



УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-9-9

**ПОРИСТОВОЛОКНИСТЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ ЗПК
И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

М.М. Платонов

кандидат химических наук

Г.Ф. Железина

кандидат технических наук

Т.А. Нестерова

Июнь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-9-9

М.М. Платонов¹, Г.Ф. Железина¹, Т.А. Нестерова¹

ПОРИСТОВОЛОКНИСТЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ ЗПК И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Рассмотрены вопросы создания и исследования акустических характеристик разработанных во ФГУП «ВИАМ» звукопоглощающих пористоволокнистых материалов ВТИ-7 и ВТИ-12 на основе нетканых полотен для пористых градиентных звукопоглощающих конструкций (ЗПК).

Ключевые слова: *звукопоглощающие конструкции (ЗПК), пористоволокнистые материалы, коэффициент звукопоглощения, установка «Канал с потоком».*

M.M. Platonov, G.F. Zhelezina, T.A. Nesterova

POROUS FIBROUS POLYMER MATERIALS FOR WIDE RANGE SOUND ABSORBING STRUCTURES AND INVESTIGATION OF THEIR ACOUSTICAL PROPERTIES

This paper deals with problems of creating and investigation of acoustical characteristics of nonwoven cloth based porous fibrous sound absorbing materials VTI-7 and VTI-12 developed by «VIAM» for porous gradient sound absorbing structures (SAS).

Keywords: *sound absorbing structures (SAS), porous fibrous materials, sound absorption coefficient, «channel with flow» line.*

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Проблема снижения авиационного шума при взлете, наборе высоты и посадке самолета является одной из основных экологических проблем защиты окружающей среды от воздействия авиации и занимает центральное место в деятельности международных экологических и авиационных организаций. Решения КАЕП ИКАО, принятые в феврале 2013 г., существенно ужесточили международные экологические требования, предъявляемые к авиационной технике, в частности – нормы по шуму самолетов на местности.

Нормируемым параметром является максимальное значение эффективного уровня воспринимаемого шума (effective perceived noise level), измеряемое в децибелах – EPN dB. Основным источником шума двигателей с высокой степенью двухконтурности на всех режимах работы является вентилятор, генерирующий излучение с дискретными и непрерывными по частоте спектрами в интервале 0–10 кГц. Общий уровень фронтального и тылового шума при взлете самолета с двухконтурной силовой установкой составляет ~120 EPN dB на высоте 120 м.

Основными составляющими звукового спектра вентилятора являются гармоники частоты следования рабочих лопаток, образующиеся при их взаимодействии с аэродинамическим потоком, и более низкочастотные гармоники ротора, связанные с появлением скачков уплотнения на передних кромках лопаток рабочего колеса и в межлопаточных каналах [1]. Гармоническое излучение вентилятора обладает отчетливо выраженной направленностью, при этом максимум интенсивности для гармоник роторной частоты отмечен в передней полусфере в направлении 40–60 град относительно оси самолета, для гармоник частоты следования – в направлениях 40–60 град и 110–120 град.

Современная технология снижения шумности нагнетательной секции двухконтурной силовой установки представляет собой единый комплекс активных (следует отличать от активных электронных средств подавления шума) и пассивных мероприятий. Активные технологии нацелены на улучшение аэродинамики входной части, рабочего колеса и каналов вентилятора и способны обеспечить снижение шума на неспецифических частотах на величину до 10 EPN dB.

Пассивные способы снижения шума вентилятора и двигателя в целом связаны с использованием в газоздушных каналах различного рода звукопоглощающих конструкций (ЗПК), структура которых оптимизирована для поглощения и гашения специфических звуковых частот. Степень снижения шума зависит от общей площади ЗПК и акустической эффективности ЗПК в каждой температурной зоне двигателя. Применение ЗПК на двигателе позволяет снизить акустическую эмиссию на ~20 EPN dB.

В авиастроении находят применение ЗПК следующего строения: резонансные однослойные, резонансные многослойные и пористые градиентные.

