

УДК 621.9.015

DOI: 10.30987/article_5d9dc9b8cfaa96.66857417

В.Ф. Макаров, д.т.н., **В.Я. Модорский**, д.т.н., **Р.С. Абзаев**, ассистент, **И.И. Койнов**, аспирант, **А.С. Дударев**, к.т.н., **Д.Н. Хроликова**, магистрант
(ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29)
E-mail: info.koynov.igor@gmail.com

Влияние использования резьбовых отверстий в конструкциях из композиционного материала на звукопоглощение

Предложена и рассмотрена идея использования вместо гладких отверстий резьбовые отверстия в однослойных звукопоглощающих конструкциях (ЗПК). Описана методика численного моделирования влияния типа и формы отверстий в ячейках однослойных ЗПК на шумопоглощение с использованием программного пакета Ansys CFX. Исследования проведены на различных частотах в горле резонатора панелей из композиционного материала марки VKU-39.

Ключевые слова: шумопоглощение; композиционный материал; шероховатость; формообразование отверстия; численное моделирование.

V.F. Makarov, Dr.Sc.Tech., **V.Ya. Modorsky**, Dr.Sc.Tech., **R.S. Abzaev**, Assistant, **I.I. Koinov**, Post graduate student, **A.S. Dudarev**, Can.Sc.Tech., **D.N. Khrolikova**, Master degree student
(FSBEI HE "Perm National Research Polytechnic University", 29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990)

Impact of threaded openings in composite structures upon sound absorption

There is considered and offered an idea of threaded opening use instead of smooth openings in single-layered sound absorbing structures (SAS). A procedure for a numerical modeling of a type and opening shape impact in cells of single-layered SAS upon sound absorption using Ansys CFX program package is described. The investigations are carried out at different frequencies in the throat of a resonator of boards made of VKU-39 composite.

Keywords: sound absorption; composite; roughness; opening shaping; numerical modeling.

Важнейшей проблемой для конструкций самолетов гражданской авиации является шумопоглощение [1].

Одним из перспективных способов решения экологических требований ИКАО (международный комитет гражданской авиации) по снижению шума самолетов на местности является применение в силовых установках авиатехники звукопоглощающих конструкций. Наиболее перспективными являются многослойные композитные звукопоглощающие конструкции (ЗПК) с металлическими и неметаллическими сотовыми заполнителями, которые имеют повышенную акустическую эффективность и эксплуатационную надежность, сохраняющуюся в течение длительного времени.

Стоит отметить, что за рубежом в университете Xi'an Jiaotong (Китай) выявили [2], что на звукопоглощение так же влияет и шероховатость поверхности. Была разработана теоретическая модель распространения звука в цилиндрических микротрубках (рис. 1), содержащих различные параметры шероховатости цилиндрической поверхности, с учетом как вязкого, так и теплового эффектов.

Для определения скорости жидкости вокруг каждого элемента шероховатости в дополнение к условию нулевой скорости на стенке трубы применялось приближенное условие непрерывности скорости, т.е. скорость в верхней части элемента шероховатости равна средней скорости потока жидкости внутри трубки вдоль ее осевого направления. Аналогичным образом, на основе приближенной температуры в верхней части цилиндрической шероховатости и нулевого условия повышения температуры на стенках трубы получено среднее распределение температуры в трубке.

На основе разработанной теоретической модели проведены численные расчеты для исследования влияния параметров шероховатости поверхности на звукопоглощение. Были рассмотрены различные варианты шероховатости поверхности, включая случай гладкой поверхности. Результаты расчетов показывают, что шероховатость поверхности оказывает значительное влияние на звукопоглощение, особенно в области средних частот.

На основе разработанной теоретической модели проведены численные расчеты для исследования влияния параметров шероховатости поверхности на звукопоглощение. Были рассмотрены различные варианты шероховатости поверхности, включая случай гладкой поверхности. Результаты расчетов показывают, что шероховатость поверхности оказывает значительное влияние на звукопоглощение, особенно в области средних частот.

