

УДК 629.7.017

Е.А. Вешкин¹, Р.А. Сатдинов¹, Р.С. Савицкий¹**ПОДХОД К ВЫБОРУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПКМ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-103-111

Ввиду того, что в отношении Российской Федерации постоянно вводят санкции, появилась необходимость применения в разрабатываемых в нашей стране конструкциях современных вертолетов отечественных материалов, отвечающих всем необходимым для этого требованиям. Рассмотрены подходы к разработке отечественных материалов с заданными характеристиками для использования в конструкциях перспективной вертолетной техники. Выбранные методы позволили разработать полимерные композиционные материалы, отвечающие необходимым требованиям и не уступающие по своим свойствам импортным аналогам.

Ключевые слова: *стеклопластики, требования, эпоксидное связующее, конструкции фюзеляжа вертолета, технологический режим, давление формования, температура.*

Е.А. Veshkin¹, R.A. Satdinov¹, R.S. Savitsky¹**APPROACH TO THE SELECTION OF TECHNOLOGICAL MODE
FOR THE MANUFACTURE OF PCM**

In view of the fact that sanctions are constantly being introduced against the Russian Federation, it became necessary to use domestic materials in the designs of modern helicopters being developed in our country that meet all the necessary requirements for this. Approaches to the development of domestic materials with specified characteristics for use in the designs of advanced helicopter technology are considered. The selected methods made it possible to develop polymer composite materials that meet the necessary requirements are not inferior in properties to those of the imported analog.

Keywords: *fiberglass, requirements, epoxy binder, helicopter fuselage structures, technological mode, molding pressure, temperature.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

С каждым годом доля внедрения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции летательных аппаратов становится все более весомой [1]. Это обусловлено задачами по снижению массы летательных аппаратов, увеличению ресурса и надежности их конструкций, а также весовой и экономической эффективности, что недостижимо без материалов нового поколения с улучшенными характеристиками [2–5]. Ввиду того, что ПКМ – анизотропный материал, существует возможность создания конструкций с заданными свойствами. Реализация принципа управляемой анизотропии позволяет создавать конструкции с управляемым характером разрушения, например вдоль или под углом к действующим нагрузкам, что обеспечивает не лавинообразный, как у металлов, а длительный процесс разрушения без потери несущей способности в случае наличия производственных и эксплуатационных дефектов, а также появления повреждений.

В Российской Федерации в рамках Государственной программы «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы» предусмотрено создание линейки перспективных скоростных вертолетов [6].

Применение ПКМ в конструкциях вертолета обусловлено следующими их преимуществами по сравнению с металлами (алюминиевыми сплавами):

- высокий уровень удельных характеристик статической прочности и сопротивления усталости при относительно низкой плотности;
- высокая стойкость к концентраторам напряжений, технологическим и эксплуатационным дефектам, которая позволяет иметь мягкий и длительный характер разрушений;
- отсутствие возможности образования коррозионных повреждений, которые у металлов приводят к возникновению усталостных трещин с последующим катастрофическим разрушением лопасти.

Снижение массы авиационных конструкций вертолетной техники и повышение их ресурса возможно благодаря разработке и внедрению ПКМ нового поколения для элементов фюзеляжа, лопастей и системы управления. Эти направления в мире успешно развиваются. Например, конструкции фюзеляжа современной вертолетной техники на 70–100 % состоят из ПКМ. В связи с этим актуальной задачей является разработка технологии изготовления элементов фюзеляжа, лопастей и системы управления с применением ПКМ [7, 8].

Для обеспечения надежности и безопасности элементов вертолетной техники, в том числе в условиях Арктики, в процессе эксплуатации необходимо создание конструкционных материалов нового поколения и проведение исследований по оценке изменения их физико-механических характеристик при воздействии эксплуатационных факторов.

Одно из стратегических направлений развития НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ до 2030 г. – разработка линейки современных полимерных связующих, полуфабрикатов и ПКМ на их основе [9, 10].

