

DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.09

УДК 534.6:621.45

А.Г. Захаров¹, А.Н. Аношкин², В.Ф. Копьев^{2,3}

¹ АО «Пермский завод «Машиностроитель»», Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

³ Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ВИДОВ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрена новая конструкция ячеистого заполнителя, изготовленного из полимерных композиционных материалов. Заполнитель обладает высокой гибкостью в двух плоскостях и позволяет осуществлять выкладку поверхностей второго порядка большой кривизны. Ячейки заполнителя имеют большую поверхность контакта и обеспечивают высокую прочность склейки с обшивками многослойных конструкций. При использовании обшивок с перфорацией ячейки заполнителя могут выполнять функцию резонаторов Гельмгольца и обеспечивать гашение акустических колебаний. Представлены результаты технологических исследований по выбору материала для формования заполнителя. Получены оценки прочности заполнителя на поперечное сжатие. Приведены результаты акустических испытаний образцов звукопоглощающих конструкций с ячеистым заполнителем и проведено сравнение эффективности их шумогашения по сравнению с конструкциями на базе гофрового и сотового заполнителей. Разработанный заполнитель может использоваться для создания звукопоглощающих конструкций современных авиационных двигателей.

Ключевые слова: авиационный двигатель, композиционные материалы, шумопоглощение, звукопоглощающие конструкции, наполнитель, ячейки, интерферометр с потоком.

A.G. Zakharov¹, A.N. Anoshkin², V.F. Kopyev^{2,3}

¹ JSC Perm Plant «Mashinostroitel», Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³ Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, Russian Federation

INVESTIGATION OF NEW TYPES OF FILLERS FROM COMPOSITE MATERIALS FOR MULTILAYER SOUND-ABSORBING LINERS

A new design of a cellular filler made of polymer composite materials is considered. The filler has high flexibility in two planes and allows the lay-up of second degree surface of great curvature. The filler cells have a large contact surface and provide a high strength of glue joint with the lining of multilayer structures. When using lining with perforation, the filler cells can serve as Helmholtz resonators and provide damping for acoustic oscillations. The results of technological studies on the choice of the material for forming the filler are presented. The strength estimates of the filler for transverse compression are obtained. The results of acoustic tests of samples of sound-absorbing liners with a cellular filler are presented. The effectiveness of their noise reduction compared with liners based on corrugated and honeycomb core is compared. The developed filler can be used to create sound-absorbing liners for modern aircraft engines.

Keywords: aircraft engine, composite materials, noise attenuation, sound-absorbing liners, filler, cells, interferometer with flow.

В настоящее время многослойные конструкции с заполнителями широко применяются в технике и строительстве. Существует большое многообразие заполнителей, обеспечивающих различное сочетание свойств, требуемых для определенных конструкций. К числу основных свойств заполнителей относятся: низкая плотность, требуемые механические характеристики, хорошая технологичность в изготовлении и низкая себестоимость. Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) при создании заполнителей позволяет получить такие специальные свойства многослойных конструкций, как: радиопрозрачность, коррозионная стойкость, немагнитность, шумопоглощение; высокие демпфирующие свойства и т.п. Наиболее распространенными видами заполнителей из композиционных материалов являются: пористые (вспененные), сотовые (шестигранные), трубчатые и складчатые заполнители. Каждый вид обла-

дает рядом достоинств и недостатков [1–5]. Общим недостатком указанных видов заполнителей является невозможность выкладки отвержденного заполнителя на поверхность 2-го порядка.

На АО «Пермский завод «Машиностроитель»» разработана новая конструкция ячеистого заполнителя из ПКМ [6] (рис. 1), устраняющая вышеуказанный недостаток и, кроме того, обеспечивающая получение дополнительных преимуществ по сравнению с другими заполнителями. Заполнитель представляет собой панель с выдавленными в трикотажном полотне ячейками, имеющими форму усеченных пирамид. Такой заполнитель благодаря расстоянию между рядами ячеек позволяет изгибать его в двух плоскостях и выкладывать на поверхности большой кривизны. Ячейки заполнителя имеют достаточно большую поверхность контакта с оболочкой и обеспечивают высокую прочность склейки с обшивками многослойной конструкции. Кроме того, каждая ячейка при условии использования обшивки конструкции с перфорацией может выполнять функции элементарного резонатора Гельмгольца, поэтому размеры ячеек можно подобрать на основе акустических расчетов для максимального гашения звуковых колебаний на нужных частотах [7–14]. Таким образом, разработанный заполнитель эффективен для создания звукопоглощающих конструкций (ЗПК), широко используемых в современных авиационных двигателях.