Однослойные ЗПК резонансного типа относятся к звукопоглощающим конструкциям первого поколения. В состав таких конструкций входят следующие элементы: входная перфорированная панель, резонансный наполнитель высотой 15–25 мм и непроницаемое жесткое основание. Однослойные ЗПК работают в условиях высоких уровней звука (до 150–160 дБ) и высокоскоростного потока (число Маха $Ma=0,3-0,5$).

Геометрические параметры резонансных ЗПК (высота резонансного заполнителя, процент перфорации, диаметр отверстий, толщина лицевой панели) выбирают таким образом, чтобы обеспечить максимальное снижение шума на частоте следования лопаток рабочего колеса вентилятора ($1,5 < f < 3,0$ кГц) [2, 3]. В качестве резонансного заполнителя могут быть использованы стеклопластиковые или металлические соты, гофрированные, ячеистые и другие объемные заполнители из различных материалов. Основной эксплуатационный недостаток однослойных резонансных ЗПК – это возможность гашения шума только в узкой полосе частот (1500–3000 Гц). Кроме того, акустические характеристики таких конструкций (коэффициент звукопоглощения и импеданс) в значительной степени зависят от уровня воздействующего на конструкцию звукового давления и, следовательно, могут изменяться в зависимости от режима работы двигателя.

Расширение диапазона звукопоглощения и повышение эффективности резонансных ЗПК может быть достигнуто путем использования многослойных ЗПК, содержащих несколько слоев резонансного заполнителя, каждый из которых обеспечивает звукопоглощение в определенной полосе частот. Известны различные конструктивно-технологические решения, позволяющие повысить эффективность звукопоглощения многослойных резонансных ЗПК. Значительное повышение эффективности звукопоглощения может быть достигнуто путем использования в составе многослойных резонансных ЗПК слоев из воздухопроницаемых волокнистых материалов, обеспечивающих поглощение звуковой энергии.

Новым и перспективным направлением по снижению шума авиационных двигателей является разработка пористых материалов градиентного типа для широкополосных гомогенных ЗПК с полосой звукопоглощения, охватывающей всю область звуковых частот. В принцип построения таких конструкций заложена изменяемая по глубине ЗПК плотность материалов. Так, входные слои гомогенно градиентной ЗПК должны отличаться пониженной плотностью с целью согласования волновых характеристик материала и снижения доли отраженной от поверхности ЗПК звуковой энергии. При распространении в глубь ЗПК акустическая волна должна попадать в слои с более высокой плотностью, вследствие чего потери при распространении звука будут увеличиваться, и за счет диссипативных потерь (потерь на трение при колебаниях в структуре материала) звуковая энергия будет эффективно снижаться. Градиентный материал сочетает в себе такие свойства, как низкое отражение звука от своей поверхности и высокие акустические потери внутри материала, что практически недостижимо на материа-

лах с постоянными по объему физическими параметрами [4]. Основным компонентом для градиентных ЗПК являются пористоволокнистые материалы.

Пористоволокнистые полимерные материалы представляют собой композиты на основе волокнистых нетканых полотен из полиэфирных, полиамидных, полиоксадиазольных, арамидных или других волокон с полимерным связующим [5–9]. Пористоволокнистые полимерные материалы могут быть использованы в качестве компонентов ЗПК, работающих до температуры 300°C. При более высоких температурах используются пористоволокнистые материалы из металлических волокон [10–19].

В данной статье приведены сведения о разработанных в ВИАМ пористоволокнистых полимерных звукопоглощающих материалах.

Разработан и паспортизован звукопоглощающий пористоволокнистый материал марки ВТИ-7 на основе волокон полиоксадиазола и кремнийорганического связующего. Свойства материала представлены в табл. 1. Материал изготавливают методом прямого прессования на ограничительных упорах.