Общим трендом развития направления по созданию новых ПКМ как в России, так и за рубежом является повышение механических и эксплуатационных характеристик материалов с применением энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий их переработки. Поэтому использование ПКМ с пониженными температурами отверждения позволяет существенно уменьшить энергозатраты при изготовлении конструкций вертолета [11, 12].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

В 1970-х гг. такие компании, как Sikorsky Aircraft и Bell Helicopter, одними из первых приступили к разработкам в области применения ПКМ в конструкции планера вертолета. По заявлению разработчиков данных вертолетов, композиционные материалы (в основном использовались графитовые волокна и эпоксидное связующее, кевлар на эпоксидном связующем, «бумажный» сотовый наполнитель типа Nomex и алюминиевые соты) составляли ~82 % от массы всей конструкции фюзеляжа. В свою очередь отечественные производители тоже широко применяли ПКМ в конструкциях вертолетов – в основном при изготовлении деталей планера (до 60–70 %). В конце XX в.

в воздух поднялся вертолет Ка-226, в конструкции которого, помимо деталей планера, из ПКМ изготовлены оперение, панели контейнеров топливных баков, обтекатели и многое другое.

Результаты проведенных в 1990-х гг. во всем мире работ по опробованию и внедрению ПКМ в конструкции вертолетов свидетельствуют, что наметилась устойчивая тенденция к расширению области использования деталей из таких материалов в вертолетной технике.

В настоящее время ведущие зарубежные и отечественные производители вертолетов, такие как Eurocopter Helicopters, AgustaWestland, Sikorsky Aircraft, Bell Helicopter, АО «НЦВ Миль и Камов», ПАО «Казанский вертолетный завод» и др. в своих разработках используют широкий спектр ПКМ в конструкциях фюзеляжа, лопастей несущих и рулевых винтов. Буквально до 2015 г. при изготовлении конструкций российских вертолетов применяли как импортные, так и отечественные материалы, однако в настоящее время в рамках программ по импортозамещению проводится разработка ПКМ нового поколения по уровню свойств, не уступающих зарубежным аналогам [13].

Для реализации конструктивного решения по получению современных ПКМ для изготовления деталей фюзеляжа и лопастей вертолета требуется подход к разработке необходимого комплекса материалов на основе наполнителей однонаправленной и тканой структур и эпоксидного расплавного связующего с пониженной температурой отверждения, что позволит снизить энергозатраты при производстве элементов конструкций фюзеляжа вертолета [14].

Объекты исследования:

- эпоксидное связующее марки ВСЭ-34 (основные свойства представлены в табл. 1);
- ткани из стеклянных нитей марок Т-10-14 и Т-64(ВМП)-78.

Таблица 1

Свойства эпоксидного связующего марки ВСЭ-34

Свойства	Значения свойств	
	по ТУ 1-595-12-1424-2014	фактические показатели
Внешний вид	Вязкая пластичная масса кремового цвета, не содержащая посторонних включений	
Кажущаяся вязкость по Брукфильду, Па·с, при температуре 70 °С	10–150	40,8
Продолжительность желатинизации, мин	Не более 60	48,5

Исследуемые свойства и нормативный документ:

- плотность – по ГОСТ 15139–69, ГОСТ Р 566882–2015;
- предел прочности при растяжении и модуль упругости – по ГОСТ 25.601–80, ГОСТ 56785–2015;
- предел прочности при сжатии и модуль упругости – по ГОСТ Р 56812–2015;
- предел прочности при изгибе – по ГОСТ Р 56805–2015;
- кажущийся предел прочности при межслойном сдвиге методом короткой балки – по ГОСТ 32659–2014.

Результаты и обсуждение

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработано эпоксидное расплавное связующее марки ВСЭ-34 с конечной температурой отверждения 140 °С и углепластики на его основе марок ВКУ-45Ж/УМТ-12К.ОЖН (на основе углеродного однонаправленного

жгута) и ВКУ-45/УМТ-3К.РТН (на основе углеродной равнопрочной ткани). Для обеспечения совместного формования препрегов стекло- и углепластиков на основе связующего ВСЭ-34 за единый технологический цикл требовалось провести разработку стеклопластиков на основе российских наполнителей вместо импортных препрегов стеклопластиков фирмы Hexcel (США).

Задачи работы:

- разработка технологии изготовления препрегов стеклопластиков для применения в конструкциях вертолета;
- разработка нормативной документации на материал;
- проведение работ по общей квалификации (паспортизации) стеклопластиков на основе разработанных препрегов.

Требуемый уровень минимальных свойств стеклопластиков, разрабатываемых взамен импортных материалов, представлен в табл. 2.

