

ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИИ ОБРАЗЦОВ РЕЗОНАНСНЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ИХ АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© 2019

- О. Ю. Кустов** аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы»; Пермский национальный исследовательский политехнический университет; kustovou@yandex.ru
- И. В. Храпцов** младший научный сотрудник Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа; Пермский национальный исследовательский политехнический университет; igorhrs92@mail.ru
- Р. В. Бульбович** доктор технических наук, декан аэрокосмического факультета; Пермский национальный исследовательский политехнический университет; dekan_akf@pstu.ru

На основе 3D-моделирования и технологии 3D-печати созданы образцы звукопоглощающих конструкций в виде резонаторов Гельмгольца круглой формы из двух видов ABS-пластика и нейлона. Контрольные образцы изготовлены из металла на станке с числовым программным управлением. Проведено определение отклонений геометрических параметров изготовленных образцов от проектных значений визуальным и измерительным контролем при помощи высокоточного оборудования. Минимальные отклонения получены для контрольных образцов из металла. Проведено экспериментальное определение акустических характеристик образцов на интерферометре с нормальным падением волн при высоких уровнях акустического давления. На основе решения полных уравнений Навье-Стокса с учётом сжимаемости выполнено численное моделирование акустических процессов в интерферометре для данных образцов и проведено сравнение полученных значений резонансной частоты, импеданса и коэффициента звукопоглощения с экспериментальными. Отмечено, что значения импеданса наиболее чувствительно реагируют на отклонения геометрических параметров образцов от проектных значений, тогда как отклонения в коэффициенте звукопоглощения и резонансной частоты не столь чувствительны.

Аэроакустика; авиационный двигатель; звукопоглощающие конструкции; интерферометр; резонатор Гельмгольца; импеданс; численное моделирование.

Цитирование: Кустов О.Ю., Храпцов И.В., Бульбович Р.В. Влияние точности геометрии образцов резонансных звукопоглощающих конструкций на их акустические характеристики // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 67-77. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-67-77

Введение

Авиационный двигатель (АД) является сложным источником шума, поскольку шум образуется во всех его узлах: вентиляторе, компрессоре, камере сгорания, турбине и реактивном сопле [1; 2]. Доля шума отдельных источников в общем шуме двигателя зависит от типа двигателя: турбореактивный (ТРД) или турбореактивный двухконтурный (ТРДД) и от степени двухконтурности ТРДД. На сегодня активно применяемым способом снижения шума двигателя остаются звукопоглощающие конструкции (ЗПК).

Создание максимально эффективных ЗПК двигателей является актуальной задачей, что связано с постоянно ужесточающимися международными нормами по шуму самолётов на местности. Для достижения успешных результатов проектирования нужно хорошо представлять структуру затухания звука внутри ячеек ЗПК, которая при высоких уровнях звукового давления, реализуемых в АД, связана с турбулентными течениями внутри и вблизи ячейки с конкретной геометрией. Поскольку получение карти-

ны таких течений путём натурального эксперимента пока трудноосуществимо, то единственным путём решения данной задачи является численное моделирование.

Ранее в работах [3; 4] авторами было представлено моделирование акустических процессов в однослойном образце ЗПК, установленном в интерферометре с нормальным падением волн. Отмечено наличие небольшого расхождения с экспериментом, которое увеличивается, начиная с частоты 2000 Гц. Для рассмотренного в указанных работах однослойного образца ЗПК не выявлено различия в кривых импеданса и коэффициента звукопоглощения, полученных на основе численного моделирования, проведённого в осесимметричной и трёхмерной постановке, поскольку рассматриваемые образцы ЗПК имеют осесимметричную геометрию и равномерный по сечению трубы звуковой сигнал.

В [5] проведено численное моделирование двух- и трёхслойного образцов ЗПК в осесимметричной постановке. Помимо небольшого количественного расхождения с экспериментом кривых импеданса и коэффициента звукопоглощения также отмечено некоторое расхождение в резонансных частотах. Основной причиной данных расхождений может являться несоответствие геометрических параметров изготовленных для натурального эксперимента образцов ЗПК точным значениям, закладываемым в численное моделирование. Так в [6] отмечены основные причины отклонения геометрических параметров от проектных значений для случаев изготовления образцов ЗПК из композиционных материалов. В [7] детально представлены результаты оценки влияния производственного процесса (перфорация и склеивание перфорированного листа к сотам) на эффективную акустическую характеристику панели.