ховатости на снижение уровня шума. Установлено, что наличие шероховатости улучшает акустическое сопротивление и повышает коэффициент затухания микротрубок по широкой частоте, что приводит к увеличению коэффициента звукопоглощения. Кроме того, увеличение высоты, радиуса и числа элементов шероховатости может улучшить акустическое сопротивление, коэффициент затухания и звукопоглощение.

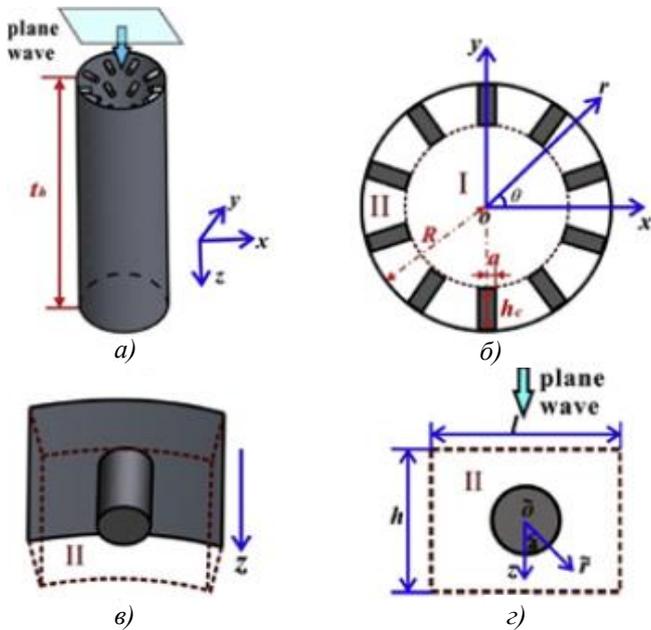


Рис. 1. Схема цилиндрической трубы с микроцилиндрическими элементами шероховатости, периодически распределенными по ее внутренней поверхности:

a – общий вид; *б* – вид сверху; *в* – элементарная ячейка для элемента шероховатости цилиндрической формы; *z* – поперечное сечение элемента шероховатости цилиндрической формы с прямоугольной внешней границей

Влияние параметров качества отверстий в звукопоглощающих конструкциях авиационных двигателей на акустические характеристики были рассмотрены также в Пермском национальном исследовательском политехническом университете и отражены в работе [7]. Был проведен эксперимент в специальной акустической лаборатории, в одних и тех же условиях исследованы в импедансной трубе образцы фрагментов звукопоглощающих конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с удовлетворительным и с неудовлетворительным качеством отверстий. Снятые с обоих образцов данные показали различные акустические характеристики и различные коэффициенты звукопоглощения, импедансы действительные и мнимые. Замеры

показали существенное смещение резонансных частот из-за различия в диссипации энергий, сил упругости и инерции масс воздуха. Некачественно выполненная перфорация отверстий, а именно, наличие бахромы и сколов волокон ПКМ с недопустимой величиной заусенцев вокруг отверстия резонаторов, меняет акустические характеристики ЗПК.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что существует ещё один способ эффективного шумоглушения с применением ЗПК, который на сегодняшний день является не изученным. В настоящей работе предлагается исследовать влияние в звукопоглощающих конструкциях типа и формы отверстий горла резонатора на звукопоглощение.

Обобщая вышесказанное, перспективным путем решения задачи акустического совершенствования авиационных двигателей является использование резонансных звукопоглощающих сотовых панелей, устанавливаемых в канале воздухозаборника и во внешнем контуре двигателя. Одной из проблем совершенствования панелей ЗПК является ограниченность размеров компоновки. Было выявлено, что метод улучшения поглощения шума ячейками ЗПК может быть основан на изменении типа и формы отверстий горла резонатора.

