners. 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2009, AIAA Paper 2009-3146.
- 13. Tam C.K.W., Ju H., Jones M.G., Watson W.R., Parrott T.L. A computational and experimental study of slit resonators. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 284, pp. 947-984.
- 14. Fedotov E.S., Khramtsov I.V., Kustov O.Y. Numerical simulation of the processes in the normal incidence tube for high acoustic pressure levels. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1770, no. 030120. DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.4964062
- 15. 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.
- 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. 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.
- 18. 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.
- 19. Fedotov E.S., Kustov O.Yu., Khramtsov I.V. Research of influence of acoustic signal type on identification of impedance of sound-absorbing liner samples. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2017, no. 50, pp. 113-127.
- 20. Goloviznin V.M., Zaytsev M.A., Karabasov S.A., Korotkin I.A. Novye algoritmy vychislitelnoy gidrodinamiki dlya mnogoprotsessornykh vychislitelnykh kompleksov [The new algorithms of computational hydrodynamics for multiprocessor computer systems]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy universitet, 2013, 427 p.

Об авторах

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).

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).

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).

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).

Синер Александр Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: asiner@mail.ru).

About the authors

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).

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).

Evgeniy S. Fedotov (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: tesla.prog@rambler.ru).

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).

Alexander A. Siner (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: asiner@mail.ru).

Получено 01.11.2017