В последнее время всё чаще для акустических исследований в интерферометрах применяются образцы, напечатанные на 3D-принтере [3-5; 8; 9]. Основные особенности создания образцов ЗПК по данной технологии изложены в [10]. Точность изготовления образцов подобным способом намного выше, чем промышленная технология изготовления ЗПК из композиционных материалов и позволяет создавать резонаторы со сложной геометрической формой. Однако и у этой технологии имеются недостатки, к основным из которых можно отнести то, что материал даёт некоторую усадку, готовые образцы имеют шероховатость и скругления кромок в зависимости от толщины нити. В результате эти особенности также должны отразиться на согласовании акустических характеристик образцов ЗПК, полученных экспериментальным путём и на основе численного моделирования.

Таким образом, данная работа посвящена вопросу более тщательного исследования влияния геометрических параметров образцов резонансных ЗПК на точность получения их акустических характеристик при численном моделировании.

Исследование геометрических параметров натурных образцов резонансных ЗПК визуальным и измерительным контролем

Для детального исследования отклонения геометрии натурных образцов от проектных значений была создана серия образцов из разных материалов. Внешний вид образцов представлен на рис. 1, серии отмечены цифрами в круглых скобках. Первая серия образцов печаталась из ABS-пластика на 3D-принтере с соплом диаметром 0,4 мм, вторая серия печаталась из ABS-пластика с соплом диаметром 0,3 мм и третья серия печаталась из нейлона с соплом диаметром 0,3 мм. На станке с числовым программным управлением были изготовлены контрольные образцы из металла, имеющие минимально возможные отклонения размеров и минимальную шероховатость.



Рис. 1. Образцы резонансных ЗПК

Проектировочные значения геометрических параметров резонаторов представлены в табл. 1. Геометрия изготовленных образцов была проверена штангенциркулем 16EWR с цифровым отсчётным устройством марки «Mahr» и цифровым индикатором MarCator 1086R. Точность определения размеров составляла 0,01 мм. Полученные значения геометрических параметров резонаторов представлены в табл. 2.

Таблица 1. Проектировочные значения геометрических параметров резонаторов

Образец	Высота внутренней полости, мм	Высота горла, мм	Диаметр горла, мм	Диаметр внутренней полости, мм
1	10	2	8	28
2	10	2	5	28
3	10	2	3	28

Таблица 2. Значения геометрических параметров изготовленных образцов ЗПК

Образец	Материал	Высота внутренней полости, мм	Высота горла, мм	Диаметр горла, мм	Диаметр внутренней полости, мм	Шероховатость (Ra)
1(1)	ABS1	10.01	1.95	7.99	27.83	18.19
2(1)	ABS1	9.76	2.02	5.15	27.92	
3(1)	ABS1	9.85	2.10	2.99	27.86	
1(2)	ABS2	9.94	2.01	7.98	27.66	6.1
2(2)	ABS2	9.93	2.01	5.00	27.68	
3(2)	ABS2	9.94	2.05	3.03	27.66	
1(3)	Нейлон	9.90	2.09	7.99	27.58	7.32
2(3)	Нейлон	9.89	1.97	4.95	27.58	
3(3)	Нейлон	9.90	1.96	2.98	27.56	
1(met)	Металл	10.00	1.98	7.98	27.98	0.23
2(met)	Металл	9.99	1.99	4.98	27.98	
3(met)	Металл	10.00	1.96	2.98	28.00	

Как видно из табл. 1, 2, все напечатанные на 3D-принтере образцы ЗПК имеют отклонения во всех геометрических параметрах от проектных значений. Сопло прибора диаметром 0,4 мм ожидаемо дало максимальные значения отклонений и шероховатости. Максимальные отклонения достигают 0,44 мм, что однозначно должно сказываться на точности определения резонансной частоты. Минимальные отклонения получены для контрольных образцов из металла.

Особенности численного моделирования

Численное моделирование акустических процессов базировалось на прямом решении уравнений Навье-Стокса (DNS) с учётом сжимаемости в программном пакете ANSYS Fluent. Использовалась геометрия канала натурального интерферометра и образцов ЗПК. Внутренняя геометрия интерферометра представляет собой цилиндрическую трубу, на одном конце которой расположен резонатор Гельмгольца, а на другом – источника звука. Геометрия образца ЗПК соответствует проектным геометрическим параметрам, представленным в табл. 1. Течения внутри интерферометра можно считать акустически стабильными и осесимметричными. Поэтому для снижения времени расчёта использовалась осесимметричная модель. Подробнее методика моделирования представлена в [3-5].