Для проведения исследований влияния режимов резания на шероховатость отверстий в композиционном материале использованы: сверлильно-фрезерный станок мод. JET JMD – 45FD; микроскоп мод. МСП-1; профилометр мод. MahrSurf PS1. Обрабатывались образцы 60×25×7 мм; обрабатываемый материал – углепластик ВКУ–39 по ТУ К55/13–615. Инструменты: сверло из быстрорежущей стали Р6М5 (Ø10) мм по ГОСТ 10903-77; сверло сборное с твердосплавной пластиной SD105-10.00-10.49-30-16R7-1491 (фирмы Seco); метчик из быстрорежущей стали Р6М5 (Ø12 мм) по ГОСТ 3266-81. Обработка образцов производилась без СОЖ, так как не допускается по техническим условиям производства изделий из ПКМ. Режимы резания и шероховатость поверхности *Ra*, мкм, при сверлении быстрорежущим сверлом Р6М5 приведены в табл. 1.

1. Шероховатость *Ra*, мкм, при сверлении быстрорежущим сверлом Р6М5

Обороты <i>n</i> , об/мин	Подача, мм/об			Скорость <i>V</i> , м/мин
	0,12	0,18	0,25	
50	3,866	4,196	4,560	1,57
2500	1,331	1,818	2,861	78,4

После сверления 50-ти отверстий на сверле из быстрорежущей стали Р6М5 наблюдается повышение износа на режущей кромке $h = 0,55$ мм – около вершины кромки и на вершине кромки $h = 0,55$ мм (рис. 2 и рис. 3).

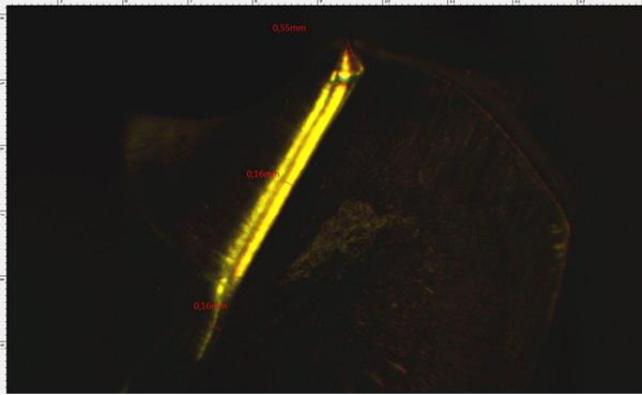


Рис. 2. Износ инструмента из быстрорежущей стали после сверления 50-ти отверстий



Рис. 3. Вид кромок образцов углепластика после сверления 40...50-ти отверстий

Таким образом, можно сделать вывод, что при сверлении полимерных композиционных материалов сверлом из быстрорежущей стали Р6М5 при частоте вращения сверла $n = 50$ об/мин и подаче равной $0,25$ мм/об получается грубая шероховатость величиной $Ra = 4,56$ мкм. Помимо грубой шероховатости было получено грубое нарушение входных и выходных кромок, расслоение и деструкция материала, что приводит к разрушению целостности конструкции из ПКМ. Низкое качество может быть обусловлено геометрией инструмента – ширина ленточек для удаления стружки из зоны резания не позволяет стружке легко удалиться, что, в свою очередь, создаёт трение об обрабатываемое отверстие.

Результаты исследований, приведенные в табл. 2, показали, что при сверлении отверстий в композиционном материале сборным сверлом с твердосплавной пластиной SD105-10.00-10.49-30-16R7-1491 (фирмы Seco) получается высокое качество входных и выходных кромок отверстий. Целостность ма-

териала не была нарушена. Стойкость составного твердосплавного сверла выше. Износ инструмента на режущей кромке после сверления 50-ти отверстий равен $h = 0,11$ мм (рис. 4 и рис.5).

2. Шероховатость Ra , мкм, при сверлении твердосплавным сверлом фирмы Seco

Обороты n , об/мин	Подача, мм/об			Скорость V , м/мин
	0,12	0,18	0,25	
50	2,290	2,553	2,667	1,57
2500	1,098	1,345	1,646	78,4

