

УДК 678.8

Г.Ф. Железина¹, Н.А. Соловьева¹, К.В. Макрушин¹, Л.С. Рысин²

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЫЛЕЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА
ПЕРСПЕКТИВНОГО ВЕРТОЛЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63

Приведены сведения о свойствах полимерных композиционных материалов для пылезащитного устройства (ПЗУ) вертолетного двигателя, а также результаты стендовых испытаний изготовленного из полимерных композиционных материалов лямбда-образного пылезащитного устройства в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации вертолетов. Применение полимерных композиционных материалов в конструкции пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя позволит улучшить весовые и эксплуатационные характеристики ПЗУ.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углепластик, органопластик, пылезащитное устройство, вертолетный двигатель.

G.F. Zhelezina¹, N.A. Solovieva¹, K.V. Makrushin¹, L.S. Risin¹

**POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR
MANUFACTURING ENGINE AIR PARTICLE SEPARATION
OF ADVANCED HELICOPTER ENGINE**

In the article information on properties of polymer composite materials for engine air particle separation (EAPS) of helicopter engine and bench test results of lambda shaped engine air particle separation, which was made of polymer composite materials, in conditions close to the real operating conditions of helicopters is given. Application of polymer composite materials in construction of engine air particle separation of advanced helicopter engine will allow improving their weight and protective characteristics.

Keywords: polymer composite material, carbon fiber reinforced plastic, organoplastic, engine air particle separation, helicopter engine.

¹Федеральное 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

²Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова» [State research center of the Russian Federation Federal state unitary enterprise «P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development»]; e-mail: info@ciam.ru

Введение

Важным требованием, предъявляемым к современной вертолетной технике, является сохранение ее работоспособности в условиях повышенной запыленности, возникающей вследствие природных факторов или техногенных чрезвычайных ситуаций. Для того чтобы сохранить работоспособность вертолетов в условиях повышенной запыленности, необходимо защитить двигатель от попадания твердых частиц, способных вызывать его повреждение. С этой целью используются пылезащитные устройства (ПЗУ), которые устанавливаются перед входным устройством вертолетного двигателя для очистки воздуха, попадающего в двигатель.

В настоящее время наиболее эффективными ПЗУ для вертолетных двигателей считаются ПЗУ

лямбда-образного типа, в конструкции которых отсутствуют лопаточные устройства – вентиляторы. Очистка воздуха от пыли в лямбда-образном ПЗУ осуществляется за счет их собственной геометрической формы, обеспечивающей движение частиц пыли в заданном направлении с последующим выбросом в атмосферу (рис. 1). Форму и геометрические размеры каналов ПЗУ определяют на основе расчетов течения потока воздуха и траекторий движущихся по каналу твердых частиц.

Пылезащитные устройства лямбда-образного типа установлены в зарубежных двигателях T700 (США), RTM-322 (Англия, Франция) и T800 (США) [1, 2]. На российских вертолетных двигателях применяются ПЗУ «грибкового» типа, которые имеют меньшую эффективность по степени очистки воздуха, чем лямбда-образные ПЗУ, и не могут быть

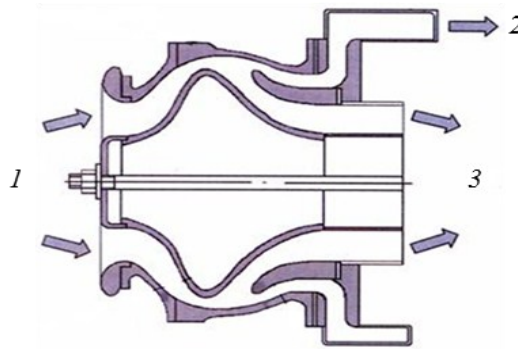


Рис. 1. Профильное сечение лямбда-образного пылезащитного устройства (ПЗУ):
1 – поток запыленного воздуха; 2 – поток воздуха с пылью, направляемый в «улитку» в ПЗУ (для выброса в атмосферу); 3 – поток очищенного воздуха, направляемый в двигатель

эффективно использованы в конструкциях перспективных скоростных вертолетов [3, 4].