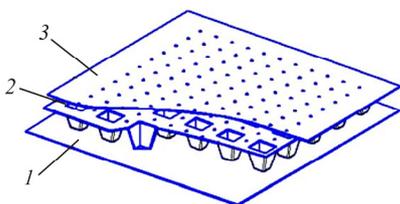


Рис. 1. Многослойная звукопоглощающая конструкция с ячеистым заполнителем из эластичного материала: 1 – силовая оболочка; 2 – ячеистый заполнитель; 3 – перфорированная оболочка

Общая конструктивная схема звукопоглощающей конструкции с ячеистым ЗПК представлена на рис. 1. Конструкция изготавливается из трех частей, образующих после сборки внутренние замкнутые полости (ячейки).

Изготовление ячеистой конструкции на рис. 1 возможно путем вытяжки чередующихся в определенном порядке усеченных пирамид в материале исходной заготовки (препреге) с использованием специального формообразующего инструмента (пресс-формы). Для изготовления разработанной конструкции заполнителя необходим исходный материал, обладающий достаточным значением удлинения по основе и по утку. Известно, что из текстильных материалов наилучшими показателями по удлинению обладают ткани трикотажного плетения.

Исследование возможности формования материала для изготовления разработанной конструкции ячеистого заполнителя проводилось на различных органических и неорганических трикотажных материалах:

- ткань капроновая трикотажного плетения эластичная ТКТЭ, артикул 56383, ТУ 17-04-08/2-458–94 (АО «Красная роза», г. Москва);
- материал углеродный трикотажный «УРАЛ-ТР-3/2», ГОСТ 28005;
- стеклотрикотажное полотно на основе кремнеземистой нити марки «Кермель» 11С6-180, ТУ 5952-153-05786904–99 (ООО ПКФ ЭКМ, г. Москва);
- трикотажный материал на основе волокна марки «Кермель», ТК ЛА-145 (ООО «Кадотекс», г. Москва);
- трикотажный материал «НьюСтар», артикул ТКЛА-275 (ООО «Кадотекс», г. Москва);
- трикотажный материал «НьюСтар», артикул ТК ИА-200 (ООО «Кадотекс», г. Москва).

Размеры высот ячеек заполнителя были выбраны аналогично существующим заполнителям для корпусных конструкций мотогондолы авиационного двигателя ПС-90А и ПД-14 [15, 16]. В процессе исследований была проведена пропитка образцов тканей связующим ЭНФБ-2М и формование образцов ячеистого заполнителя с последующей полимеризацией. Результаты формования и технические характеристики полученного заполнителя представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты формования и технические характеристики трикотажных материалов

№ п/п	Материал	Высота наполнителя			Температура эксплуатации волокон t , °С	Поверхностная плотность, гр/м ² (ГОСТ 8845–77)	Удлинение, %, при $t = 20$ °С	
		5	10	15			по основе	по утку
1	Ткань копроновая эластичная ТКТЭ, арт. 56383	+	+	+	90	200	180	300
2	Материал углеродный трикотажный «УРАЛ-ТР-3/2-10», ГОСТ 28005–88	+	–	–	1200	650	5	5
3	Стеклотрикотажное волокно	+	–	–	480	–	–	–
4	Трикотажный материал, арт. ТК ЛА-145	+	–	–	260	145	99	289
5	Трикотажный материал, арт. ТК ЛА-275	+	–	–	260	275	110,4	352
6	Трикотажный материал, арт. ТК ИА-200	+	–	–	260	200	102	192

Примечание. «+» – положительный результат формования (без нарушения целостности материала); «–» – отрицательный результат формования (разрыв материала).