Таблица 2

Свойства стеклопластиков фирмы Hexcel (США)

Свойства	Значения свойств стеклопластиков	
	R913/37%/7781	R913/37%/120
Прочность, МПа:		
при растяжении	450	490
при сжатии	460	590
при изгибе	610	714
при межслойном сдвиге	65	74
Модуль упругости, ГПа	22	21

Для решения поставленных задач в первую очередь проанализировали российский рынок отечественных стеклонеполнителей. Выбрали стеклоткани двух марок – Т-10-14 и Т-64(ВМП)-78, выпускаемые по ГОСТ 19170–2001 и ТУ 5952-009-16319666–98 соответственно, и эпоксидное связующее марки ВСЭ-34.

Начальная работа состояла из нескольких этапов:

- отработка технологических режимов и разработка нормативной документации на изготовление препрегов стеклопластиков [15];
- отработка режимов формования стеклопластиков на основе разработанных препрегов [16];
- повторное изготовление стеклопластиков для подтверждения правильности выбранных режимов.

Если подход для отработки технологических режимов и разработки нормативной документации на изготовление препрегов рассматривали ранее и принцип его не изменился, то для разработки ПКМ на основе изготовленных препрегов одним из основных критериев является отработка технологии его формования. Для этого требуется провести исследование влияния различных режимов изготовления (температуры формования, скорости нагрева, давления и др.) на свойства ПКМ. При этом необходимо оценивать влияние режимов изготовления не только на механические свойства материала, но и на его микроструктуру [17, 18].

Для этого по отработанным режимам изготовили партию препрегов на основе стеклотканей марок Т-10-14 и Т-64(ВМП)-78 и провели исследование влияния параметров технологических режимов изготовления на свойства стеклопластиков марок ВПС-53/Т-10 и ВПС-53/Т-64(ВМП). На установке DSC 204F1 (фирма Netzsch, Германия)

проведено исследование кинетики отверждения связующего ВСЭ-34 для определения оптимальных параметров режима отверждения препрегов стеклопластиков [19].

Для выбора оптимального температурного режима отверждения стеклопластика ВПС-42П/Т-64 исследована кинетика отверждения связующего ВСФ-16М на установке DSC 204F1 в программной среде Netzsch Kinetics 3/1. На основании проведенного расчета в данной программе оценены режимы отверждения в зависимости от продолжительности изотермической выдержки при различных температурах. Критерием оценки являлась степень конверсии, равная 90–95 %, которая была достигнута за 257 мин при температуре 130 °С, за 164 мин при температуре 140 °С, за 108 мин при температуре 150 °С.

Для проведения сравнительных исследований изготовили по три плиты из стеклопластиков марок ВПС-53/Т-10 и ВПС-53/Т-64(ВМП) методом вакуум-автоклавного формования при выбранных конечных температурах отверждения от 130 до 150 °С и давлении формования 0,7 МПа [20]. Из полученных плит вырезали образцы для проведения испытаний. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Свойства стеклопластика марки ВПС-53/Т-10
в зависимости от температуры отверждения**

Свойства	Значения свойств при температуре отверждения, °С		
	130	140	150
Прочность, МПа:			
при растяжении	650	685	650
при сжатии	535	560	555
при изгибе	810	855	825
при межслойном сдвиге	63	65	63
Модуль упругости, ГПа	20	24	21
Толщина монослоя, мм	0,22	0,21	0,21
Пористость, %	0,2	0,3	0,2
Температура стеклования, °С	146	150	153

Таблица 4

**Свойства стеклопластика марки ВПС-53/Т-64(ВМП)
в зависимости от температуры отверждения**

Свойства	Значения свойств при температуре отверждения, °С		
	130	140	150
Прочность, МПа:			
при растяжении	670	780	680
при сжатии	500	595	510
при изгибе	780	840	760
при межслойном сдвиге	67	68	63
Модуль упругости, ГПа	20	24	22
Толщина монослоя, мм	0,11	0,09	0,09
Пористость, %	0,3	0,5	0,1
Температура стеклования, °С	151	158	152

Далее проведены сравнительные испытания стеклопластиков, изготовленных при различном давлении формования (от 0,9 до 7 кН/м²). Из изготовленных методом механической обработки плит из стеклопластиков вырезаны стандартные образцы и проведены исследования их основных физико-механических свойств. Полученные результаты представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