Снижение массы ПЗУ для перспективных вертолетов также является важной задачей. Современные ПЗУ должны быть легче, чем применяемые в настоящее время ПЗУ из алюминиевых сплавов. Это может быть достигнуто путем замены металлических сплавов новыми полимерными композиционными материалами, разработка и исследование которых ведется в соответствии с постоянно возрастающими требованиями, предъявляемыми к современным авиационным материалам [5–7]. Полимерные композиционные материалы обладают низкой плотностью (органопластики 1,3 г/см³; углепластики 1,7 г/см³) и высокими механическими характеристиками [8, 9].

Для арамидных органопластиков свойственна высокая стойкость к механическим повреждениям [10–13]. Эти материалы широко используются для изготовления конструкций, защищающих от механического удара, баллистических и эрозионных воздействий [14–16].

Целью данной работы является разработка полимерных композиционных материалов и технологии изготовления конструктивных элементов из полимерных композитов для современных лямбда-образных ПЗУ. В данной статье приведены сведения о свойствах полимерных композиционных материалов для ПЗУ, а также результаты стендовых испытаний изготовленного из полимерных композиционных материалов лямбда-образного ПЗУ в условиях, приближенных к ре-

альным условиям эксплуатации вертолетов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [17].

Материалы и методы

Объектами исследования в данной работе являются полимерные композиционные материалы (угле- и органопластик) и изготовленное из них лямбда-образное ПЗУ. Для изготовления объектов исследования использовали полициануратное связующее ВСТ-32 и армирующие наполнители: углеродную ткань арт. 4750 фирмы Porcher (для углепластика) и арамидную ткань арт. 86-153-04Н (для органопластика).

Пропитку армирующих тканей полициануратным связующим осуществляли на установке Coatema BL-2800, предназначенной для изготовления препрегов на основе пленочных и расплавных связующих. Параметры отверждения препрегов, необходимые для выбора технологических режимов формования изделия, определяли методами дифференциальной сканирующей калориметрии и термомеханического анализа на установке Mettler Toledo (Швейцария). Установлено, что параметры отверждения препрегов угле- и органопластиков имеют близкие значения (табл. 1), что свидетельствует о возможности их совместного формования по единому технологическому режиму при изготовлении изделия.

Таблица 1

Характеристики препрегов полимерных композиционных материалов

Свойства	Значения свойств препрега	
	ВКУ-42	органопластика
Массовая доля связующего, %	39±3	48±3
Температура начала активной реакции отверждения, °С	175±5	164±5
Температура пика реакции отверждения, °С	235±5	222±5
Тепловой эффект реакции отверждения, Дж/г	198±10	175±10
Время гелеобразования связующего в препреге при температуре 160±2°С, мин	20–30	12–22
Толщина монослоя пластика, мм	0,17±0,01	0,11±0,01

Для проведения исследований изготавливали образцы полимерных композиционных материалов трех типов: углепластик, органопластик и углепластик с внешними лакирующими слоями, выполненными из органопластика. Лакирующие слои наносили с целью защиты углепластика от механического удара и эрозии. На поверхность лакирующих слоев дополнительно наносили эрозионностойкое лакокрасочное покрытие на основе эмали ВЭ-64 методом пневматического распыления с последующей термообработкой. Образцы полимерных композиционных материалов и элементы ПЗУ изготавливали методом автоклавного формования.

Механические испытания угле- и органопластика проводили на испытательных машинах Тиратест-2200 и РКМ-50 в соответствии с ГОСТ 25.601–80 (предел прочности и модуль упругости при растяжении), ГОСТ 25.602–80 (предел прочности при сжатии) и ГОСТ 25.604–82 (предел прочности и модуль упругости при изгибе).