Схема расчётной области представлена на рис. 2. На границе 2 использовалось граничное условие осевой симметрии типа Axis. Для всех остальных границ использовалось граничное условие типа Wall (жёсткая стенка с прилипанием). При расчётах стенки трубы принимались нетеплопроводными. Точки А и В находятся на стенке канала на расстоянии 38 и 58 мм соответственно от поверхности образца и соответствуют положению микрофонов в интерферометре. В ходе расчётов в данных точках для каждого временного шага сохранялось значение давления. В дальнейшем записанное в точках давление обрабатывалось по методу передаточной функции на основе двух микрофонов [11; 12]. В результате определялись такие акустические характеристики образцов ЗПК как импеданс Z и коэффициент звукопоглощения α .

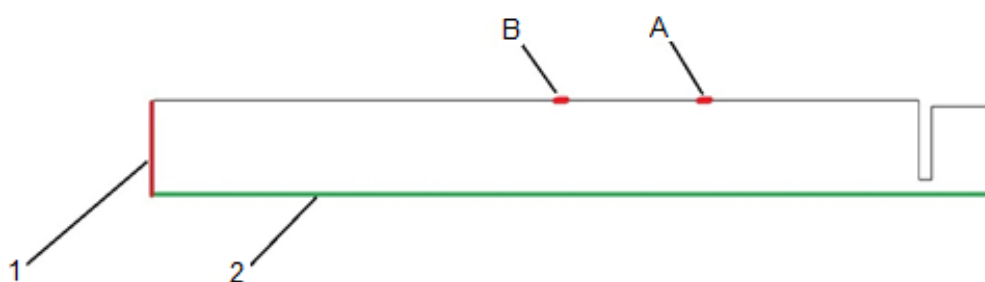


Рис. 2. Граничные условия

На границе 1 моделировалось излучение звука, которое в зависимости от времени представляет собой случайный сигнал с равномерным спектром в диапазоне частот от 500 до 3600 Гц и суммарным уровнем звукового давления (SPL) 130 дБ (рис. 3). В результате численного расчёта для каждого образца на поверхности получен свой SPL: для образцов с диаметром отверстия 3 мм – 125 дБ, с диаметром 5 мм – 130 дБ, с диаметром 8 мм – 131 дБ.

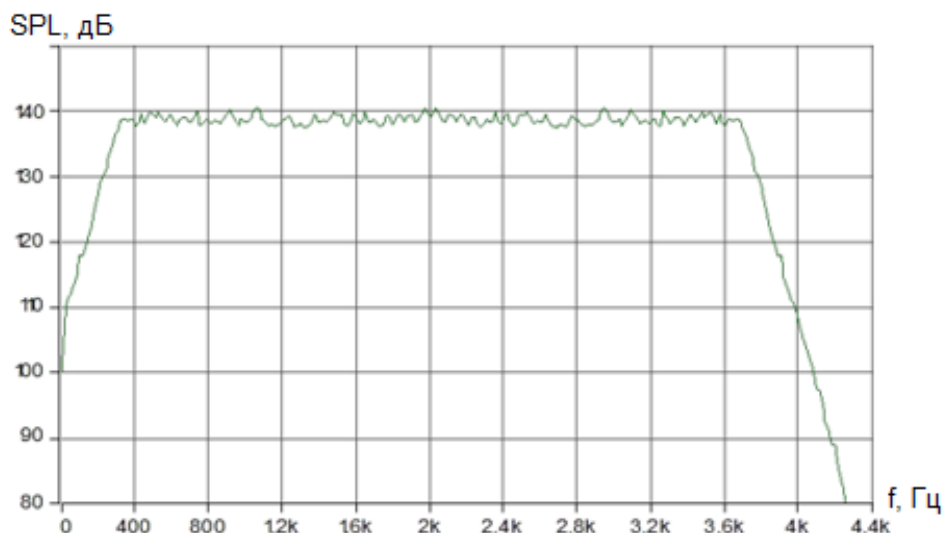


Рис. 3. Спектр сигнала с суммарным уровнем звукового давления 130 дБ

Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента

Натурные эксперименты проводились на интерферометре с нормальным падением волн, конструкция и характеристики которого подробно изложены в [13; 14]. Результаты сравнения акустических характеристик образцов ЗПК, полученные в натуральных экспериментах и при численном моделировании, представлены в табл. 3 и на рис. 4-9.