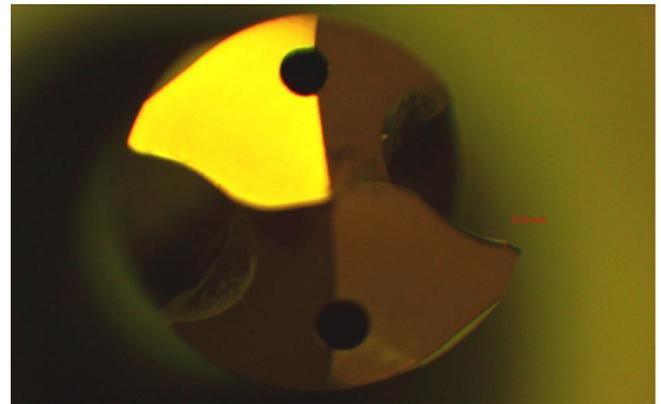


Рис. 4. Износ инструмента из твердого сплава после сверления 50-ти отверстий

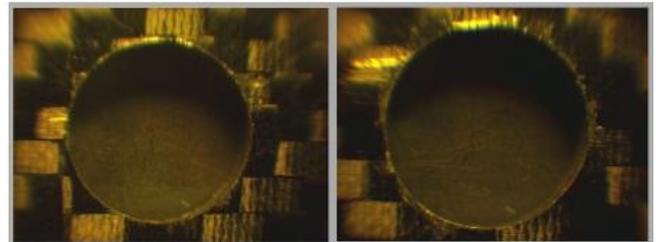


Рис. 5. Вид кромок отверстий после сверления твердосплавным сверлом

Для опробования измененного типа и формы отверстия в образцах ПКМ, после сверления отверстий твердосплавным сверлом нарежали резьбу М12.

После нарезания резьбы М12 целостность материала не нарушилась, получена резьба требуемого качества (рис. 6), кроме того входные и выходные кромки отверстий не имеют дефектов.

Для исследования влияния нарезанной резьбы в отверстиях перфорированного листа ЗПК на шумопоглощение были проведены численные расчеты.

Процессы рассматривались в трехмерной динамической постановке. В используемой физической модели приняты следующие допущения: полость ячейки заполнена идеальным газом; принята стандартная к-ε модель турбулентности; стенки конструкции непроницаемые; для исследования влияния нарезанной резьбы в отверстиях перфорированного листа ЗПК на шумопоглощение были проведены численные расчеты; стенки конструкции не поглощают и не выделяют тепло; стенки конструкции не деформируются; шероховатость стенок тела не учитывается.

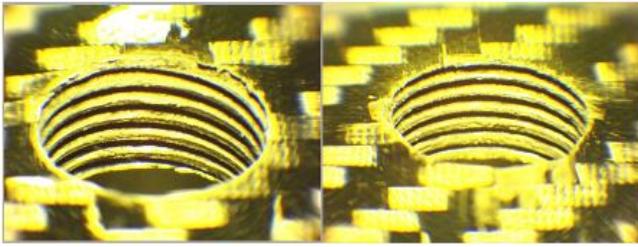


Рис. 6. Отверстия после нарезания резьбы

Давление идеального газа на входе в ячейку изменяется по синусоидальному закону.

В соответствии с принятой физической моделью разработана математическая модель, которая базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии и замыкается уравнениями состояния идеального сжимаемого газа и турбулентности, а также начальными и граничными условиями. Требуется решить систему Навье-Стокса из четырех независимых уравнений (1) – (4):

– закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0; \quad (1)$$

– закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla P + \nabla((\mu + \mu_t)(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T)) \quad (2)$$

– закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} H) = \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla((\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t}) \nabla H); \quad (3)$$

– уравнение состояния:

$$P = \rho R T, \quad (4)$$

где t – время; ρ – плотность; V – скорость; P – давление; μ – динамическая вязкость; μ_t – турбулентная динамическая вязкость; H – энтальпия; c_p – теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; Pr_t – турбулентное число Прандтля; R – универсальная газовая постоянная.

Математическая модель замыкается по формуле (5) следующими начальными и граничными условиями:

$$P_{static} = P_m \sin(2\pi ft), \quad (5)$$

где P_m – амплитуда колебаний давления; f – частота колебаний; t – текущий момент времени.

Описанная математическая модель реализована в программном пакете Ansys CFX, который был выбран для проведения расчетов (рис.7).

