

УДК 628.517.699.844

В.А. Сагомонова<sup>1</sup>, С.С. Долгополов<sup>1</sup>, А.Е. Сорокин<sup>1</sup>, В.В. Целикин<sup>1</sup>

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА В КАЧЕСТВЕ УПЛОТНИТЕЛЕЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-28-35

*Приведены результаты исследования эксплуатационных свойств материала марки ВТП-1В, в том числе хладотекучести. Установлено, что данный материал не обладает хладотекучестью и по комплексу изученных в работе свойств может быть рекомендован в качестве альтернативы слоистым полимерным композиционным материалам, используемым в составе болтовых соединений нервюры крыла авиационной техники. Оценена возможность эксплуатации материала марки ВТП-1В в среде агрессивных жидкостей и показано, что материал стоек к воздействию топлива ТС-1, в том числе сохраняет низкую деформативность при длительном нагружении.*

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, термоэластопласт, вибропоглощающий материал, коэффициент механических потерь, болтовые соединения, хладотекучесть, нервюра крыла.

V.A. Sagomonova<sup>1</sup>, S.S. Dolgoplov<sup>1</sup>, A.E. Sorokin<sup>1</sup>, V.V. Tselikin<sup>1</sup>

## EVALUATION OF VIBRATION-ABSORBING MATERIAL BASED ON POLYURETHANE USING POSSIBILITY FOR A SEAL

*The article presents the results of a study of the operational properties of the VTP-1V grade material, including cold flow. It was found that the material of the VTP-1V grade hasn't cold flow and, according to the complex of properties studied in the work, can be recommended as an alternative to layered polymeric composite materials used in the bolted joints of the aircraft wing rib. The possibility of operating VTP-1V in an environment of aggressive liquids was assessed and it was shown that the material is resistant to the effects of TC-1 fuel, including retaining low deformability under prolonged loading.*

**Keywords:** polymer composite material, thermoelastoplastic, vibration damping material, mechanical loss factor, bolt joint, cold flow, wing rib.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в производстве авиационной, автомобильной, корабельной, специальной и других видах техники в составе широкого ассортимента деталей и конструкций в качестве как конструкционных, так и функциональных материалов, а также материалов со специальными свойствами [1–6]. Так, у отдельных образцов самолетной техники доля ПКМ в составе достигает 50 % и более, а в вертолетной – до 90–93 %.

Практически любой узел авиационной или иной техники требует применения уплотнительных материалов, работоспособных в среде масел, топлив, воздуха, влаги,

воды, при воздействии озона и т. п. Например, в качестве уплотнительных прокладок в авиационной технике, как правило, используются резины и парониты, которые имеют ограниченный ресурс работы вследствие процессов старения материала [7–17]. Механизм герметизации данного типа уплотнительных деталей, прежде всего, связан с высокоэластичными свойствами резины, позволяющими обеспечивать плотное соприкосновение контактирующих поверхностей при необходимом уровне прижимного усилия. В результате упрощается процесс сборки деталей и оптимизируется размер уплотнительного узла [7, 11]. Кроме того, применение резин обеспечивает большую степень герметичности конструкции по сравнению с другими материалами для уплотнений. Уплотнительные детали, изготовленные из резин, работают преимущественно в условиях деформации сжатия и обеспечивают герметичность соединения как подвижных, так и стационарных частей конструкций. Для каждого конкретного узла воздушного судна также выбирают отдельную марку резины в зависимости от контактной среды и температур эксплуатации [11, 12, 14, 16]. Например, для работы в условиях экстремально низких температур используют морозостойкие резины [18], изготавливаемые, как правило, на основе каучуков с низкой температурой стеклования, в которых невозможны или затруднены процессы кристаллизации. Благодаря наличию в основной цепи каучука ненасыщенных двойных (СКД, СКИ, НК, БСК и БК) и простых эфирных связей (ПОЭ, ПОМ, ЭХГК и силоксановый каучук) обеспечивается повышение морозостойкости резин. Наименее морозостойкими являются каучуки, в основной цепи которых нет двойных связей, а в боковых цепях есть полярные группы (СКФ, АК и ХСПЭ). Резины из каучуков, содержащих двойные связи в главной цепи, имеют промежуточную морозостойкость. В случае экстремально высоких температур (вплоть до 500 °С) используют резины на основе силоксановых каучуков и их производных, кремнийорганических лестничных высокомолекулярных блок-сополимеров и т. д. Для обеспечения стойкости уплотнительных элементов к горюче-смазочным материалам применяют различные типы нитрильных каучуков [14, 16].