**Основные свойства стеклопластика марки ВПС-53/Т-64(ВМП)
в зависимости от давления формования**

Свойства	Значения свойств при давлении формования, кН/м ²					
	0,9	1	2	3	5	7
Предел прочности, МПа:						
при растяжении	520	500	530	665	750	780
при сжатии	460	420	460	555	545	595
при изгибе	640	590	665	810	810	840
при межслойном сдвиге	60	60	62	67	65	66
Толщина монослоя, мм	0,16	0,15	0,14	0,11	0,1	0,09
Пористость, %	0,3	0,8	0,2	0,3	0,3	0,5
Температура стеклования, °С	155	158	157	152	148	152

Таблица 6

**Основные свойства стеклопластика марки ВПС-53/Т-10
в зависимости от давления формования**

Свойства	Значения свойств при давлении формования, кН/м ²					
	0,9	1	2	3	5	7
Предел прочности, МПа:						
при растяжении	500	605	640	655	710	720
при сжатии	500	535	560	530	535	550
при изгибе	770	815	815	840	875	865
при межслойном сдвиге	59	64	66	66	65	63
Толщина монослоя, мм	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,21
Пористость, %	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3
Температура стеклования, °С	153	155	155	147	148	150

Результаты испытания, представленные в табл. 3–6, показали, что свойства стеклопластика марки ВПС-53/Т-64(ВМП), изготовленного при давлении формования от 5 до 7 кН/м² и температуре формования 140 °С, находятся на более высоком уровне (на 10–30 %) по сравнению со свойствами стеклопластика, изготовленного по другим режимам формования. Свойства стеклопластиков марки ВПС-53/Т-10, изготовленных при давлении формования от 3 до 7 кН/м² и вне зависимости от температуры формования, находятся приблизительно на одном уровне.

В связи с тем, что отверждение связующего в период формования происходит не одновременно во всем объеме, а с некоторыми различиями во времени (обусловлены прежде всего условиями подачи, отвода тепла и природой выбранного связующего), проведено исследование микротвердости матрицы по толщине ($2,0 \pm 0,1$ мм) плит из стеклопластика, изготовленных по разным режимам формования образцов, влияние которых оценивали в пяти симметричных по сечению образца зонах, условно названных – подповерхностные, полусредние и сердцевинные [21–23]. Результаты испытаний представлены в табл. 7 и 8.

Рост величины микротвердости от лицевой и оборотной сторон образца к его сердцевине можно объяснить тем, что при отверждении формируемого образца передача выделяемого в окружающую среду или в формовочную оснастку тепла с поверхностных зон благодаря экзотермической реакции отверждения происходит более интенсивно, чем с зон, которые не имеют прямого выхода на поверхность образца. Однако в исследуемых

образцах из стеклопластиков, в зависимости от их зоны проведения испытаний, критической разницы по показателям микротвердости не наблюдается, что косвенно свидетельствует о стабильности свойств по всей толщине и площади изготовленных ПКМ.

Таблица 7

Микротвердость матрицы в образцах из стеклопластика марки ВПС-53/Т-10, изготовленных по разным режимам формования

Режим формования (температура, °С/давление, кН/м ²)	Микротвердость, МПа, в различных зонах проведения испытания				
	подповерхностная	полусредняя	сердцевинная	полусредняя	подповерхностная
	с толщиной ПКМ, мм				
	0,1	0,5	1,0	1,5	1,9
130/7	208	208	211	209	207
150/7	217	221	232	225	218
140/0,9	204	205	215	206	207
140/1	208	212	221	213	210
140/2	201	206	211	208	207
140/3	207	213	215	211	207
140/5	208	213	215	214	209
140/7	212	217	220	219	215

Таблица 8

Микротвердость матрицы в образцах из стеклопластика марки ВПС-53/Т-64(ВМП), изготовленных по разным режимам формования

Режим формования (температура, °С/давление, кН/м ²)	Микротвердость, МПа, в различных зонах проведения испытания				
	подповерхностная	полусредняя	сердцевинная	полусредняя	подповерхностная
	с толщиной ПКМ, мм				
	0,1	0,5	1,0	1,5	1,9
130/7	205	209	213	207	204
150/7	216	222	233	220	214
140/0,9	201	207	210	208	203
140/1	206	210	215	209	207
140/2	207	212	216	211	207
140/3	205	211	215	209	206
140/5	204	208	213	210	204
140/7	210	213	216	214	208

На основании выполненных исследований выбран оптимальный режим формования стеклопластика и проведены изготовление стеклопластиков и испытания образцов. Сравнительные свойства изготовленных стеклопластиков и их импортных аналогов представлены в табл. 9 и 10.