Тепловлажностное старение полимерных композиционных материалов исследовали в соответствии с ГОСТ 9.707 при температуре 60°C и относительной влажности 85%, время испытаний составляло 60 сут. Испытания проводили в климатической камере Climats (Франция) с автоматическим поддержанием заданного режима испытаний; погрешность поддержания температуры составляла ± 2 К, погрешность влажности $\pm 3\%$.

Эрозионную стойкость лакокрасочного покрытия (число циклов испытаний, необходимых для разрушения покрытия до подложки) определяли в соответствии с СТП 1-595-9-110–84 на установке центробежного типа «Тайфун». Испытания проводили при скорости вращения ротора установки «Тайфун» 2100 об/мин. В качестве абразива использовали песок Вольского месторождения с

дисперсностью 0,5–0,8 мм. Оценку устойчивости покрытий к эрозии определяли в циклах: 1 цикл соответствует воздействию 800 г песка.

Испытания ПЗУ лямбда-образного типа, изготовленного из полимерных композиционных материалов, проводили на специализированном стенде У-368 во ФГУП «ЦИАМ» с определением газодинамических и сепарационных характеристик (степень очистки воздуха, потери полного давления). Условия испытания соответствовали взлетному режиму вертолетного двигателя, на котором наблюдается наибольшая запыленность воздуха, поступающего в двигатель через ПЗУ при эксплуатации вертолетов: средняя скорость потока воздуха во входном сечении ПЗУ 65–75 м/с; концентрация пыли на входе в ПЗУ 0,5–1,0 г/м³.

Результаты

Разработку полимерных композиционных материалов и технологии изготовления элементов ПЗУ проводили с учетом конструктивно-технологических особенностей изделия (сложная конфигурация, высокие требования к точности исполнения поверхностей проточной части) и жестких условий эксплуатации (интенсивное эрозионное воздействие, температура эксплуатации – до 200°C). В качестве основного материала для изготовления ПЗУ разработан углепластик марки ВКУ-42 на основе углеродной ткани арт. 4750 фирмы Porcher и полициануратного связующего ВСТ-32. Для внешних лакирующих слоев, обеспечивающих защиту элементов ПЗУ от механического удара и эрозии, разработан органопластик на основе арамидной ткани арт. 86-153-04Н и связующего ВСТ-32.

В табл. 2–4 представлены свойства углепластика ВКУ-42 и углепластика с лакирующим

Таблица 2

Физико-механические свойства углепластика

Свойства	Значения свойств углепластика	
	ВКУ-42	с лакирующим слоем органопластика
Плотность, г/см ³	1,56	–
Толщина монослоя, мм	0,16–0,18	–
Предел прочности при растяжении, МПа	895	875
Модуль упругости при растяжении, ГПа	65	64
Относительное удлинение при растяжении, %	1,4	1,4
Предел прочности при изгибе, МПа	980	1000
Модуль упругости при изгибе, ГПа	54	51
Предел прочности при сжатии, МПа	725	705
Модуль упругости при сжатии, ГПа	61	61
Предел прочности при сдвиге, МПа	72	71
Коэффициент Пуассона	0,06	–
Прочность при сдвиге в плоскости листа, МПа	78	–
Модуль упругости при сдвиге в плоскости листа, ГПа	5,0	4,0
Удельная ударная вязкость при изгибе, кДж/м ²	118	144

Таблица 3

Свойства углепластика ВКУ-42 при различных температурах

Свойства	Значения свойств при температуре испытания, °С			
	-60	20	200	220
Предел прочности при растяжении, МПа	860	895	865	840
Модуль упругости при растяжении, ГПа	63	65	71	61
Относительное удлинение при растяжении, %	–	1,4	1,2	1,3
Предел прочности при изгибе, МПа	1040	980	740	550
Модуль упругости при изгибе, ГПа	55	54	47	41
Предел прочности при сжатии, МПа	710	725	580	410
Модуль упругости при сжатии, ГПа	–	61	53	49
Прочность при сдвиге в плоскости листа, МПа	–	72	52	39