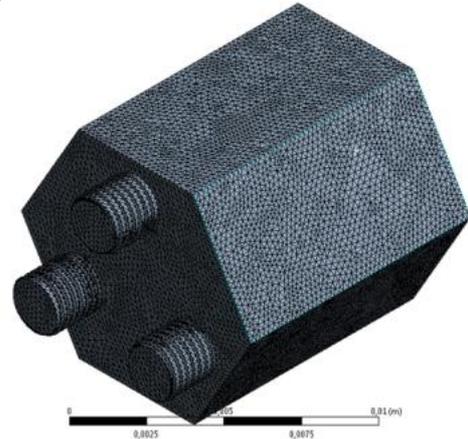


Рис. 7. Сеточная модель для расчета сотовой конструкции с использованием программного пакета Ansys CFX

Для оценки собственной частоты ячейки используем формулу:

$$f_o = \frac{c}{2\pi} \cdot \frac{g}{\sqrt{L(l+l_i+l_e + L \frac{g^2}{2})}} \quad (6)$$

где $c = 343$ м/с – скорость звука;

$$g = \sqrt{\frac{S_o}{S_{bug}}} \quad (7)$$

где S_o – площадь горла резонатора; S_{bug} – площадь основания ячейки ЗПК; L – высота ячейки ЗПК; l – высота горла; l_i – присоединенная длина горла с внутренней стороны; l_e – присоединенная длина горла с внешней стороны;

$$l_i = \frac{\alpha \cdot (1 - \beta \cdot g) \cdot d_o}{2} \quad (8)$$

где α, β – коэффициенты, зависящие от l (табл.3); S – площадь сечения объема резонатора.

3. Значения коэффициентов, зависящих от l

Коэффициенты	Высота горла l , мм			
	0,5	1	2	5
α	0,804	0,8080	0,815	0,820
β	1,37	1,34	1,34	1,34

Для присоединенной длины l_e было полу-

чено выражение:

$$l_e = \alpha \cdot (l - \beta_1 \cdot (\frac{d_o}{b}) + \beta_2 \cdot (\frac{d_o}{b})^2 - \beta_3 \cdot (\frac{d_o}{b})^3) \cdot \frac{d_o}{2} \quad (9)$$

где $\alpha = 0,815$; d_o – диаметр горла; b – ширина прямоугольного канала, в котором установлен резонатор; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – эмпирические коэффициенты (табл. 4).

4. Значения эмпирических коэффициентов

a/b	β_1	β_2	β_3
0,5	1,48	0,53	0,16
1,0	0,97	0,32	0,07
2,0	0,60	0,52	0,24

В качестве размера b используем диаметр описанной окружности ячейки ($b = 0,0105$ м). В результате было получено выражение:

$$l_i = \frac{\alpha \cdot (1 - \beta \cdot g) \cdot d_o}{2} = 3.058 \times 10^{-4}$$

$$l_e = \alpha(1 - 0.97 \cdot (\frac{d_o}{0.0105}) + 0.32 \cdot (\frac{d_o}{0.0105})^2 - 0.07 \cdot (\frac{d_o}{0.0105})^3) \cdot \frac{d_o}{2} = 3.678 \times 10^{-4}$$

Учитывая, что всего три отверстия, получим выражение:

$$g = \sqrt{\frac{3s_o}{s_{6уг}}} \quad \text{где, } s_o = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4}$$

Площадь горла – площадь шестиугольника, где $e = 0,00525$ м – сторона шестиугольника:

$$s_{6уг} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot e^2}{2}$$

В результате резонансная частота, Гц, вычисляется по формуле:

$$f_o = \frac{c}{2\pi} \cdot \frac{g}{\sqrt{L \cdot (l + l_i + l_e + L \cdot \frac{g^2}{2})}} = 1.859 \times 10^3$$

Для построенных моделей проведены динамические расчеты с различной частотой колебаний на входе от 1000 до 2000 Гц с шагом в 250 Гц. В газодинамической области были выбраны три контрольных точки с координатами в метрах (0; 0; 0,003), (0; 0; 0,006) и (0; 0; 0,009) (рис. 8).