В отличие от резин, Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) работоспособен в широком температурном диапазоне (от –60 до +260 °С), однако при этом обладает ползучестью (хладотекучестью) в условиях воздействия рабочего давления и повышенных температур [19, 20]. Уплотнения из Фторопласта-4 в процессе эксплуатации выдавливаются в зазоры фланцевых соединений, что существенно ограничивает срок их службы и возможность эффективного применения в качестве прокладок.

Одним из путей устранения недостатков у применяемых в настоящее время уплотнительных материалов является их армирование различными наполнителями: дискретными и непрерывными стекло-, угле- и органическими волокнами [6, 9]. В результате на смену традиционным полимерным и эластомерным материалам пришли слоистые пластики – например, уплотнительные прокладки, выполненные из стеклопластиков, которые применяются в качестве компенсаторов в конструкции нервюры крыла самолетов современных воздушных судов, таких как SSJ-100.

Второй путь снижения деформативности уплотнений – комбинирование деформируемых и жестких материалов. Например, для повышения механических свойств деталей используют полиимидные пленки или тканые стеклянные наполнители с нанесенным фторопластовым покрытием. На основе таких покрытий разработаны многослойные уплотнительные материалы ПМФ-Л и ВТП-2П [21, 22]. Полиимидофторопласт ПМФ-Л – многослойный материал, состоящий из термосваренных пленок на основе полиимида с фторопластовым покрытием марок ПМФ-351 и ПМФ-352 с одной или двух сторон. В этом многослойном материале полиимидные пленки обеспечивают прочностные характеристики и ограничивают ползучесть, а слои из фторопласта Ф-4МБ – эластичность и адгезию между слоями.

Материал марки ВТП-2П состоит из термосваренных слоев фторлакоткани Ф-4Д-Э01 на основе стеклоткани Э01 и фторопластового покрытия Ф-4Д и предназначен для изготовления уплотнительных прокладок неподвижных фланцевых соединений пневмо-, гидро- и топливных агрегатов высокого давления с максимальной рабочей температурой до 260 °С. Применение фторполимерных пленок и композиционных многослойных материалов на их основе позволяет повысить надежность и ресурс работы изделий авиационной техники [21, 22].

Однако слоистые ПКМ практически не обладают вибропоглощающими свойствами и имеют низкие значения коэффициента механических потерь (0,001–0,01), определяющего способность к диссипации вибрационной энергии. Это обуславливает их низкую стойкость к вибрационным нагрузкам и может привести к появлению дефектов в виде расслоения слоистых пластиков [6, 9].

Во ФГУП «ВИАМ» разработан листовой вибропоглощающий материал марки ВТП-1В на основе термопласта полиуретанового типа, обладающий высоким уровнем вибропоглощающих характеристик и рекомендованный для изготовления покрытий внутренней поверхности панелей фюзеляжа и эластичных имитаторов силового набора, применяемых для снижения вибраций и шума в салоне транспортных средств [23]. Кроме того, данный материал может быть применен в качестве компенсатора или уплотнительной прокладки между двумя вибрирующими поверхностями. Однако в таком случае, как было показано ранее, он не должен накапливать остаточную деформацию под воздействием сжимающих нагрузок, т. е. не относится к категории хладотекущих.

Цель данной работы – исследование деформации/ползучести вибропоглощающего материала марки ВТП-1В при сжатии в конструкции с болтовыми соединениями для оценки возможности применения уплотнительных прокладок, выполненных из него, в качестве альтернативы слоистым пластикам, в том числе при эксплуатации в среде горюче-смазочных материалов.