Как видно из табл. 1, требуемую формуемость для создания ячеистого ЗПК обеспечивает только один из рассматриваемых материалов – ткань капроновая трикотажного плетения эластичная ТКТЭ, артикул 56383, ТУ 17-04-08/2-458–94. В процессе формования ячеистого наполнителя из других материалов (см. табл. 1) в углах вершин ячеек наполнителя возникали разрывы. На рис. 2 представлен типичный вариант разрушения материала наполнителя после формования. Локализация разрушения связана с тем, что именно по углам вершин ячеек наполнителя возникают наибольшие растягивающие деформации в формируемом материале.



Рис. 2. Образец с разрывами трикотажного материала (ткань «Кермель», арт. ТК ЛА-145) в углах ячеек в процессе формования

Для проведения исследований механических свойств ячеистого наполнителя из выбранной ткани капроновой эластичной ТКТЭ, артикул 56383, ТУ 17-04-08/2-458–94, пропитанной связующим ЭНФБ-2М, были изготовлены образцы с различными геометрическими параметрами. Значения параметров наполнителя были выбраны по аналогии с используемыми в настоящее время при создании авиационных звукопоглощающих конструкций. Общий вид образцов показан на рис. 3, геометрические параметры ячеек наполнителя для различных образцов при-

ведены в табл. 2. Испытания проводились на поперечное сжатие – характерный вид испытаний для наполнителей различного типа. Полученные зависимости перемещения от нагрузки испытанных образцов наполнителя показаны на рис. 4, пределы прочности при сжатии приведены в табл. 2.

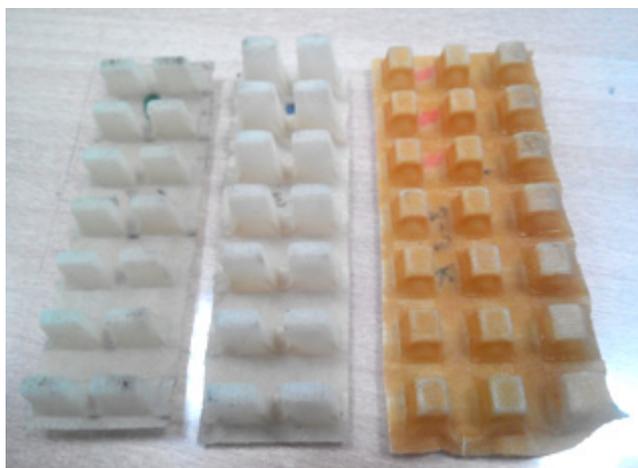


Рис. 3. Образцы наполнителей из такни ТКТЭ, арт. 56383, ТУ 17-04-08/2-458-94

Таблица 2

Характеристики образцов наполнителей из ткани ТКТЭ, арт. 56383, ТУ 17-04-08/2-458-94

№ п/п	Высота, мм	Толщина ткани, мм	Площадь среднего сечения элементарной ячейки, мм ²	Предел прочности при сжатии, МПа
1	10	0,25	66	0,63
2	10			0,68
3	18		60	0,65
4	18			0,65
5	10		70	0,76
6	10			0,67