В каждой точке выполнена оценка суммарного уровня давления, Па, по формуле:

$$l = \sqrt{\frac{1}{dt \cdot N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} [(p_i)^2 \cdot dt]} \quad (10)$$

где l – уровень давления, Па; N – количество временных шагов; p_i – мгновенное давление в контрольной точке; dt – шаг по времени.

Для перерасчета уровня шума в децибелы (Дб) использовалась следующая формула:

$$L_p = 20 \cdot \log(\frac{l}{p_o}) \quad (11)$$

где L_p – уровень шума, дБ; l – уровень давления, Па; p_o – порог слышимости.

Результаты представлены в виде табл. 5, 6, 7.

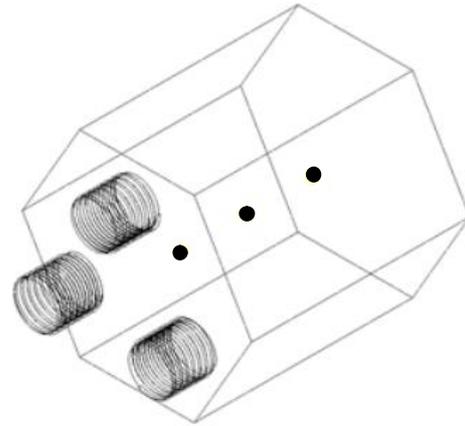


Рис. 8. Расположение контрольных точек

5. Уровень шума в точке №1

Частота, Гц	С резьбой М12		Без резьбы Ø12мм	
	Па	Дб	Па	Дб
1000	55,1718	128,814	57,71642	129,205
1250	53,6282	128,567	55,11052	128,804
1500	53,61168	128,565	56,40571	129,006
1750	59,15885	129,420	63,36488	130,016
1860	34,44	124,72	52,75	128,42
2000	61,79057	129,798	65,57145	130,314

6. Уровень шума в точке № 2

Частота, Гц	С резьбой М12		Без резьбы Ø12мм	
	Па	Дб	Па	Дб
1000	54,81106	128,757	57,30402	129,1431
1250	53,08164	128,478	54,60965	128,7248
1500	52,86337	128,442	55,59657	128,8804
1750	57,93328	129,238	61,98944	129,8258
1860	34,05	124,62	52,1	128,31
2000	60,3608	129,594	64,0416	130,1086

7. Уровень шума в точке №3

Частота, Гц	С резьбой М12		Без резьбы Ø12мм	
	Па	Дб	Па	Дб
1000	54,18422	128,657	56,58643	129,0336
1250	52,13137	128,321	53,72916	128,5836
1500	51,56119	128,226	54,17883	128,656
1750	55,80306	128,913	59,59036	129,4829
1860	33,38	124,44	50,93	128,12
2000	57,86556	129,228	61,35493	129,7364

Из представленных данных видно, что наиболее эффективное шумопоглощение происходит на собственной частоте 1860 Гц.

Так же, можно отметить, что на всем ис-

следованном интервале частот конструкция с резьбовым отверстием показала лучший результат шумопоглощения по сравнению с конструкцией, имеющей гладкие отверстия. Прирост эффективности изменяется от 0,24 до 0,59 Дб. При этом лучшие результаты наблюдаются в высокочастотном диапазоне, где наиболее эффективное шумопоглощение происходит на собственной частоте 1860 Гц. На этой частоте суммарный уровень шума в конструкции, имеющей резьбовые отверстия, на 4 дБ ниже, чем в конструкции с гладкими отверстиями.

Необходимо отметить, что в данной работе исследования проводились только для одной ячейки, однако, реальные конструкции ЗПК состоят из огромного массива подобных ячеек, которые полностью покрывают внутреннюю поверхность авиационного двигателя, поэтому использование большего числа ячеек аналогичной конструкции покажет большую эффективность.

Выводы:

На основании выполненной работы сделаны следующие выводы:

1. Для достижения высокого качества входных и выходных кромок отверстий необходимо использовать твердосплавное сверло со сменной твердосплавной пластиной.

2. Для достижения большего импеданса шумопоглощения в ячейках ЗПК рекомендуется нарезание резьбы в перфорированной обшивке ЗПК.