Таблица 3. Резонансные частоты образцов

Образец	Материал	Резонансная частота, Гц		Расхождение значений резонансной частоты, Гц	Уровень звукового давления, дБ
		Расчёт	Эксперимент		
1(1)	ABS1	1904	1958	54	131
2(1)	ABS1	1328	1365	37	130
3(1)	ABS1	864	880	16	125
1(2)	ABS2	1904	1969	65	131
2(2)	ABS2	1328	1378	50	130
3(2)	ABS2	864	912	48	125
1(3)	Нейлон	1904	1986	82	131
2(3)	Нейлон	1328	1369	41	130
3(3)	Нейлон	864	905	41	125
1(met)	Металл	1904	1936	32	131
2(met)	Металл	1328	1298	30	130
3(met)	Металл	864	876	12	125

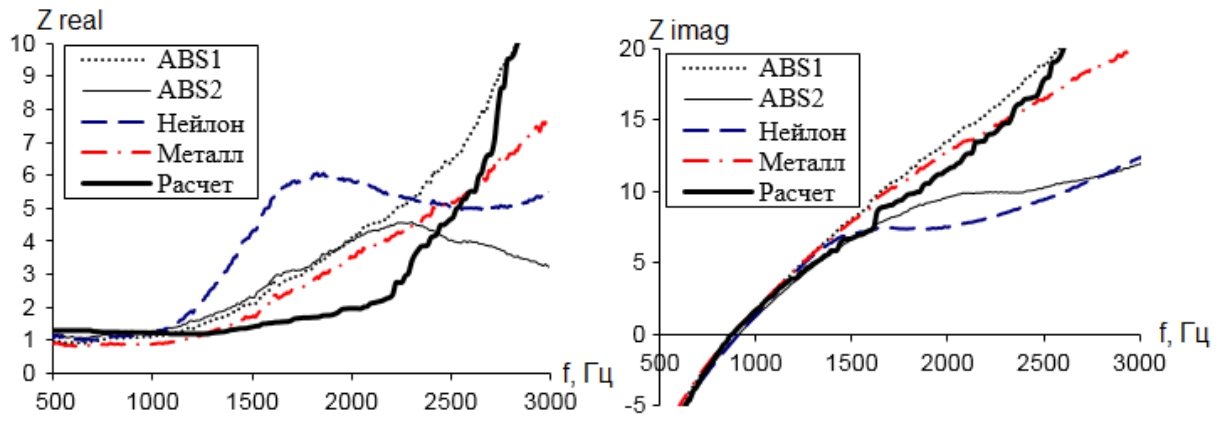


Рис. 4. Импеданс образца с диаметром отверстия 3 мм

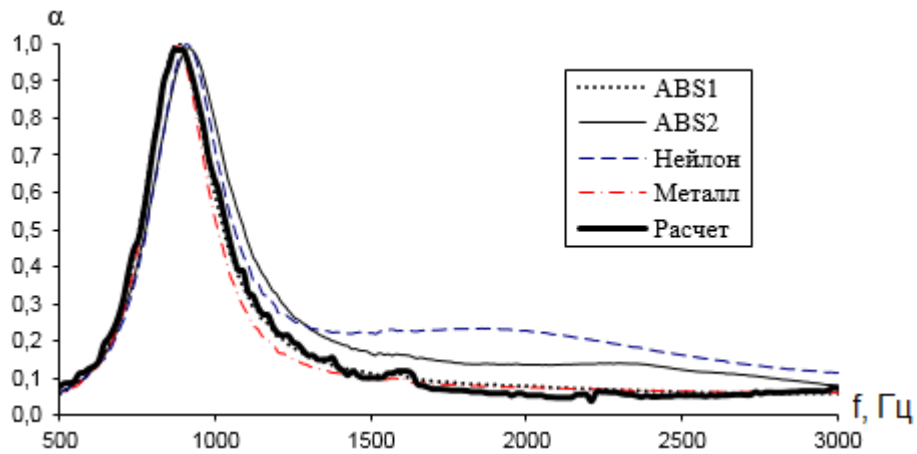


Рис. 5. Коэффициент звукопоглощения образца с диаметром отверстия 3 мм

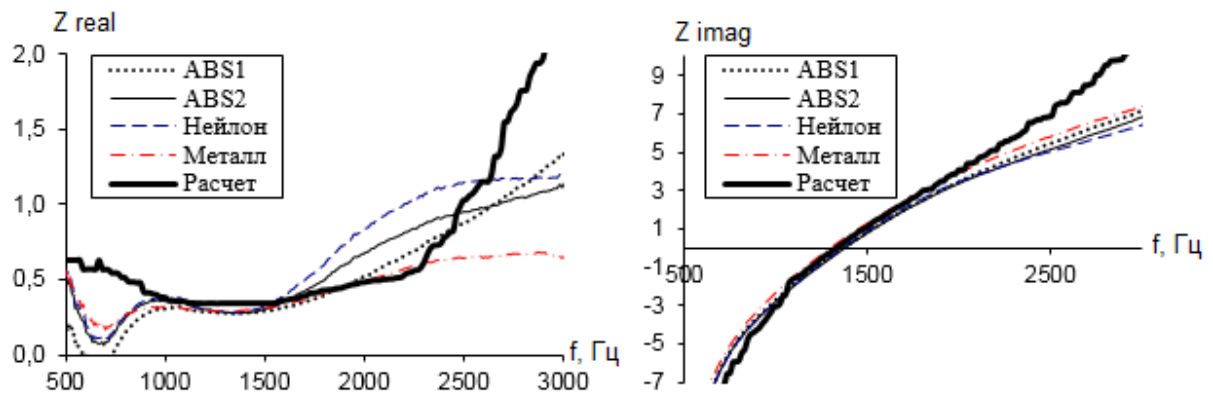


Рис. 6. Импеданс образца с диаметром отверстия 5 мм

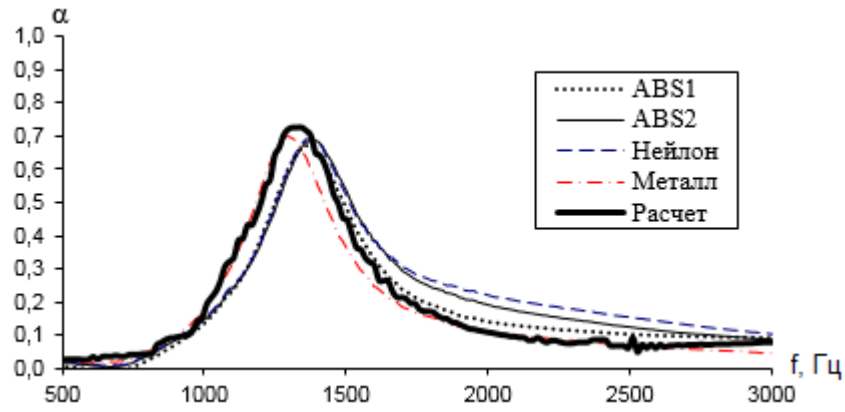


Рис. 7. Коэффициент звукопоглощения образца с диаметром отверстия 5 мм