Статья подготовлена по результатам работ, выполненных под руководством советника генерального директора «ВИАМ» Р.И. Гирша.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и электрических воздействий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

### Материалы и методы

Объектом исследования являлись образцы листового вибропоглощающего материала марки ВТП-1В, изготовленного методом экструзии через плоскощелевую головку расплава композиции на основе термопластичного полиуретана и специальных добавок. Материал имеет следующие свойства: плотность – не более 1,15 г/см<sup>3</sup>; прочность при растяжении – не менее 19,6 МПа; относительное удлинение при разрыве – не менее 300 %; коэффициент механических потерь при температуре 20 °С и частоте 100 Гц – не менее 0,2 при измерении методом динамического механического анализа (ДМА) в условиях сдвигового нагружения и не менее 0,08 при измерении методом ДМА в условиях трехточечного изгиба, на подложке из сплава Д16-АТ толщиной 1,0 мм; водопоглощение за 24 ч – не более 2,0 %; категория горючести согласно АП-25 (Приложение F, Часть I) – самозатухающий.

Для проведения исследований из листового материала ВТП-1В вырезали образцы толщиной 1,4 мм (среднее значение) и размером 30×30 мм, которые зажимали

между металлическими пластиной и накладками (размером 20×20 мм), выполненными из алюминиевого сплава Д16-АТ толщиной 4 мм, при помощи болтовых соединений с моментом затяжки 1 кг·м.

Конструкция, моделирующая условия работы материала ВТП-1В в качестве уплотнительного материала при сжатии в болтовом соединении, изображена на рис. 1.



Рис. 1. Болтовое соединение, моделирующее условия работы материала марки ВТП-1В в нервюре крыла

Болтовые соединения выдерживали в течение заданного времени: 5, 10, 15, 20, 25 дней, после чего производили их раскрытие и замер толщины образцов материала ВТП-1В в нескольких точках при помощи электронного микрометра для определения величины остаточной деформации (в соответствии с ГОСТ 17035–86).

После снятия нагрузки и релаксации в течение 6 ч проводили повторный замер толщины образцов.

Исследовали также стойкость образцов материала ВТП-1В к воздействию агрессивных сред в случае его контакта с авиационным топливом. Топливостойкость определяли в соответствии с ГОСТ 12020–2018.

Образцы материала в виде дисков диаметром 50 мм и толщиной 1,4 мм помещали в эксикатор, заполненный топливом ТС-1, и выдерживали в течение 30 сут. Контрольное снятие и взвешивание образцов производили через 1, 3, 7, 14 сут.

### Результаты и обсуждение

Внешний вид образца материала ВТП-1В после снятия сжимающей нагрузки представлен на рис. 2. Видно, что образец деформировался и приобрел «подушкообразную» форму.

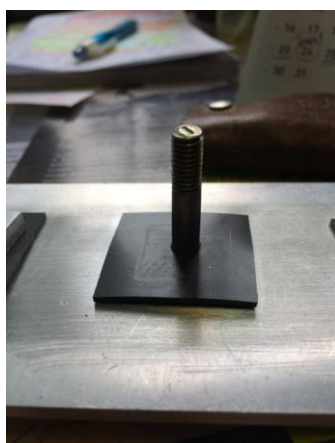


Рис. 2. Образец материала марки ВТП-1В, извлеченный из болтового соединения

Результаты определения абсолютной и относительной деформации образцов материала ВТП-1В непосредственно после снятия нагрузки приведены на рис. 3.