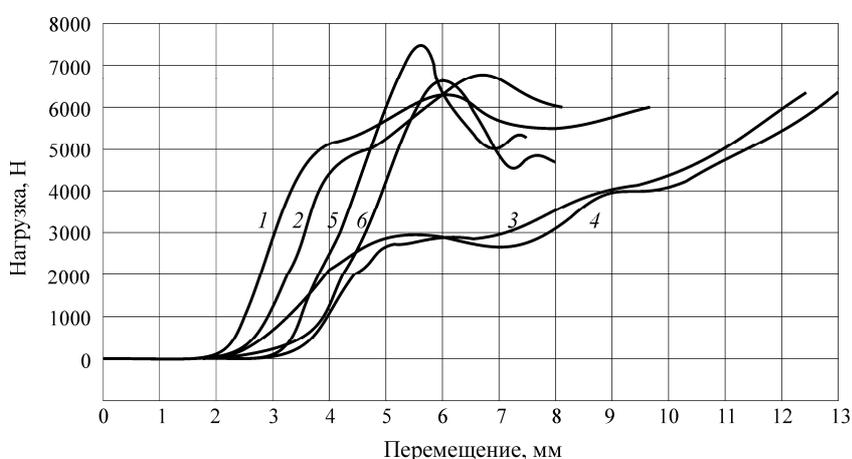


Рис. 4. Зависимости перемещения от нагрузки при поперечном сжатии ячеистого наполнителя, изготовленного из пластика на основе ткани капроновой эластичной ТКТЭ и связующего ЭНФБ-2М (цифры у кривых соответствуют номеру испытываемого образца)

Анализируя зависимости на рис. 4, можно сделать вывод, что образцы ячеистого заполнителя, имеющие большую площадь поперечного сечения, имеют большую прочность при поперечном сжатии (образцы № 5 и 6). Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что новый ячеистый заполнитель (см. рис. 1) можно формовать и изготавливать на основе ткани ТКТЭ и применять в элементах конструкции при температуре эксплуатации не более 90 °С, что связано с предельной температурой эксплуатации капроновой ткани.

Кроме силовых и температурных воздействий многослойные конструкции авиационного двигателя должны обеспечивать шумопоглощение на определенных частотах и определенных уровнях звукового давления. Для определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций на основе разработанного заполнителя были проведены испытания образцов ЗПК на установке АК-13 в ФГУП «ЦАГИ». Кроме того, для сравнения испытывались и образцы ЗПК с двумя другими типами заполнителя – ячеистым и гофрированным. Параметры образцов ЗПК принимались по аналогии с используемыми в настоящее время при создании конструкций, испытывались как двухслойные, так и однослойные ЗПК, характеристики испытываемых образцов ЗПК приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики испытываемых образцов ЗПК

№ п/п	Вариант ЗПК	H_1 , мм	H_2 , мм	F_1 , %
1	ЗПК с X-образными гофрами и промежуточным листом	10	10	10
2	ЗПК с ячеистым заполнителем	10	нет	8
3	ЗПК с сотовым заполнителем	20	нет	–

Примечание. H_1, H_2 – высота соответствующего слоя заполнителя; F_1 – площадь перфорации.

Испытания на установке «канал с потоком» проводились с использованием в качестве источника звука газоструйного излучателя с основной частотой излучения 1600 Гц при двух скоростях потока воздуха – $M = 0,325$ и $M = 0,425$. На рис. 5, 6 представлены частотные зависимости снижения шума на режимах $M = 0,325$ и $M = 0,425$, обеспечиваемые ЗПК с гофрированным, ячеистым и сотовым заполнителями (серийной ЗПК с $h = 20$ мм), а также расчетные частотные зависимости максимально возможного затухания.