Таблица 4

Прочность при растяжении углепластика ВКУ-42 после теплового старения

Температура испытания после теплового старения, °С	Продолжительность теплового старения при температуре 200°С, ч	Предел прочности при растяжении, МПа		
		в исходном состоянии	после старения	уровень сохранения прочности, %
20	500	895	870	97
	1000		750	84
	1500		630	70
	2000		625	70
200	500	865	780	90
	1000		665	77
	1500		620	72
	2000		600	69

слоем органоупластика. Характеристики органоупластика для лакирующего слоя следующие: плотность 1,35 г/м³, толщина монослоя 0,11–0,12 мм, прочность при растяжении 760 МПа, модуль упругости 3,4 ГПа, относительное удлинение при растяжении 2,2%. Свойства углепластика ВКУ-42 приведены в исходном состоянии при различных температурах и после теплового старения. На основании проведенных испытаний установлено, что уровень механических свойств углепластика ВКУ-42 при максимальной рабочей температуре 200°С составляет 72–97% от значения, определенного при комнатной температуре. После

теплового старения при температуре 200°С уровень сохранения прочности при растяжении углепластика ВКУ-42 составляет 69–97%. Результаты испытаний свидетельствуют о сохранении работоспособности углепластика ВКУ-42 при температуре 200°С.

На рис. 2 показаны изготовленные из полимерных композиционных материалов детали ПЗУ. Конструкция ПЗУ включает следующие основные детали: корпус, разделитель потока запыленного воздуха, «улитка» для сбора и выброса пыли в атмосферу. Корпус ПЗУ имеет диаметр 475 мм и длину 250 мм, «улитка» – диаметр 580 мм и ширину 115 мм. Масса ПЗУ после сборки составляет ~10 кг.

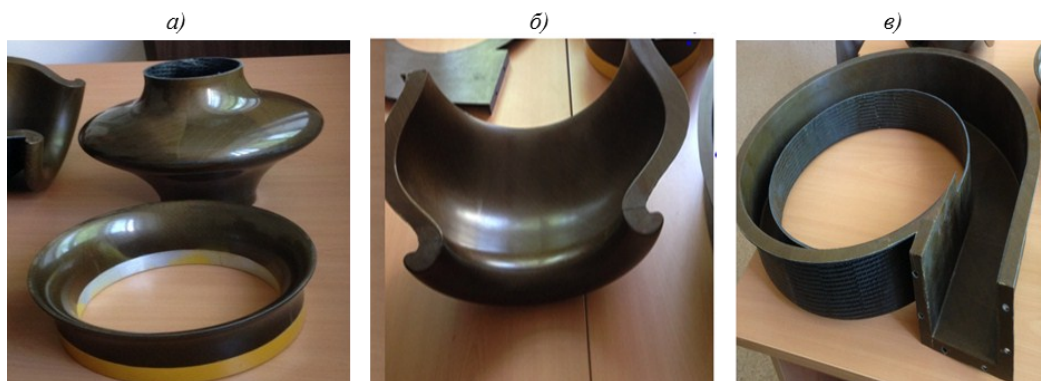


Рис. 2. Элементы ПЗУ, изготовленные из углепластика ВКУ-42 с лакирующим слоем органоупластика: а – разделитель и верхняя стенка корпуса; б – верхняя стенка; в – верхняя часть «улитки» ПЗУ

К деталям лямбда-образного ПЗУ предъявляются особые требования по геометрической форме поверхностей, соприкасающихся с потоком запыленного воздуха. Для удовлетворения этих требований разработана технология изготовления деталей сложной формы из препрегов методом автоклавного формования. Технологический процесс изготовления деталей из углепластика ВКУ-42 с плакирующим слоем органопластика включает следующие операции: раскрой препрега углепластика ВКУ-42 и препрега органопластика для плакирующего слоя, выкладка препрегов на технологической оснастке, автоклавное формование, механическая обработка деталей.