Таблица 9

Свойства стеклопластика марки ВПС-53/Т-10 в сравнении с импортным аналогом

Свойства	Значения свойств стеклопластиков	
	ВПС-53/Т-10*	R913/37%/7781
Прочность, МПа: при растяжении	710–735	450
	720	
при сжатии	510–600	460
	550	
при изгибе	825–889	610
	865	
при сдвиге	59–65	65
	63	
Модуль упругости, ГПа	24–25	22
	24	

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Свойства стеклопластика марки ВПС-53/Т-64(ВМП) в сравнении с импортным аналогом

Свойства	Значения свойств стеклопластиков	
	ВПС-53/Т-64(ВМП)*	R913/37%/120
Прочность, МПа: при растяжении	840–900	490
	865	
при сжатии	575–615	590
	595	
при изгибе	925–975	714
	945	
при сдвиге	71–74	74
	72	
Модуль упругости, ГПа	25–26	21
	26	

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Результаты, представленные в табл. 9 и 10, показывают, что значения свойств разработанных стеклопластиков превосходят значения свойств импортных материалов, что свидетельствует о правильном подходе к разработке материала.

Заключения

На основании проведенной работы выбраны подходы к разработке препрегов и стеклопластиков на их основе. Для получения необходимых механических свойств ПКМ подобран режим отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего марки ВСЭ-34. Исследования микроструктуры стеклопластиков подтвердили правильность выбранного режима формования.

Сформирована и выпущена вся необходимая нормативная документация для изготовления препрегов и стеклопластиков на их основе для конструкций вертолетной техники.

Следует также отметить, что разработки новых материалов в области полимерных материалов [24] требуют всестороннего их изучения и оценки [25], причем расширение методов исследования свойств материала и применение статистических методов всегда приводит к получению более объективной информации.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
2. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Сб. тезисов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
3. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
4. Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники // Конструкции из композиционных материалов. 2011. № 4. С. 44–59.
5. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
6. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
7. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Труды ВИАМ. 2016. № 8 (44). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.

8. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Аниховская Л.И. Клеящие материалы в конструкции лопастей вертолетов // Труды ВИАМ. 2016. № 7 (43). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-7-7.
9. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Полимерные композиционные материалы, полученные путем пропитки пленочным связующим // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. № 11. С. 2–7.
10. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
11. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 231–242.
12. Петрова А.П., Донской А.А., Чалых А.Е., Щербина А.А. Клеящие материалы. Герметики: справочник. СПб.: Професионал, 2008. 589 с.
13. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докладов XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
14. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
15. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В., Абрамов П.А., Сатдинов Р.А. Опыт применения технологического контроля полуфабрикатов ПКМ // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 6 (2). С. 393–398.
16. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // Труды ВИАМ. 2014. № 4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
17. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Изд-во стандартов, 1993. 35 с.
18. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенychев В.В., Крашенинникова Е.В. Закономерности проявления анизотропии свойств в трех взаимно перпендикулярных сечениях стеклоуглепластика // Пластические массы. 2020. № 5–6. С. 15–19.
19. Сатдинов Р.А., Истягин С.Е., Вешкин Е.А. Анализ температурно-временных параметров режимов отверждения ПКМ с заданными характеристиками // Труды ВИАМ. 2017. № 3 (51). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-9-9.
20. Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Роль антиадгезионных покрытий в технологическом процессе формования ПКМ // Труды ВИАМ. 2016. № 4 (40). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-10-10.
21. Goyal R.K., Tiwari A.N., Negi Y.S. Microhardness of PEEK/ceramic micro- and nanocomposites: Correlation with Halpin–Tsai model // Materials Science and Engineering A. 2008. P. 230–236.
22. Аристов В.М., Аристова Е.П. Влияние структурной неоднородности на физические свойства частично кристаллических полимеров // Пластические массы. 2016. № 3–4. С. 15–17.
23. Аристов В.М., Аристова Е.П. Влияние релаксационных явлений на физические свойства полимерных материалов // Пластические массы. 2017. № 5–6. С. 3–6.
24. Кенуй М.Г. Быстрые статистические вычисления. Упрощенные методы оценивания и проверки: справочник. М.: Статистика, 1979. 69 с.
25. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 128 с.