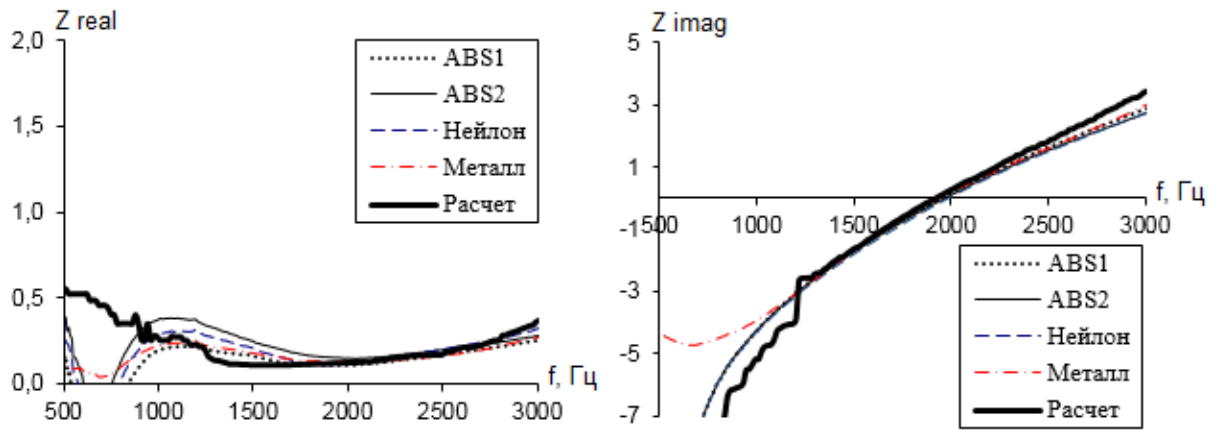


Рис. 8. Импеданс образца с диаметром отверстия 8 мм

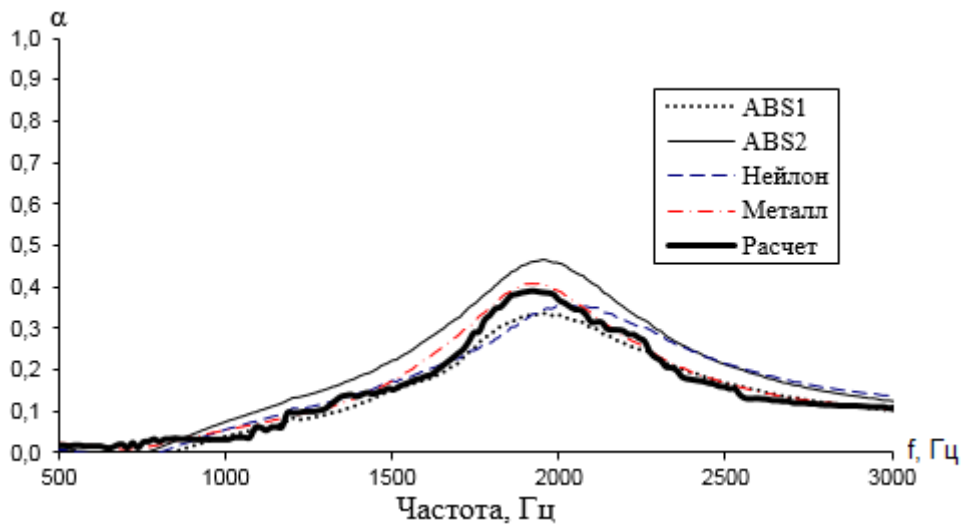


Рис. 9. Коэффициент звукопоглощения образца с диаметром отверстия 8 мм

Представленные в табл. 3 значения резонансных частот демонстрируют, что небольшие отклонения в геометрических параметрах образцов незначительно влияют на отклонения резонансной частоты, что важно для подтверждения работоспособности применяемой методики численного моделирования в прогнозировании акустических характеристик ЗПК, используемых для облицовки каналов авиационного двигателя, поскольку они в первую очередь настраиваются на гашение тональных составляющих вентилятора. В свою очередь, кривые на графиках импеданса весьма чувствительно реагируют на малейшие отклонения геометрических параметров резонансных ЗПК и при этом характер кривых может заметно изменяться. Кривые же на спектрах коэффициента звукопоглощения качественно остаются неизменными, незначительно меняясь в количественном отношении.

Заключение

В результате сравнения однослойных образцов резонаторов Гельмгольца, созданных по различным технологиям из разных материалов, можно сделать вывод, что погрешности при изготовлении в сотые доли миллиметра могут оказывать заметное влияние на получаемые акустические характеристики. При верификации результатов численного моделирования с экспериментальными данными важно, чтобы образцы были изготовлены с минимально возможными погрешностями в размерах. По результатам исследования можно сделать вывод, что методика определения акустических характеристик на основе численного моделирования в ANSYS Fluent работоспособна и в дальнейшем может быть использована для расчёта образцов с более сложной геометрией.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, договор № 17-41-590107\18.

