

Научная статья

УДК 678.4

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-14-26

КАУЧУКИ ДЛЯ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

Е.С. Правада¹, Я.А. Вахрушева¹, Д.М. Герасимов¹, А.М. Чайкун¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Обзор посвящен каучукам, применяемым в производстве герметизирующих материалов (герметиков). По данным научно-технической литературы и экспериментальным работам проанализированы зависимости свойств герметизирующих материалов от структуры каучуков, выявлены общие требования к герметикам, используемым в ответственных изделиях. Дана оценка каучукам, применяемым в герметизирующих материалах авиационного назначения, и их основным техническим характеристикам. Выявлена перспективность использования совмещенных полимеров (каучуков) в производстве герметиков для ответственных изделий.

Ключевые слова: герметики, каучуки специального назначения, совмещение полимеров, адгезия, герметизация ответственных изделий, эластомерные герметизирующие материалы

Для цитирования: Правада Е.С., Вахрушева Я.А., Герасимов Д.М., Чайкун А.М. Каучуки для герметизирующих материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-14-26.

Scientific article

RUBBER-BASED SEALANTS (review)

E.S. Pravada¹, Ya.A. Vakhrusheva¹, D.M. Gerasimov¹, A.M. Chaikun¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The review is devoted to rubbers used in the production of sealing materials (sealants). According to literary sources and experimental works, the dependences of the properties of sealing materials on the structure of rubbers are analyzed, general requirements for sealants used in critical products are identified. The assessment of rubbers used in sealing materials for aviation purposes and their main technical characteristics is given. The prospects of using combined polymers (rubbers) in the production of sealants for critical products have been revealed.

Keywords: sealants, special purpose rubbers, polymer combination, adhesion, sealing of critical products, elastomeric sealing materials

For citation: Pravada E.S., Vakhrusheva Ya.A., Gerasimov D.M., Chaikun A.M. Rubber-based sealants (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-14-26.

Введение

Проблема защиты соединений различных конструкций от воздействия внешних сред остается актуальной. Технический прогресс требует более совершенных способов

и материалов для герметизации, в том числе создания новых и модернизации существующих герметизирующих материалов [1–10], свойства которых во многом определяют работоспособность деталей и узлов авиационного назначения [11–15]. В отличие от других средств герметизации, герметики используются в виде жидкотекучих или пастообразных масс, распределяющихся при помощи простых технологических операций в зонах швов, тем самым обеспечивая их герметичность в условиях перепада давлений, переменных температур и нагрузок, за счет перехода в резиноподобное состояние. Герметикам во многом присущи свойства резин (эластичность, прочность при разрыве, относительное и остаточное удлинение, твердость, температура хрупкости и т. д.) и клеев (вязкость, адгезия к различным материалам). К герметизирующим материалам предъявляют менее жесткие требования по упруго-деформационным характеристикам, чем к резинам и клеям. В случае недостаточной адгезии герметика к поверхности применяют подслои (клеи, аппреты, грунтовки и т. п.). Главными преимуществами герметиков, благодаря наличию в их рецептуре различных каучуков, перед другими уплотнительными материалами являются эластичность, адгезия к различным конструкционным материалам и технически простой процесс нанесения [16]. Физико-механические свойства герметиков, как и резин, определяются релаксационными процессами и скоростью кристаллизации. Поэтому данные о современных исследованиях в области получения новых герметизирующих композиций представляют большой интерес [17–20].

Исследование выполнено при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Общие сведения о герметиках

Герметизация означает полную изоляцию защищаемой поверхности или места стыка от воздействия внешней среды. Она обеспечивает защиту специальной аппаратуры или ее отдельных элементов за счет образования оболочки, повышения механической прочности и обеспечения стабильности технических характеристик защищаемых конструкций или материалов в условиях эксплуатации и хранения, упрощения конструкций уплотнительных узлов, в том числе с уменьшением их массы и габаритов. Герметизация делится на внутришовную и поверхностную [21, 22].