Таблица 1

Свойства звукопоглощающего полимерного пористоволокнистого материала марки ВТИ-7

Свойства	Значения свойств
Плотность, г/см ³	0,19–0,36
Поверхностная плотность, г/м ²	500±100
Разрывная нагрузка полоски шириной 50 мм, Н:	
– по длине	470
– по ширине	590
Коэффициент звукопоглощения (толщина образца 5±0,5 мм) в диапазоне частот 1000–5000 Гц, отн. ед.	0,6–1,0
Максимальная температура эксплуатации, °С	200
Горючесть	Трудногорящий

Материал ВТИ-7 устойчив к воздействию влаги: уровень сохранения механических свойств материала составляет 67% после выдержки в камере тропического климата в течение 2 мес и 85% – после выдержки в условиях повышенной влажности ($\phi=98\%$, 30 сут). Акустические свойства материала ВТИ-7 также стабильны при действии на материал климатических факторов. Коэффициент звукопоглощения материала составляет 0,6–1,0 после выдержки в следующих условиях:

- при температуре 200°C в течение 1000 ч (диапазон частот 1000–5000 Гц);
- в камере тропического климата в течение 3 мес (диапазон частот 800–4800 Гц);
- после термоциклирования – 30 циклов при температуре от -60 до +200°C (диапазон частот 1000–5000 Гц);
- в условиях повышенной влажности в течение 30 сут (диапазон частот 1000–4800 Гц).

Материал ВТИ-7 рекомендован для изготовления сотовых многослойных ЗПК в качестве разделительных слоев между сотовыми заполнителями и как звукопоглощающий слой, используемый взамен сот. Толщина слоя из материала ВТИ-7 выбирается в соответствии с требованиями к акустическим характеристикам ЗПК.

В табл. 2 представлены акустические характеристики модельных образцов ЗПК различной структуры на основе сочетания материала ВТИ-7 с стеклосотопластом ССП-1-8Э.

Таблица 2

Акустические характеристики модельных образцов звукопоглощающих конструкций (ЗПК) с использованием материала ВТИ-7

Состав и структура ЗПК	Коэффициент звукопоглощения, отн. ед.	Диапазон частот, Гц
Однослойная ЗПК – ВТИ-7+стеклосотопласт ССП-1-8Э толщиной, мм:		
25	0,8	1250–5000
30	0,8	1100–3500
Двухслойная ЗПК – ВТИ-7+стеклосотопласт ССП-1-8Э толщиной 10 и 20 мм	0,9	1250–5000

Акустические характеристики модельных образцов ЗПК зависят от степени перфорации входного слоя. Образцы со степенью перфорации от 5,3 до 8,5% имеют коэффициент звукопоглощения 0,8 в области низких частот (850–2250 Гц). Увеличение степени перфорации до 10% приводит к смещению максимального коэффициента звукопоглощения в диапазон высоких частот – от 1900–5000 кГц.

На рис. 1 представлены результаты испытаний ЗПК, проведенных ГОСНИЦ ЦАГИ на установке «Канал с потоком», по режимам, имитирующим работу двигателя ПС-90А.

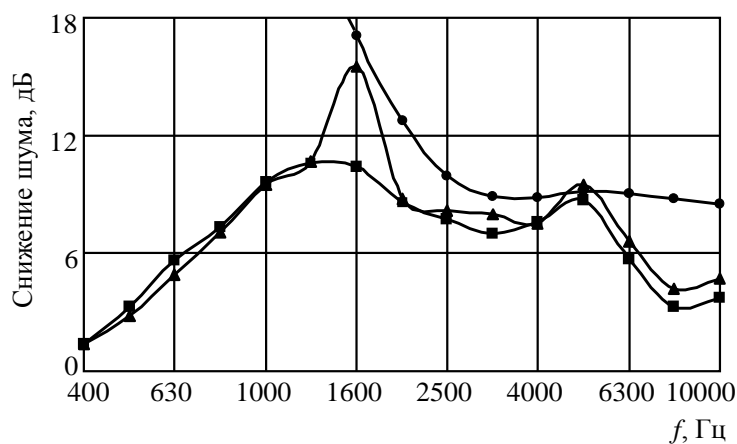


Рисунок 1. Акустическая эффективность звукопоглощающих конструкций на основе материала ВТИ-7 при $Ma=0,425$:

■ – вариант 1; ▲ – вариант 2; ● – максимальное затухание

Испытаны ЗПК двух типов:

– резонансная двухслойная ЗПК (с двумя слоями резонансного заполнителя), содержащая следующие элементы – входной слой из металлической сетки марки С-450, стеклосоты высотой 20 мм, 2 слоя материала ВТИ-7 (плотность 0,19–0,21 г/см³), стеклосоты высотой 10 мм, заполненные материалом ВТИ-7 (вариант 1);

– комбинированная резонансно-градиентная ЗПК, в которой взамен одного слоя резонансного сотового заполнителя использовали шесть слоев материала ВТИ-7 общей толщиной 10 мм (вариант 2).

Результаты акустических испытаний показали, что ЗПК на основе пористоволокнистого полимерного композиционного материала ВТИ-7 имеют широкую полосу поглощения шума. Диапазон частот, в котором происходит эффективное звукопоглощение (снижение шума на 8–10 дБ), составляет 1000–5000 Гц, т. е. более двух октав. При этом ЗПК градиентного типа (вариант 2) обеспечивает на частотах 1,6 и 5 кГц максимально возможное затухание звука – на 16 и 9 дБ соответственно. Акустические характеристики градиентной ЗПК на основе материала ВТИ-7, полученные экспериментальным путем, приближаются к расчетным значениям снижения шума.

На рабочую температуру 300°С разработан и паспортизован звукопоглощающий пористоволокнистый материал марки ВТИ-12 на основе нетканого полотна из полиимидных волокон и полиимидного связующего СП-97с. Свойства материала представлены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства звукопоглощающего пористоволокнистого материала марки ВТИ-12

Свойства	Значения свойств
Плотность, г/см ³	0,23±0,05
Поверхностная плотность, г/м ²	600±100
Разрывная нагрузка полоски шириной 50 мм, Н:	
– по длине	470
– по ширине	590
Коэффициент звукопоглощения (2 слоя, суммарная толщина образца 3,2±0,5 мм) в диапазоне частот 1,5–5 кГц, отн. ед.	0,60–0,99
Максимальная температура эксплуатации, °С	300 (1000 ч)
Горючесть	Самозатухающий

Материал ВТИ-12 изготавливают методом прямого прессования на ограничительных упорах. Предварительно проводят пропитку нетканого материала из полиимидных волокон полиимидным связующим СП-97с с последующей сушкой. Прессовое формование материала проводят по ступенчатому режиму с максимальной температурой нагрева 300°С.

Материал ВТИ-12 устойчив к термостарению при температуре 300°C. Коэффициент звукопоглощения двухслойных образцов после термостарения при температуре 300°C в течение 1000 ч составил 0,60–0,81 (в диапазоне частот соответственно 1580–3700 Гц). Коэффициент звукопоглощения трехслойного образца после термостарения при температуре 300°C в течение 1000 ч составил 0,6–0,8 (в диапазоне частот соответственно 1400–4200 Гц).

Прочность материала ВТИ-12 сохраняется на уровне 70% после термостарения при 300°C в течение 1000 ч. Удлинение при разрыве после термостарения материала не изменяется.

На материал ВТИ-12 разработана документация: ТУ 1.595-9-932–2006 и ТР 1.595-9-641–2006 «Изготовление звукопоглощающего материала марки ВТИ-12».

Исследовано влияние высоты ЗПК на коэффициент звукопоглощения образцов, состоящих из материала ВТИ-12 и стеклосот высотой 5, 10, 20, 25 и 30 мм. Установлено, что увеличение высоты ЗПК приводит к увеличению значения коэффициента звукопоглощения на низких частотах, а на высоких частотах коэффициент звукопоглощения практически не зависит от высоты ЗПК (табл. 4).