Библиографический список

1. Бакланов В.С. Снижение шума и безопасность полётов самолётов нового поколения с двигателями сверхбольшой степени двухконтурности // Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия» (Россия, Санкт-Петербург, 17-19 марта 2009 г.). СПб: ИННОВА, 2014. С. 325-330.
2. Yu J., Chien E. Folding cavity acoustic liner for combustion noise reduction // 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference). 2006. DOI: 10.2514/6.2006-2681
3. 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. V. 1770. DOI: 10.1063/1.4964062
4. Храмов И.В., Кустов О.Ю., Федотов Е.С., Синер А.А. Численное моделирование механизмов гашения звука в ячейке звукопоглощающей конструкции // Акустический журнал. 2018. Т. 64, № 4. С. 508-514. DOI: 10.1134/S032079191804007X
5. Храмов И.В., Кустов О.Ю., Федотов Е.С., Пальчиковский В.В., Синер А.А. Численное моделирование акустических процессов в интерферометре с образцами многослойных звукопоглощающих конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 5-15. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.01
6. Кустов О.Ю., Лапин И.Н., Пальчиковский В.В. О влиянии дефектов в образцах звукопоглощающих конструкций на их акустические характеристики // Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, вы-

сокие технологии и инновации» (17-18 ноября 2016 г., Пермь). Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2016. С. 112-115.

7. Murray P.B., Ferrante P., Scofano A. Manufacturing process and boundary layer influences on perforate liner impedance // AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2005. DOI: 10.2514/6.2005-2849

8. Howerton B.M., Jones M.G., Buckley J.L. Development and validation of an interactive liner design and impedance modeling tool // 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (33rd AIAA Aeroacoustics Conference). 2012. DOI: 10.2514/6.2012-2197

9. Соболев А.Ф., Остриков Н.Н., Аношкин А.Н., Пальчиковский В.В., Бурдаков Р.В., Ипатов М.С., Остроумов М.Н., Яковец М.А. Сравнение импеданса звукопоглощающей конструкции, полученного по результатам измерений на двух различных установках с использованием малого числа микрофонов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2016. № 45. С. 89-113. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.05

10. Аношкин А.Н., Пальчиковский В.В., Писарев П.В., Кустов О.Ю., Лапин И.Н. Особенности изготовления эталонных образцов звукопоглощающих конструкций с применением аддитивных технологий // Тезисы докладов пятой открытой всероссийской (XVII научно-технической) конференции по аэроакустике (25-29 сентября 2017 г., Звенигород). М.: ЦАГИ, 2017. С. 74.

11. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory // The Journal of Acoustical Society of America. 1980. V. 68, Iss. 3. P. 907-913. DOI: 10.1121/1.384778

12. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment // The Journal of the Acoustical Society of America. 1980. V. 68, Iss. 3. P. 914-921. DOI: 10.1121/1.384779

13. Кустов О.Ю., Пальчиковский В.В. Интерферометр для высоких уровней акустического давления // Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (17-18 ноября 2015 г., Пермь). Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2015. С. 157-160.

14. Федотов Е.С., Кустов О.Ю., Храмцов И.В., Пальчиковский В.В. Сравнительный анализ акустических интерферометров на основе расчётно-экспериментальных исследований образцов звукопоглощающих конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 48. С. 89-103. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.48.09

INFLUENCE OF THE GEOMETRY FIDELITY OF RESONANT SOUND-ABSORBING LINER SAMPLES ON THEIR ACOUSTIC CHARACTERISTICS

© 2019

- | | |
|------------------------|---|
| O. Yu. Kustov | Postgraduate Student of the Department of Rocket and Space Equipment and Power Systems;
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;
kustovou@yandex.ru |
| I. V. Khramtsov | Junior Research Fellow of the Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis;
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;
igorhrs92@mail.ru |
| R. V. Bulbovich | Doctor of Science (Engineering), Dean of the Aerospace Faculty;
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;
dekan_akf@pstu.ru |

Samples of sound-absorbing Helmholtz resonator-type liners of circular shape were manufactured from two types of ABS plastic and nylon on the basis of 3D modeling and 3D printing technology. Check samples were made of metal on a numerically controlled machine. Deviations of geometric parameters of the manufactured samples from the design values were determined by visual and dimensional inspection using high-precision equipment. The minimum deviations were obtained for check samples made of metal. The acoustic characteristics of the samples were experimentally determined using an interferometer with normal wave incidence at high sound pressure levels. Numerical simulation of the acoustic processes in the interferometer for the given samples was carried out on the basis of solving full Navier-Stokes equations with account for compressibility. The obtained values of the resonant frequency, impedance and sound absorption coefficient were compared with the experimental ones. It was noted that the impedance values are most sensitive to the deviations of the geometric parameters of the samples from the design values, while the deviations in the sound absorption coefficient and resonance frequency are not so sensitive to them.