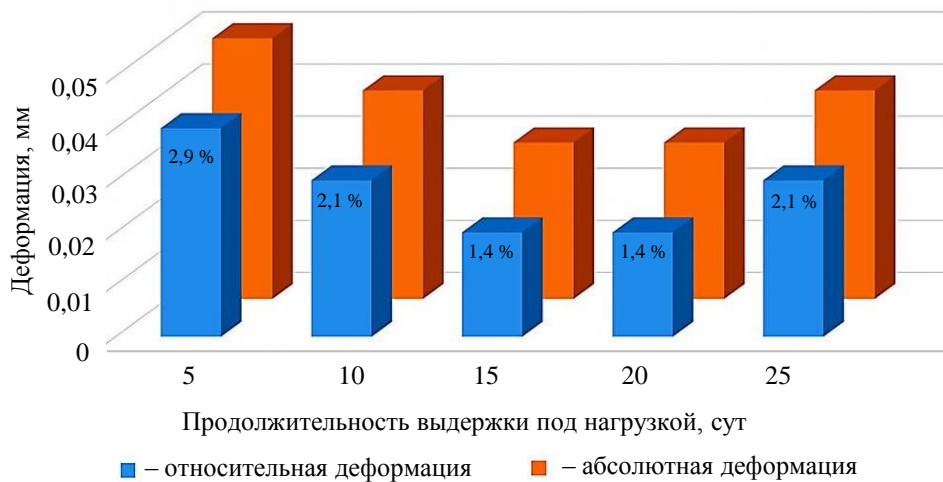


Рис. 3. Деформация образцов материала марки ВТП-1В после сжатия в болтовом соединении в течение различных промежутков времени непосредственно после снятия нагрузки

Из представленных данных видно, что минимальное значение абсолютной деформации находится на уровне 0,03–0,05 мм, значение относительной деформации при этом составляет 1,4–2,9 %. Наибольших значений абсолютная деформация сжатия достигает в первые 5–10 сут. В дальнейшем происходит увеличение толщины и материал релаксирует, стремясь восстановить исходные размеры.

Результаты повторного определения абсолютной и относительной деформации образцов материала ВТП-1В после снятия нагрузки и релаксации в течение 6 ч приведены на рис. 4.

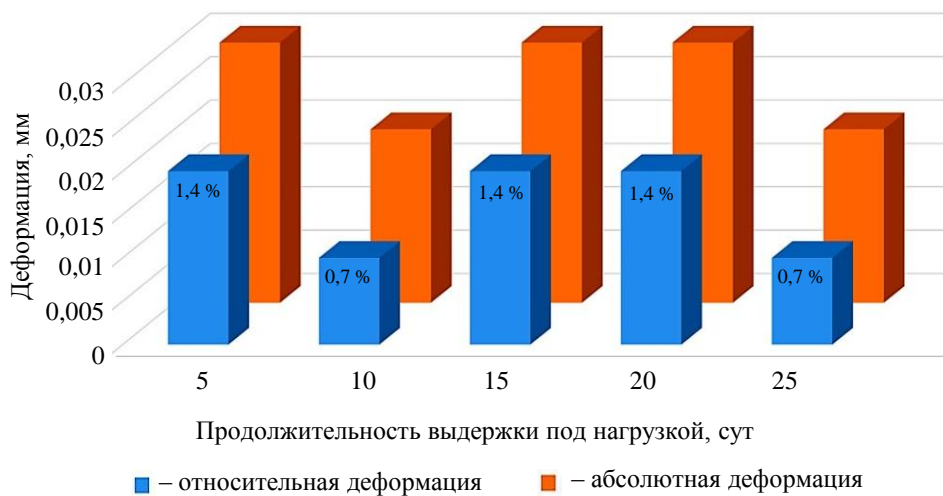


Рис. 4. Деформация образцов материала марки ВТП-1В после сжатия в болтовом соединении в течение различных промежутков времени после снятия нагрузки и релаксации

В результате проведенных измерений установлено, что абсолютная деформация образцов материала ВТП-1В относительно исходных значений находится на уровне 0,02–0,03 мм. Кроме того, из представленных на рис. 4 данных видно, что четкой зависимости восстановления толщины образцов материала от продолжительности их выдержки под давлением не наблюдается. Относительная деформация образцов при этом составляет 0,7–1,4 %, что свидетельствует об отсутствии у материала марки ВТП-1В склонности к хладотекучести и накоплению остаточных деформаций.

Для контрольного сравнения изменений деформационных свойств монолитного материала со слоистым аналогом в тех же условиях исследованы образцы материала ВТП-1В, соединенные с армирующим слоем, состоящим из нескольких монослоев препрега на основе стеклоткани.