При выборе и применении герметика следует учитывать такие особенности герметизирующего материала, как низкая теплопроводность, возникновение внутренних напряжений в отвержденном полимере, высокий температурный коэффициент линейного расширения, неустойчивость к коронным и искровым электрическим разрядам, снижение прочностных и диэлектрических характеристик при эксплуатации в результате теплового и ионизационного старения и т. п. [22].

Промышленность выпускает различные виды герметиков: самоотверждающиеся, вулканизирующиеся, шпатлевки, пасты, мастики, ленты, невысыхающие герметики, замазки [21]. К герметизирующим материалам предъявляют следующие требования:

- высокая адгезия к субстрату;
- средняя когезионная прочность;
- инертность к контактирующим поверхностям;
- защита от воздействия эксплуатационных факторов (влажность, свет, повышенная и пониженная температуры и т. п.) [23].

При применении герметиков необходимо учитывать продолжительность их работоспособности – промежуток времени, в течение которого они находятся в вязкотекучем состоянии и могут быть легко нанесены на соответствующую рабочую поверхность [1]. Компоненты герметиков должны быть доступными, а технология их нанесения – механизирована и автоматизирована [2, 24].

Основные характеристики герметиков

Сохранение герметизирующих свойств в экстремальных условиях критически необходимо при эксплуатации таких ответственных изделий, как самолеты, космические аппараты и оборудование. Работоспособность герметика в требуемых условиях эксплуатации прежде всего обеспечивает полимер, на основе которого его изготавливают. Благодаря физико-химическим и упруго-деформационным характеристикам основы композиции герметик проявляет необходимые специальные свойства – теплостойкость, морозостойкость, газопроницаемость, влагостойкость, маслобензостойкость и т. п. (табл. 1) [25–27]. Для создания адгезионных герметизирующих изделий используют преимущественно полимеры с небольшой молекулярной массой, обеспечивающие требуемые реологические свойства адгезива, а также физико-механические и защитные свойства конечного продукта [16, 28–35].

Таблица 1

Стойкость стандартных резин на основе некоторых каучуков к внешним воздействиям

Каучук	Стойкость к воздействию			
	масла	воды	атмосферного старения	озона
НК	П	Х	УС	П
СКИ	П	Х	УС	П
БСК	П	Х	УС	УС
БК	ОП	ОХ	ОХ	О
СКЭП, СКЭПТ	ОП	ОХ	О	О
БНК	Х	Х	П	УС
ХПК	Х	Х	Х	Х
СКТС	У	О	О	О
ФК	ОХ	ОХ	О	О

Примечания:
 1. НК – натуральный каучук; СКИ – изопреновый каучук; БСК – бутадиенстирольный каучук; БК – бутилкаучук; СКЭП и СКЭПТ – этилен-пропиленовые каучуки – двойные и тройные; БНК – бутадиен-нитрильный каучук; ХПК – хлоропеновый каучук; СКТС – силоксановый каучук; ФК – фторкаучук.
 2. О – отличная; Х – хорошая; ОХ – очень хорошая; У – умеренная; УС – умеренно средняя; П – плохая; ОП – очень плохая.

Герметик, применение которого должно соответствовать условиям эксплуатации, кроме того, должен удовлетворять критерию экономической целесообразности. Замена дорогостоящего каучука более дешевым позволяет снизить себестоимость продукта без потери требуемых свойств [24, 26, 36]. Физико-механические свойства и характеристики некоторых герметиков на основе различных каучуков приведены в табл. 2 и 3 соответственно [16].