Таблица 4

**Акустические характеристики звукопоглощающих конструкций (ЗПК)
на основе материала ВТИ-12 и стеклосотового заполнителя**

Высота сотового заполнителя, мм	Коэффициент звукопоглощения, отн. ед., в диапазоне частот, Гц	
	500–1600	2000–6300
Без заполнителя	0,18–0,82	0,91–0,89
5	0,24–0,93	0,97–0,93
10	0,33–0,97	0,96–0,96
20	0,51–0,96	0,92–0,96
25	0,59–0,94	0,89–0,91
30	0,66–0,92	0,87–0,90

На установке «Канал с потоком» при скорости звука $Ma=0,325$ в диапазоне частот 500–10000 Гц в ГОСНИЦ ЦАГИ испытаны четыре комплекта ЗПК:

– входной слой в виде перфорированного листа толщиной 0,8 мм и перфорацией 8%, стеклосотопласт высотой 20 мм со стороной ячейки 8 мм, сетка марки С-450, стеклосотопласт высотой 10 мм со стороной ячейки 3,5 мм, 4 слоя материала ВТИ-12 (вариант 1);

– входной слой в виде перфорированного листа толщиной 0,8 мм и перфорацией 8%, стеклосотопласт высотой 5 мм со стороной ячейки 8 мм, сетка марки С-450, стеклосотопласт высотой 20 мм со стороной ячейки 3,5 мм, 3 слоя пористоволокнистого материала марки ВТИ-12 (вариант 2);

– входной слой в виде перфорированного листа толщиной 0,8 мм и перфорацией 8%, стеклосотопласт высотой 5 мм со стороной ячейки 8 мм, сетка марки С-450, стеклосотопласт высотой 15 мм со стороной ячейки 3,5 мм, 3 слоя пористоволокнистого материала марки ВТИ-12 (вариант 3);

– входной слой в виде сетки марки С-450, стеклосотопласт высотой 20 мм со стороной ячейки 8 мм, 3 слоя пористоволокнистого материала марки ВТИ-12 (вариант 4).

Результаты исследований показали (рис. 2), что ЗПК на основе стеклосотопласта и материала ВТИ-12 обеспечили широкую полосу поглощения звука. Снижение шума на 8–10 дБ наблюдается в диапазоне частот от 800 до 5000 Гц, что составляет две с половиной октавы. При этом на отдельных частотах из данного частотного диапазона обеспечивается максимально возможное затухание (близкое к расчетному значению).

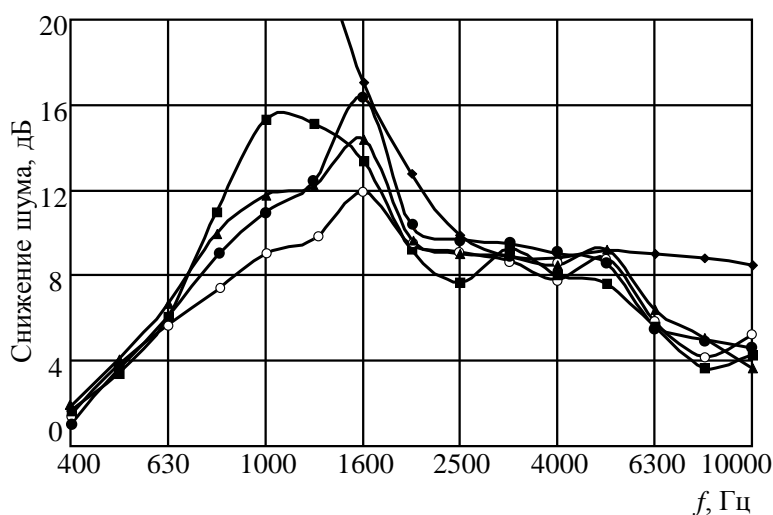


Рисунок 2. Акустическая эффективность звукопоглощающих конструкций на основе сотопластов и трехслойного композиционного материала ВТИ-12 при $Ma=0,325$:

■ – вариант 1; ▲ – вариант 2; ● – вариант 3; ○ – вариант 4; ◆ – максимальное затухание

Комплекты трехслойных конструкций 1, 2 и 3 имеют звуковую эффективность на 10–15% выше по сравнению со звуковой эффективностью двухслойной конструкции (комплект 4). Структура ЗПК комплекта 3 обеспечила высокую звуковую эффективность: 16 дБ при частоте 1600 Гц, что указывает на оптимальное соотношение высоты и размера ячейки стеклосотопласта в конструкции. Эффективность комплекта 4 на частоте 1600 Гц оказалась ниже, чем у комплектов 1, 2 и 3; на остальных частотах эффективность не ниже 10–8 дБ в области частот 1000–5000 Гц соответственно. Комплект 3 имеет звуковую эффективность не ниже 5 дБ в диапазоне частот 800–10000 Гц.