Раскрой препрегов проводили по шаблонам, изготовленным в соответствии с геометрической формой и схемой армирования детали. Шаблоны-выкройки изготавливали с помощью персонального компьютера как развертки сегментов детали, полученных сечением детали продольными плоскостями, в программе Unigraphics NX. Затем шаблоны распечатывали на бумаге, вырезали ножницами и наносили на препрег.

На обработанную антиадгезионной смазкой технологическую оснастку выкладывали слои препрега органопластика и прикатывали к оснастке обогреваемыми роликами. Сверху выкладывали слои препрега углепластика с учетом выбранного направления армирования (схема армирования: четные слои препрега 45 ± 5 град, нечетные слои препрега 135 ± 5 град). Количество слоев препрега углепластика определяли для каждого элемента ПЗУ в соответствии с чертежами на деталь. Автоклавное формование деталей проводили по ступенчатому режиму с последующей термообработкой. Разработанная технология позволила изготавливать из препрегов угле- и органопластика элементы ПЗУ сложной конфигурации с требуемой точностью исполнения геометрических размеров рабочих поверхностей.

На рис. 3 показано изготовленное из полимерных композиционных материалов ПЗУ лямбда-образного типа, установленное на специализированном испытательном стенде У-368 во ФГУП «ЦИАМ» для проведения испытаний. В процессе подготовки к испытаниям выполнена сборка пы-



Рис. 3. Общий вид собранного ПЗУ с «улиткой» на испытательном стенде

лезачитного устройства из отдельно отформованных деталей (корпус, разделитель, «улитка» и др.), проведена доработка стыковочного узла и закрепление ПЗУ на испытательном стенде, установлено измерительное оборудование.

В процессе испытания ПЗУ из углепластика марки ВКУ-42 с плакирующим слоем органопластика определяли газодинамические и сепарационные свойства конструкции (степень очистки воздуха, потери полного давления).

Испытания проводили в условиях, соответствующих взлетному режиму вертолетного двигателя, на котором наблюдается наибольшая запыленность воздуха, поступающего в двигатель через ПЗУ при эксплуатации вертолетов:

- средняя скорость потока воздуха 65–75 м/с во входном сечении ПЗУ;
- концентрация пыли на входе в ПЗУ составляла $0,5\text{--}1,0 \text{ г/м}^3$.

Определение степени очистки воздуха проводили при подаче в ПЗУ кварцевой пыли двух типов – «Крупная АС» (размер частиц – от 0 до 200 мкм) и «С» (размер частиц – от 40 до 1000 мкм), применяемых в международной практике при испытаниях ПЗУ вертолетных двигателей. Процесс заброса кварцевой пыли в ПЗУ показан на рис. 4.

Проведенные испытания пылезачитного устройства из углепластика с плакирующим слоем органопластика показали следующие результаты:

- степень очистки воздуха от пыли типа «Крупная АС» составляет 79–81%, от пыли типа «С» составляет 86–92%;
- потери полного давления в ПЗУ составляют $112\text{--}151 \text{ кгс/м}^2$.

Результаты проведенных испытания свидетельствуют, что ПЗУ лямбда-образного типа, элементы которого изготовлены из полимерных композиционных материалов, имеет высокую эффективность по степени очистки воздуха от пыли (79–92%). По уровню эффективности ПЗУ лямбда-образного типа из полимерных композиционных материалов не уступает зарубежным аналогам – лямбда-образным пылезачитным устройствам, установленным на вертолетных двигателях RTM-322-01 (Англия, Франция) и Т800 (США).