3. Реальные конструкции ЗПК, которые покрывают внутреннюю поверхность авиадвигателя, состоят из огромного массива резонаторов, следовательно, использование большего числа ячеек аналогичной конструкции покажет большую эффективность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Халецкий, Ю.Д. ИКАО: новый стандарт на шум самолетов гражданской авиации // Двигатель. – 2014. – №2 (92). – С. 8-11.
2. Н. Meng a, b, X.H. Yang a, b, c, S.W. Ren a, b, F.X. Xin a, b, d, *, T.J. Lu a, b, ** Sound propagation in composite micro-tubes with surface-mounted fibrous roughness elements // Composites Science and Technology. – 2016. – №127. – pp. 158-170.
3. Чигринец, Е.Г. Совершенствование процесса сверления многослойных полимерных композитов типа «Стеклопластик-Титан» // Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2016. – 22 с.
4. Дударев, А.С., Свищёв, В.И. Повышение эффективности сверления отверстий в полимерных композиционных материалах // Технология машиностроения. – 2006. – №7. – С. 18-22.

5. Кустов, О.Ю., Пальчиковский, В.В. Интерферометр для высоких уровней акустического давления // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2015. – Т. 1. – С. 157-160.

6. Федотов, Е.С., Кустов, О.Ю., Храмов, И.В., Пальчиковский, В.В. Сравнительный анализ акустических интерферометров на основе расчетно-экспериментальных исследований образцов звукопоглощающих конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 48. – С. 89-103.

7. Дударев, А.С., Кустов, О.Ю., Храмов, И.В., Подвинцев, А.В. Влияние качества формообразования отверстий звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей на акустические характеристики // Авиационная промышленность. – 2017. – № 2. – С. 50-53.

8. Каталог: Инструментальные решения Sandvik Coromant Россия/СНГ. ООО «Сандвик».

9. 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.

REFERENCES

1. Khaletsky, Yu.D. ICAO: new standard for civil aircraft noise // Engine. – 2014. – No.2 (92). – pp. 8-11.
2. N. Meng a, b, X.H. Yang a, b, c, S.W. Ren a, b, F.X. Xin a, b, d, *, T.J. Lu a, b, ** Sound propagation in composite micro-tubes with surface-mounted fiber roughness elements // Composites Science and Technology. – 2016. – №127. – pp. 158-170.
3. Chigrinets, E.G. Improvement in process of drilling laminated polymeric composites of “Fiberglass-Titanium” type // Author’s Abstract in Competition for Can. Sc. Tech. Degree. – Rostov-upon-Don: DSTU, 2016. – pp. 22.
4. Dudarev, A.S., Svirshchyov, V.I. Effectiveness increase in opening drilling in polymer composites // Engineering Technique. – 2006. – No.7. – pp. 18-22.
5. Kustov, O.Yu., Palchikovskiy, V.V. Interferometer for high acoustic pressure // Aerospace Engineering, High Technologies and Innovations. – 2015. – Vol. 1. – pp. 157-160.
6. Fedotov, E.S., Kustov, O.Yu., Khrantsov, I.V., Palchikovskiy, V.V. Comparative analysis of acoustic interferometers based on computation-experimental investigations of sound absorbing structure samples // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering. – 2017. – No.48. – pp. 89-103.
7. Dudarev, A.S., Kustov, O.Yu., Khrantsov, I.V., Podvintsev, A.V. Quality impact of opening shaping in sound absorbing structures of aircraft engines upon acoustic characteristics // Aircraft Industry. – 2017. – No.2. – pp. 50-53. Instrumental Solutions of Sandvik Coromant, Russia/CIC. PP “Sandvik”.
8. Catalogue: Instrumental Solutions of Sandvik Coromant, Russia/ CIC. PP “Sandvik”.
9. Fedotov, E.S., Palchikovskiy, V.V. Investigations of Helmholtz resonator functioning in waveguide with rectangular cross section // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering. – 2014. – No.38. – pp. 107-126.

Рецензент д.т.н. В.Д. Артамонов