Изменение толщины образцов материала марки ВТП-1В-А после снятия нагрузки (в числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее):

| Толщина образцов                                 | Значение толщины, мм     |
|--|--------------------------|
| В исходном состоянии                             | $\frac{2,52-2,54}{2,53}$ |
| После снятия нагрузки (выдержка 5 дней)          | $\frac{2,50-2,55}{2,52}$ |
| После снятия нагрузки и релаксации в течение 6 ч | $\frac{2,51-2,54}{2,52}$ |

Из приведенных данных видно, что толщина образцов после выдержки под давлением в течение 5 сут практически не меняется, относительная деформация составляет 0,4 %, но при этом восстановления до исходных размеров после релаксации также не наблюдается.

Таким образом, наличие армирующего слоя положительным образом сказывается на стойкости материала к деформациям под воздействием сжимающих нагрузок, однако связано с дополнительными стадиями технологического процесса по его нанесению.

Результаты исследования топливостойкости образцов материала ВТП-1В в течение 1–30 сут приведены на рис. 5. Видно, что максимальное насыщение материала топливом ТС-1 происходит в течение первых 7 сут и достигает значения ~9,8 %, а в дальнейшем стабилизируется – зависимость выходит на плато, и увеличение массы образцов относительно исходных значений колеблется в пределах 9,6–9,8 %.

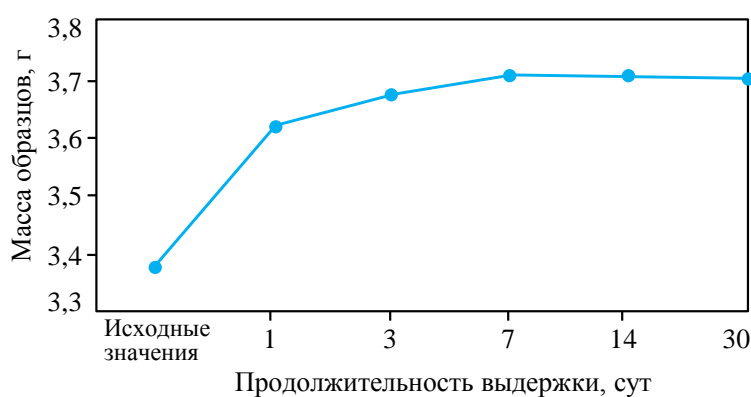


Рис. 5. Зависимость изменения массы образцов материала марки ВТП-1В от продолжительности выдержки в топливе ТС-1 относительно исходных значений

Следует отметить, что топливостойкость образцов материала марки ВТП-1В соответствует уровню свойств материалов аналогичного назначения. Например, данный показатель уплотнительного материала марки ВТЭП-1Л аналогичной химической природы составляет 11 % за 3 сут.

Интересный результат получен при исследовании образцов материала ВТП-1В (толщиной 1,6 мм), выдержанных в топливе ТС-1 в течение 50 сут. Абсолютная деформация материала после выдержки под сжимающей нагрузкой в течение 5 сут непосредственно после раскрытия болтовых соединений составила 0,08 мм, относительная

деформация 4,8 %, а после релаксации в течение 6 ч значения изменились крайне незначительно: 0,07 мм и 4,3 % соответственно. В этой связи интересно исследовать зависимость восстановления геометрических размеров от исходной толщины материала, в том числе после их выдержки в топливе.

При оценке возможности применения вибропоглощающего материала ВТП-1В в качестве уплотнения установлено, что материал характеризуется низким уровнем деформирования под нагрузкой и частично восстанавливает исходную форму после ее снятия. Показано также, что материал устойчив к воздействию агрессивных жидкостей типа топлива ТС-1 (привес за 30 сут находится на уровне 9,6 %) и не склонен к значительным деформациям под нагрузкой в топливонасыщенном состоянии. Таким образом, материал может быть применен для изготовления уплотнений, эксплуатируемых в воздушной среде и среде топлив. Следует также отметить, что наличие у него вибропоглощающих свойств может способствовать повышению стойкости к вибрации уплотнительных соединений на его основе. Преимуществом предлагаемого материала является более технологичное изготовление деталей с возможностью варьирования и получения листов дискретной толщины.