Таким образом, разработаны пористоволокнистые материалы, имеющие высокие коэффициенты звукопоглощения 0,6–1 в диапазоне частот 1–5 кГц, которые в составе

ЗПК в диапазонах частот 1,3–5 кГц обеспечивают акустическую эффективность, сопоставимую с максимально возможным затуханием (близким к расчетному значению).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сипатов А.М., Чухланцева Н.О., Усанин М.В. Анализ акустических характеристик вентиляторной ступени авиационного двигателя //Интеллектуальные системы в производстве. 2007. №1(9). С. 62–72.
2. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью //Акустический журнал. 2007. Т. 53. №6. С. 861–872.
3. Соболев А.Ф., Ушаков В.Г., Филиппова Р.Д. Звукопоглощающие конструкции гомогенного типа для каналов авиационных двигателей //Акустический журнал. 2009. Т. 55. №6. С. 749–759.
4. Железина Г.Ф., Бейдер Э.Я., Раскутин А.Е., Мигунов В.П., Столянков Ю.В. Материалы для звукопоглощающих конструкций самолетов //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №4. С. 12–16.
5. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Максимов В.Г., Бабашов В.Т. Звукотеплоизолирующий материал градиентной структуры ВТИ-22 //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 47–49.
6. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
7. Кондрашов Э.К., Кузьмин В.В., Минаков В.Т., Пономарева Е.А. Нетканые материалы на основе термостойких полимерных волокон и межплиточные уплотнения //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 51–55.
8. Сытый Ю.В., Кислякова В.И., Сагомонова В.А., Антюфеева Н.В. Перспективный вибропоглощающий материал ВТП-3В //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 47–49.
9. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
10. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П. Изготовление пористоволокнистого материала сверхнизкой плотности для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 26–30.
11. Sun F.G., Chen H.L., Wu J.H., Feng K. Sound absorbing characteristics of fibrous metal materials at high temperatures //Appl. Acoust. 2010. V. 711. P. 221–235.

12. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П. Исследование основных эксплуатационных свойств нового класса уплотнительных материалов для проточного тракта ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 15–20.
13. Мигунов В.П., Ломберг Б.С. Пористоволокнистые металлические материалы для звукопоглощающих и уплотнительных конструкций /В сб.: 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 270–275.
14. Серов М.М., Борисов Б.В. Получение металлических волокон и пористых материалов из них методом экстракции висящей капли расплава //Технология легких сплавов. 2007. №3. С. 62–65.
15. Борисов Б.В. Разработка технологии получения волокон и пористых материалов из жаростойких сплавов методом экстракции висящей капли расплава: Автореф. дис. к.т.н. М.: МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского. 2011. 19 с.
16. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л. Пористоволокнистый материал сверхнизкой плотности на основе металлических волокон //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 38–41.
17. Zhengping X., Jilei Z., Huiping T., Qingbo A., Hao Z., Jianyong W., Cheng L. Progress of application researches of porous fiber metals //Materials. 2011. №4. P. 816–824.
18. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157–167.
19. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.

REFERENCES LIST

1. Sipatov A.M., Chuhlanceva N.O., Usanin M.V. Analiz akusticheskikh harakteristik ventiljatornoj stupeni aviacionnogo dvigatelja [Analysis of the acoustic characteristics of the aircraft engine fan stage] //Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2007. №1(9). S. 62–72.
2. Sobolev A.F. Polujempiricheskaja teorija odnoslojnyh sotovyh zvukopogloshhajushhih konstrukcij s licevoj perforirovannoj panel'ju [Semi-empirical theory of single-walled sound-cell with a perforated front panel] //Akusticheskij zhurnal. 2007. T. 53. №6. S. 861–872.