Таблица 2

Физико-механические свойства герметиков на основе различных каучуков

Свойства	Значения свойств герметиков на основе каучуков		
	жидких полисульфидных	жидких силоксановых	фторсодержащих
Плотность, кг/м ³	1200–1800	1000–2300	1600–2300
Условная прочность при растяжении, МПа	1,5–4,0	1,5–4,5	7,0–14,0
Относительное удлинение при разрыве, %	150–500	150–600	300–700
Относительное остаточное удлинение после разрыва, %	5–15	0–10	20–50
Прочность при отслаивании, кН/м	1,5–4,5	1,3–2,5	3,0–6,0
Температура хрупкости, °С	–42	–78	–20÷–30

Таблица 3

Характеристики невысыхающих герметиков на основе различных каучуков

Герметик	Основа герметика	Рабочие температуры, °С	Пенетрация, мм	Срок хранения, мес	Область применения
У-22	Полиизобутилен П-118 или П-80	-50÷+70	8–10	12	Автомобилестроение
Замазка тиоколовая	Тиокол ДА	-60÷+100	4–11	12	Авиация
51-Г-3	Этиленпропиленовый каучук А	-60÷+100	4,5–7,0	12	Приборостроение, радиотехника
51-Г-4		-60÷+100 (кратковременно – до +140)	16–20	36	
51-Г-6	Полиизобутилен П-20	-50÷+70	22–23	6	Автомобилестроение
51-Г-7		-50÷+90	8–12	6	

Каучуки для изготовления герметиков

Наиболее часто в качестве основы герметизирующей композиции используют следующие полимерные материалы:

Полисульфидные каучуки. Герметики на основе тиоколов с молекулярной массой 1500–4000 входят в число самых используемых в мире, поскольку сочетают простоту и доступность синтеза с высокими техническими характеристиками. Их применяют в случаях, когда сопрягаемые поверхности подвергаются динамическим или статическим деформациям растяжения или сжатия при перепадах температур от -60 до +150 °С и одновременному воздействию растворителей и агрессивных сред. В авиации используют тиоколовые герметики марок У-30МЭС-5НТ, У-30МЭС-5, У-30МЭС-5М, УТ-32, УТ-32НТ, УТ-34, ВТК-1-29, ВИТЭФ-1, ВЭР-1, ВИТО-1 для герметизации кабин, топливных отсеков, остекления и т. д., материалы СИЛАСТ применяют для герметизации стыков сборных элементов промышленных сооружений. Их жизнеспособность составляет 0,5–12 ч [16, 37].

Силоксановые каучуки. Такие каучуки с молекулярной массой 20000–100000 линейного строения с боковыми метильными, этильными и фенильными звеньями и концевыми гидроксильными группами применяют для производства силоксановых герметиков общего и специального назначения. Герметики специального назначения включают герметизирующие материалы, обладающие полезными нетипичными характеристиками: повышенной тепло- и морозостойкостью, малой плотностью, электроизоляционными и улучшенными технологическими свойствами. Фторсилоксановые каучуки благодаря наличию в цепи полярных групп обладают топливостойкостью. В зависимости от типа вулканизирующего агента структурирование может происходить без нагрева. Жизнеспособность герметика составляет 1–6 ч.

Силоксановые герметики марки ВИКСИНТ (У-1-18, У-2-28, У-4-21, У-20-92, У-20-99) относят к герметикам общего назначения и применяют для поверхностной герметизации (кроме герметика У-2-28, который используется для внутришовной герметизации и эластичного крепления различных материалов, работающих при высоких температурах).

Герметики УФ-7-21 и УФ-7-21Б обладают повышенной морозостойкостью (их используют при температурах до -120 °С); УФ-11-21 и УФ-12ВТ – повышенной теплоустойкостью (их применяют при температурах до 350 °С в течение 120 ч на воздухе или при 400 °С в течение 5 ч, а также при температурах до 350–400 °С в течение до 20 ч в замкнутых объемах без доступа воздуха); ВИАТ, ВИАТ-1 и ВГО-1 обладают улучшенными технологическими свойствами.