### Заключения

Проведены исследования влияния нагружения на деформативность материала марки ВТП-1В. Установлено, что материал при воздействии нагрузки деформируется в пределах 3 % с последующим восстановлением формы после ее снятия. Восстановление геометрических размеров образцов материала ВТП-1В после снятия нагрузки свидетельствует об отсутствии у него хладотекучести.

Наличие армирующего слоя положительным образом сказывается на стойкости материала ВТП-1В к деформациям вследствие сжимающих нагрузок.

Величина набухания материала марки ВТП-1В в топливе ТС-1 соответствует уровню свойств материалов, рекомендованных для применения в конструкции уплотнительных устройств.

Для дальнейших исследований представляет интерес изучение зависимости восстановления геометрических размеров материала от его исходной толщины, в том числе после выдержки в среде топлива.

Результаты, полученные в процессе исследований, свидетельствуют о возможности применения материалов типа ВТП-1В и ВТП-1В-А в качестве уплотнительных элементов конструкций, эксплуатируемых в воздушной среде и среде топлив.

### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
2. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
3. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
4. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
5. 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.
6. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2016. 820 с.

7. Большой справочник резинщика: в 2 ч. М.: Техинформ, 2012. Ч. 5: Технология резины: Рецептуростроение и испытания: пер. с англ. / под ред. Дж.С. Дика. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
8. Елисеев О.А., Краснов Л.Л., Зайцева Е.И., Савенкова А.В. Переработка и модифицирование эластомерных материалов во всеклиматических условиях // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 309–314.
9. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
10. Федюкин Д.Л., Махлис Ф.А. Технические и технологические свойства резин. М.: Химия, 1985. 240 с.
11. Наумов И.С., Петрова А.П., Чайкун А.М. Резины уплотнительного назначения и снижение их горючести // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2013. № 5. С. 28–35.
12. Наумов И.С. Уплотнительные резины пониженной горючести: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 118 с.
13. Алифанов Е.В., Чайкун А.М., Наумов И.С., Венедиктова М.А. Особенности рецептур резин на основе этиленпропиленовых каучуков и их применение в изделиях специального назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2. С. 53–55.
14. Семенова С.Н., Чайкун А.М., Сулейманов Р.Р. Этиленпропилендиеновый каучук и его применение в резинотехнических материалах специального назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-23-30.
15. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
16. Чайкун А.М., Наумов И.С., Венедиктова М.А., Алифанов Е.В. Новые разработки резин специального назначения на основе фторсилоксановых каучуков // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 3 (42). С. 60–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-60-65.
17. Елисеев О.А., Наумов И.С., Смирнов Д.Н., Брык Я.А. Резины, герметики и огне-теплозащитные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 437–451. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-437-451.
18. Чайкун А.М., Елисеев О.А., Наумов И.С., Венедиктова М.А. Особенности морозостойких резин на основе различных каучуков // *Труды ВИАМ*. 2013. № 12. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2018).
19. Бузник В.М. Современное материаловедение на примере фторполимеров / под ред. В.В. Козика. Томск: Томск. гос. ун-т, 2012. Вып. 1. 42 с. (Академические чтения в Томском государственном университете).
20. Логинов Б.А. Удивительный мир фторполимеров. 2-е изд., доп. М.: ООО «Девятый элемент» 2009. 168 с.
21. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Юрков Г.Ю., Целикин В.В. Новые конструкционные и функциональные ПКМ на основе термопластов и технологии их формования // *Авиационная промышленность*. 2013. № 2. С. 12.
22. Сытый Ю.В., Кислякова В.И., Сагомонова В.А., Николаева М.Ф. Новый многослойный уплотнительный материал ВТП-2П // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 4. С. 32–34.
23. Сытый Ю.В., Кислякова В.И., Ткачев А.А., Абакумова Н.М., Румянцева Т.В. Вибропоглощающий термоэластопласт ВТП-1В // *Авиационные материалы и технологии*. 2004. № 3. С. 30–31.