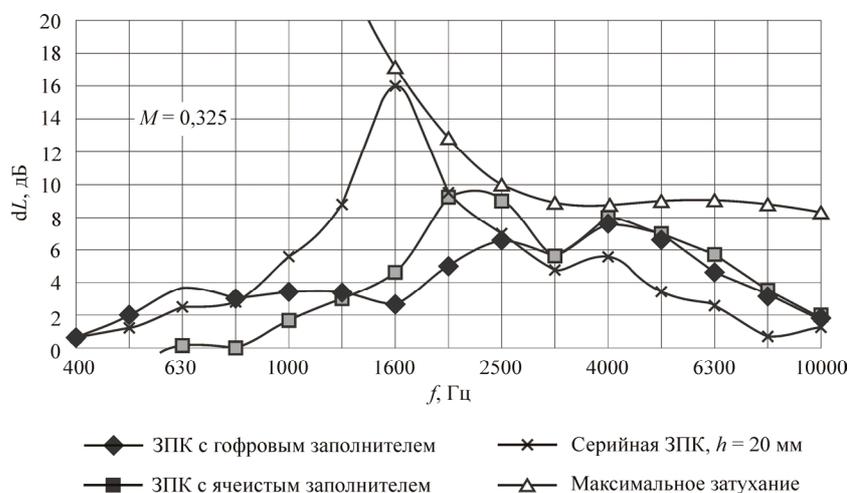


Рис. 5. Эффективность различных вариантов ЗПК при $M = 0,325$

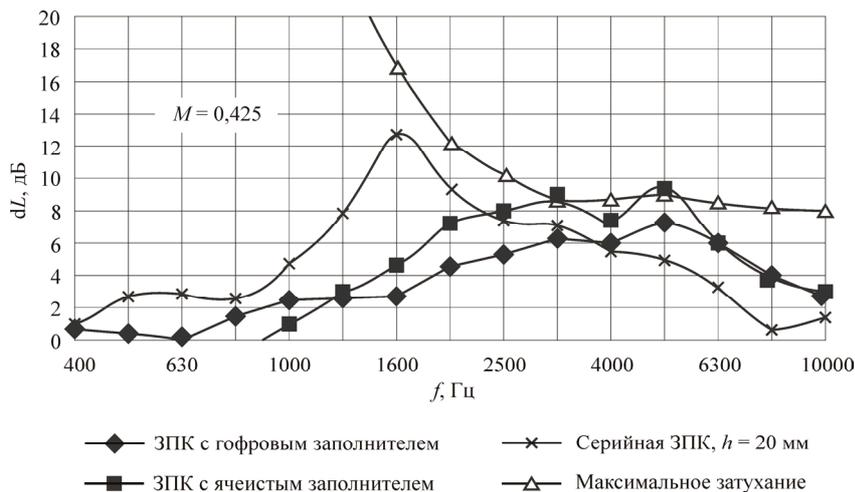


Рис. 6. Эффективность различных вариантов ЗПК при $M = 0,425$

Анализ результатов испытаний показывает, что для ЗПК с ячеистым наполнителем максимум частотной характеристики затухания находится в области высоких частот: 2000–4000 Гц при $M = 0,325$ и 2500–5000 Гц при $M = 0,425$. Причем в максимумах частотной характеристики величина затухания практически совпадает с максимально возможным затуханием для обоих значений M . Снижение уровня звукового давления для конструкций ЗПК с ячеистым наполнителем на высоких частотах несколько выше, чем для однослойной сотовой ЗПК. Однако отсутствует объяснение провалам в частотных характеристиках затухания на частотах $f = 3150$ Гц при $M = 0,325$ и $f = 4000$ Гц при $M = 0,425$. Возможно, это связано с увеличенной длиной отверстий по сравнению со стандартным перфорированным листом и, как следствие, увеличением их акустического сопротивления на этих частотах. Можно ожидать, что путем корректировки диаметра отверстий и процента перфорации можно ликвидировать такие провалы в частотной характеристике затухания. Однако эффективность шумопоглощения ЗПК с разработанным ячеистым наполнителем на частотах ниже 2000 Гц существенно ниже используемых в настоящее время сотовых ЗПК.

Эффективность двухслойной ЗПК с гофрированным наполнителем оказалась меньше рассмотренных аналогов. Эта конструкция обеспечила хорошее затухание только в области высоких частот (2500–5000 Гц), сравнимое с ячеистым ЗПК при $M = 0,325$. В области более низких частот ее эффективность оказалась значительно ниже эффективности однослойной сотовой ЗПК, несмотря на использование двух слоев гофр. Это может быть связано с тем, что второй гофрированный слой оказался выключенным из акустического процесса из-за слишком большого акустического сопротивления внутреннего листа и самих гофров, и, таким образом, шумопоглощение гофрированной ЗПК обеспечивали только первый по отношению к потоку гофрированный слой и лицевая перфорированная панель.

Итак, в статье рассмотрен новый вид ячеистого наполнителя для многослойных конструкций из ПКМ, выполненный путем вытяжки чередующихся в определенном порядке усеченных пирамид в материале исходной заготовки (препреге) с использованием специального формообразующего инструмента (пресс-формы).

Исследована возможность формования ячеистого наполнителя из различных органических и неорганических трикотажных материалов. Показано, что требуемую формуемость для создания исследуемого ячеистого ЗПК обеспечивает только один из рассматриваемых материалов – ткань капроновая трикотажного плетения эластичная ТКТЭ, артикул 56383, ТУ 17-04-08/2-458–94.