Aeroacoustics; aircraft engine; sound-absorbing liners; Helmholtz resonator; impedance; numerical simulation.

Citation: Kustov O.Yu., Khramtsov I.V., Bulbovich R.V. Influence of the geometry fidelity of resonant sound-absorbing liner samples on their acoustic characteristics. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 1. P. 67-77. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-67-77

References

1. Baklanov V.S. Snizhenie shuma i bezopasnost' poletov samoletov novogo pokoleniya s dvigatelyami sverkhbol'shoy stepeni dvukhkonturnosti. *Sbornik dokladov II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Zashchita naseleniya ot povyshennogo shumovogo vozdeystviya» (Russian Federation, Saint-Petersburg, March, 17-19, 2009)*. SPb: INNOVA Publ., 2014. P. 325-330. (In Russ.)
2. Yu J., Chien E. Folding cavity acoustic liner for combustion noise reduction. *12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference)*. 2006. DOI: 10.2514/6.2006-2681
3. 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. V. 1770. DOI: 10.1063/1.4964062
4. Khramtsov I.V., Kustov O.Y., Fedotov E.S., Siner A.A. On numerical simulation of sound damping mechanisms in the cell of a sound-absorbing structure. *Acoustical Physics*. 2018. V. 64, Iss. 4. P. 511-517. DOI: 10.1134/s1063771018040073
5. Khramtsov I.V., Kustov O.Yu., Fedotov E.S., Palchikovskiy V.V., Siner A.A. Numerical simulation of acoustic processes in interferometer with samples of multilayer sound-absorbing liners. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2017. No. 51. P. 5-15. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.01. (In Russ.)
6. Kustov O.Yu., Lapin I.N., Palchikovskiy V.V. O vliyaniy defektov v obraztsakh zvukopogloshchayushchikh konstruktsiy na ikh akusticheskie kharakteristiki. *Materialy XVII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii» (November, 17-18, 2016, Perm)*. Perm: Perm National Research Polytechnic University Publ., 2016. P. 112-115. (In Russ.)
7. Murray P.B., Ferrante P., Scofano A. Manufacturing process and boundary layer influences on perforate liner impedance. *AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. 2005. DOI: 10.2514/6.2005-2849
8. Howerton B.M., Jones M.G., Buckley J.L. Development and validation of an interactive liner design and impedance modeling tool. *18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (33rd AIAA Aeroacoustics Conference)*. 2012. DOI: 10.2514/6.2012-2197
9. Sobolev A.F., Ostrikov N.N., Anoshkin A.N., Palchikovskiy V.V., Burdakov R.V., Ipatov M.S., Ostroumov M.N., Yakovets M.A. Omparison of liner impedance derived from the results of measurements at two different setups using a small number of microphones.

PNRPU Aerospace Engineering Bulletin. 2016. No. 45. P. 89-113. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.05. (In Russ.)

10. Anoshkin A.N., Palchikovskiy V.V., Pisarev P.V., Kustov O.Yu., Lapin I.N. Osobnosti izgotovleniya etalonnykh obraztsov zvukopogloshchayushchikh konstruktsiy s primeneniem additivnykh tekhnologiy. *Tezisy dokladov pyatoy otkrytoy vserossiyskoy (XVII nauchno-tekhnicheskoy) konferentsii po aeroakustike (September, 25-29, 2017, Zvenigorod)*. Moscow: Central Aerohydrodynamic Institute Publ., 2017. P. 74. (In Russ.)

11. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory. *The Journal of Acoustical Society of America*. 1980. V. 68, Iss. 3. P. 907-913. DOI: 10.1121/1.384778

12. Chung J.Y., Blaser D.A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1980. V. 68, Iss. 3. P. 914-921. DOI: 10.1121/1.384779

13. Kustov O.Yu., Palchikovskiy V.V. Interferometr dlya vysokikh urovney akusticheskogo davleniya. *Materialy XVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aero-kosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii» (November, 17-18, 2015, Perm)*. Perm: Perm National Research Polytechnic University Publ., 2015. P. 157-160. (In Russ.)

14. 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. P. 89-103. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.48.09. (In Russ.)