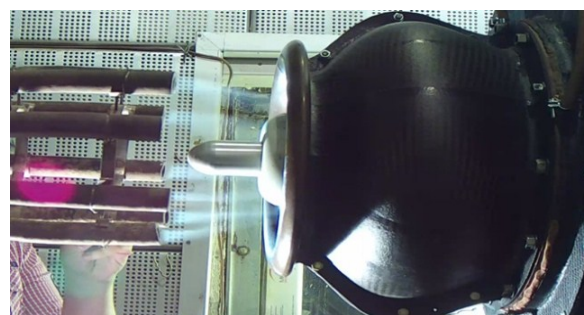


Рис. 4. Заброс пыли во вход ПЗУ

Обсуждение и заключения

Разработаны полимерные композиционные материалы (угле- и органопластик) для изготовления пылезащитного устройства лямбда-образного типа перспективного вертолетного двигателя, а также других деталей летательных аппаратов, подвергающихся в процессе эксплуатации воздействию эрозионных потоков пыли и песка в диапазоне температур от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$. Разработанный углепластик марки ВКУ-42 с системой эрозионно-стойкой защиты, включающей лакирующий слой органопластика и лакокрасочное покрытие, обладает высокими механическими характеристиками ($\sigma_{\text{в}}=780$ МПа, $E=65$ ГПа) и эрозионной стойкостью не менее 6 циклов при испытаниях на установке центробежного типа «Гайфун» (скорость вращения ротора 2100 об/мин, дисперсность песка 0,5–0,8 мм, расход песка 0,8 кг за 1 цикл).

Разработана технология и изготовлены элементы ПЗУ сложной геометрической формы из углепластика ВКУ-42 с лакирующим слоем органопластика методом автоклавного формования и проведена сборка ПЗУ для проведения испытания.

Проведены испытания пылезащитного устройства на специализированном стенде У-368 с определением газодинамических и сепарационных свойств конструкции. Установлено, что степень очистки воздуха от пыли составляет 79–92%. Потери полного давления в ПЗУ составляют 112–151 кгс/м³.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют, что ПЗУ лямбда-образного типа, выполненное из полимерных композиционных материалов по разработанной технологии, имеет эффективность по степени очистки воздуха на уровне эффективности зарубежных лямбда-образных пылезащитных устройств вертолетных двигателей RTM-322-01 (Англия, Франция) и T800 (США).

Применение ПЗУ лямбда-образного типа из полимерных композиционных материалов в конструкциях перспективных вертолетных двигателей позволит решить проблему сохранения их работоспособности в условиях повышенной запыленности с максимальной функциональной и весовой эффективностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Duyar A., Gu Zh., Litt J.S. A Simplified Dynamic Model of the T700 Turboshift Engine // Journal of the American Helicopter Society. 1995. Vol. 40 (4). P. 62–70.
2. Chen R., Wen C.Y., Lorente S., Bejan A. The evolution of helicopters // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 120. No. 1. P. 1–7.
3. Рысин Л.С. Еще раз о пыли // Двигатель. 2009. №5. С. 10.
4. Гишваров А.С., Аитов Р.Р., Айтумбетов А.М. Исследование эффективности пылезащитных устройств вертолетных газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. №2 (68). С. 100–110.
5. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
6. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
7. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
8. Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов // Конверсия в машиностроении. 2004. №4 (65). С. 65–69.
9. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
10. Железина Г.Ф. Конструкционные и функциональные органопластики нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2017).
11. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 64–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-64-68.
12. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Черных Т.Е., Черных К.Ю. Новые арамидные волокна Русар НТ для армирования конструкционных органопластиков // Вопросы материаловедения. 2015. №1 (81). С. 60–72.
13. Железина Г.Ф., Шульдешова П.М. Конструкционные органопластики на основе пленочных клеев // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №2. С. 9–14.
14. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Арамидный слоисто-тканый материал для защиты от баллистических и ударных воздействий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.07.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-6-6.
15. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Орлова Л.Г., Войнов С.И. Баллистически стойкие арамидные слоисто-тканые композиты для авиационных конструкций // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №12. С. 23–26.
16. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органопластиков при ударных воздействиях // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 272–277.
17. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.