Исследовано влияние высоты и площади среднего сечения элементарной ячейки наполнителя, изготовленного из ткани ТКТЭ, на прочность при поперечном сжатии. Показано, что

образцы ячеистого заполнителя, имеющие большую площадь поперечного сечения, имеют большую прочность при поперечном сжатии.

Для определения акустических характеристик конструкций были проведены сравнительные испытания образцов с различными заполнителями на установке АК-13 в ФГУП «ЦАГИ». Показано, что для ЗПК с ячеистым заполнителем максимум частотной характеристики затухания находится в области высоких частот: 2000–4000 Гц при $M = 0,325$ и 2500–5000 Гц при $M = 0,425$. Эффективность шумоглушения при этом выше, чем у сотовых и гофровых ЗПК. В максимумах частотной характеристики ячеистых ЗПК величина снижения звукового давления практически совпадает с максимально возможной величиной для двух рассмотренных скоростей воздушного потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ по договору № 14.Z50.31.0032.

Библиографический список

1. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем: Справочник. – М.: Машиностроитель, 1991. – 272 с.
2. Штамм К., Витте Г. Многослойные конструкции / пер. с нем. Т.Н. Орешкиной; под ред. С.С. Кармилова. – М.: Стройиздат, 1983. – 300 с.
3. Гиммельфарб А.Л. Основы конструирования в самолетостроении: учеб. пособие для высш. авиац. учеб. заведений / под ред. А.В. Кожинной. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 367 с.
4. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. Кн. 2. Справочное издание / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. А.Б. Геллера, Г.Э. Кесслера, А.М. Кнебельмана, под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 584 с.
5. Иванов А.А., Кашин С.М., Семенов В.И. Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 436 с.
6. Способ изготовления звукопоглощающей конструкции газового тракта: пат. 2247878 Рос. Федерация: МПК F16F 1/00 / Покатаев К.А., Ломаев В.И., Сироткин А.К., Захаров Г.Я.; заявитель и патентообладатель ФГУП «Пермский завод «Машиностроитель»». – № 2003100457/11, 05.01.2003; опубл. 10.03.2005, Бюл. № 7.
7. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций / А.Н. Аношкин, А.Г. Захаров, Н.А. Городкова, В.А. Чурсин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 1. – С. 5–20.
8. Gaeta R.J., Ahuja K.K. A tunable acoustic liner // AIAA Paper. – № 98-2298.
9. Parrott T.L., Jones M.G. Parallel-element liner impedances for improved absorption of broadband sound in ducts // Noise Control Eng. J. – 1995. – Vol. 43(6).
10. Городкова Н.А. Аналитическое определение резонансных частот многослойных звукопоглощающих конструкций // Защита населения от повышенного шумового воздействия. – СПб., 2011.
11. 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.
12. 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.
13. Соболев А.Ф. О повышении затухания звука в канале с облицовкой локально реагирующего типа при наличии потока // Акустический журнал. – 1994. – Т. 40, № 5. – С. 837–843.
14. Соболев А.Ф. Повышение эффективности снижения шума в канале с потоком при наличии звукопоглощающих облицовок // Акустический журнал. – 1999. – Т. 45, № 3. – С. 404–414.
15. Эксплуатационный ресурс стеклопластикового кожуха сопла авиационного газотурбинного двигателя / С.М. Рубцов, А.Н. Аношкин, А.А. Ташкинов, В.Е. Шавшуков // Конструкции из композиционных материалов. – 2007. – № 3. – С. 11–17.
16. Рубцов С.М. Полимерные волокнистые композиты в конструкции турбовентиляторного авиационного двигателя ПС-90А // Конверсия в машиностроении. – 2007. – № 3. – С. 19–26.