3. Sobolev A.F., Ushakov V.G., Filippova R.D. Zvukopogloshhajushhie konstrukcii gomogenogo tipa dlja kanalov aviacionnyh dvigatelej [Absorbing structure homogeneous type of aircraft engines for channels] //Akusticheskij zhurnal. 2009. T. 55. №6. S. 749–759.
4. Zhelezina G.F., Bejder Je.Ja., Raskutin A.E., Migunov V.P., Stoljankov Ju.V. Materialy dlja zvukopogloshhajushhih konstrukcij samoletov [Materials for sound aircraft design] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2012. №4. S. 12–16.
5. Sytyj Ju.V., Sagomonova V.A., Maksimov V.G., Babashov V.T. Zvukoteploizolirujushhij material gradientnoj struktury VTI-22 [Sound thermal insulation material gradient structure VTI-22] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 47–49.
6. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija shestogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product "Buran" - innovative solutions forming the sixth technological order] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 3–9.
7. Kondrashov Je.K., Kuz'min V.V., Minakov V.T., Ponomareva E.A. Netkanye materialy na osnove termostojkih polimernyh volokon i mezhplichtnye uplotnenija [Nonwovens based heat-resistant polymeric fibers and seals between tile] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 51–55.
8. Sytyj Ju.V., Kisljakova V.I., Sagomonova V.A., Antjufeeva N.V. Perspektivnyj vibropogloshhajushhij material VTP-3V [Promising vibration absorbing material VTP-3V] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 47–49.
9. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry aviation materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
10. Farafonov D.P., Migunov V.P. Izgotovlenie poristovoloknistogo materiala sverhnizkoj plotnosti dlja zvukopogloshhajushhih konstrukcij aviacionnyh dvigatelej [Porous and fibrous material manufacture ultra-low density for sound-Engine Aircraft] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 26–30.
11. Sun F.G., Chen H.L., Wu J.H., Feng K. Sound absorbing characteristics of fibrous metal materials at high temperatures //Appl. Acoust. 2010. V. 711. R. 221–235.
12. Migunov V.P., Farafonov D.P. Issledovanie osnovnyh jekspluacionnyh svojstv novogo klassa uplotnitel'nyh materialov dlja protochnogo trakta GTD [Investigation of the basic operational properties of a new class of materials for sealing the flow path GTE] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 15–20.

13. Migunov V.P., Lomberg B.S. Poristovoloknistye metallicheskie materialy dlja zvukopogloshhajushhih i uplotnitel'nyh konstrukcij [Porous and fibrous metallic materials for sound and sealing structures] /V sb.: 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 270–275.
14. Serov M.M., Borisov B.V. Poluchenie metallicheskih volokon i poristyh materialov iz nih metodom jekstrakcii visjashhej kapli rasplava [Preparation of metallic fibers and porous material of which the hanging drop method of extraction of the melt] //Tehnologija legkih splavov. 2007. №3. S. 62–65.
15. Borisov B.V. Razrabotka tehnologii poluchenija volokon i poristyh materialov iz zharostojkih splavov metodom jekstrakcii visjashhej kapli rasplava [Development of technology for fibers and porous materials of the heat-resistant alloys by melt extraction drop hanging]: Avtoref. dis. k.t.n. M.: MATI–RGTU im. K.Je. Ciolkovskogo. 2011. 19 s.
16. Migunov V.P., Farafonov D.P., Degovec M.L. Poristovoloknistyj material sverhnizkoj plotnosti na osnove metallicheskih volokon [Porous and fibrous material based on the ultra-low density of metal fibers] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 38–41.
17. Zhengping X., Jilei Z., Huiping T., Qingbo A., Hao Z., Jianyong W., Cheng L. Progress of application researches of porous fiber metals //Materials. 2011. №4. P. 816–824.
18. Antipov V.V. Strategija razvitija titanovyh, magnievyh, berillievyh i aljuminievyh splavov [Development strategy of titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 157–167.
19. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 7–17.