References

1. Panin V.F., Gladkov Yu.A. *Konstruktsii s zapolnitelem: Spravochnik* [Structures with fillers. Reference book]. Moscow, Mashinostroitel, 1991, 272 p.
2. Shtamm K., Vitte G. *Mnogosloynnye konstruktsii* [Multilayer structures]. Moscow, Sroyizdat, 1983, 300 p.
3. Gimmelfarb A.L. *Osnovy konstruirovaniya v samoletostroenii* [The fundamentals of designing in aircraft construction]. Moscow, Mashinostroenie, 1980, 367 p.
4. Lyubin Dzh. *Spravochnik po kompozitsionnym materialam* [Handbook on composite materials]. Moscow, Mashinostroenie, 1988, 584 p.
5. Ivanov A.A., Kashin S.M., Semenov V.I. *Novoe pokolenie sotovykh zapolniteley dlya aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki* [New generation of honeycombs for aerospace engineering]. Moscow, Energoatomizdat, 2000, 436 p.
6. Pokataev K.A., Lomaev V.I., Sirotkin A.K., Zakharov G.Ya. *Sposob izgotovleniya zvukopogloshchayushchey konstruktsii gazovogo trakta* [Method for manufacture of sound-proofing construction for gas tract]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 2247878 (2005).
7. Anoshkin A.N., Zakharov 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]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 5-20.
8. Gaeta R.J., Ahuja K.K. *A tunable acoustic liner*. *AIAA Paper*, 1998, no. 98-2298.
9. Parrott T.L., Jones M.G. *Parallel-element liner impedances for improved absorption of broadband sound in ducts*. *Noise Control Eng. J.*, 1995, vol. 43 (6).
10. Gorodkova N.A. *Analiticheskoe opredelenie rezonansnykh chastot mnogosloynnykh zvukopogloshchayushchikh konstruktsii* [Analytical determination of the resonance frequencies of multilayer sound absorbing structures]. *Protecting the public from high noise exposure*. Saint-Petersburg, 2011.
11. Baklanov V.S., Postnov S.S., Postnova E.A. *Raschet rezonansnykh zvukopogloshchayushchikh konstruktsiy dlya sovremennykh aviatsionnykh dvigateley* [Calculation of sound absorbing structures for modern aircraft engines]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2007, vol. 19, no. 8, pp. 22-30.
12. Munin A.G. *Aviatsionnaya akustika. Chast 1.* [Aviation acoustics. Part 1]. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 243 p.
13. Sobolev A.F. *O povyshenii zatukhaniya zvuka v kanale s oblitsovkoym lokalnoreagiruyushchego tipa pri nalichii potoka* [On increase of sound scattering in dust with locally reacting line at flow presence]. *Acusticheskij zhurnal*, 1994, vol. 40, no. 5, pp. 837-843.
14. Sobolev A.F. *Povyshenie effektivnosti shizheniya shuma v kanale s potokom pri nalichii zvukopogloshchayushchikh oblitsovok* [Increase of efficiency of noise reduction in duct line by sound-absorbing structures at flow presence]. *Acusticheskij zhurnal*, 1999, vol. 45, no. 3, pp. 404-414.
15. Rubtsov S.M., Anoshkin A.N., Tashkinov A.A., Shavshukov V.E. *Ekspluatatsionnyy resurs stekloplastikovogo kozhukha sopla aviatsionnogo gazoturbinnogo dvigatelya* [Operation life of fiberglass nozzle casing of turbofan aircraft engine]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2007, no. 3, pp. 11-17.
16. Rubtsov S.M. *Polimernye voloknistye kompozity v konstruktsii turboventilyatornogo aviatsionnogo dvigatelya PS-90A* [Polymer fibrous composites in turbofan aircraft engine PS-90A]. *Konversiya v mashinostroenii*, 2007, no. 3, pp. 19-26.

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).

Копьев Виктор Феликсович (Москва, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, начальник аэроакустического отделения (НИО-9) Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского (105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, e-mail: vkorpiev@tsagi.ru); научный руководитель лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

About the authors

Alexei G. Zakharov (Perm, Russian Federation) – Chief Designer, JSC 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).

Victor F. Kopiev (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Aeroacoustics Department, Central Aerohydrodynamic Institute (17, Radio st., Moscow, 105505, Russian Federation, e-mail: vkopiev@tsagi.ru); Head of Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Получено 15.11.2017