К фторсодержащим относят герметики ВГФ и ВГМ-4. Герметики типа ВГФ являются тепло- и топливостойкими, работоспособны в агрессивных средах (топлива, масла, гидрожидкости и т. п.). Герметизирующие материалы, изготовленные на основе герметиков ВГМ-4, обладают длительной теплостойкостью (работоспособны при температуре 300 °С), а катализатор является веществом 4 класса опасности, в то время как герметики типа ВГФ используются при температуре 250 °С и относятся к 1 классу опасности.

Полихлоропреновые каучуки (как высокомолекулярные, так и низкомолекулярные). Нашли применение в производстве герметизирующих материалов с высокой стойкостью к абразивному износу и хорошей адгезией к таким материалам, как металл, резина, бетон и т. д. Недостатками полихлоропреновых герметиков являются большое водопоглощение и низкая стойкость к действию многих органических растворителей.

Фторсодержащие каучуки. Для изготовления герметиков 51-Г-1, 51-Г-2, 51-Г-9 применяют каучуки типа СКФ-26 и СКФ-32. Фторкаучуки обладают высокой тепло-, водо-, атмосферостойкостью, стойкостью к воздействию различных коррозионных сред, синтетических рабочих жидкостей, нефтепродуктов, работоспособностью при температурах до 250 °С, но имеют неудовлетворительные низкотемпературные свойства, высокую стоимость и плохую адгезию к конструкционным материалам [16].

Бутилкаучук. Обладает высокой плотностью упаковки макромолекул, следствием чего являются малые значения деструкции при динамических нагрузках, газопроницаемости и высокие значения эластичности в широком диапазоне температур, стойкости к воздействию ультрафиолета, термо-, водо- и атмосферостойкости, а также вибродемпфирования [25, 27, 38, 39]. Благодаря линейному строению макромолекул, относительно узкому молекулярно-массовому распределению и статическому распределению изопреновых звеньев по всей макромолекуле бутилкаучука [27] его используют в термостойких невысыхающих герметиках специального назначения (на основе бутилкаучукового герметика разработан вибродемпфирующий материал для железнодорожных подвижных пассажирских составов [40]). Для придания дополнительных специальных свойств (маслобензостойкость, теплостойкость и т. п.) промышленность выпускает его модифицированные аналоги – хлор- и бромсодержащий бутилкаучук [3, 40]. Благодаря наличию атомов хлора в звеньях хлорсодержащий бутилкаучук более стоек к окислению и обладает большей скоростью вулканизации, чем бутилкаучук [27, 15]. Хлор- и бромсодержащие бутилкаучуки являются хорошими диэлектриками [16].

Бутадиен-нитрильные каучуки [4, 41]. Используют в производстве герметизирующих материалов благодаря их повышенной стойкости к набуханию в алифатических растворителях, стойкости к тепловому старению, хорошей адгезии к латунированному металлу, алюминию и его сплавам [42].

Этилен-пропиленовые каучуки – двойные (СКЭП) и тройные (СКЭПТ). Обладают структурой, практически не содержащей двойных связей в основной цепи полимера. Это придает герметикам на их основе озоно- и теплостойкость, нерастворимость в кислотах и щелочах, неподверженность набуханию в воде и хорошие диэлектрические свойства [1, 43, 44]. Физические свойства СКЭПТ зависят от соотношения этилена и пропилена, третий мономер не оказывает существенного влияния на указанные характеристики. Промышленность выпускает каучуки, содержащие 30–40 % пропилена, благодаря которому они являются полностью аморфными полимерами, не склонными к кристаллизации при хранении или деформации [42]. Показатель текучести СКЭПТ находится в пределах от 0,25 до 0,66 усл. ед. в зависимости от марки каучука, обеспечивая отличные адгезионные свойства. Легкость смешения с ингредиентами увеличивает

скорость производства изделий на его основе [27]. Перерабатывается СКЭПТ в зависимости от метода при температурах до 200 °С [14, 45, 46] и эксплуатируется при температурах до 150 °С [47], что делает данный каучук перспективной основой для теплостойких материалов.

Полиуретановые герметики. Их применение связано с особой структурой полиуретана, простотой синтеза и возможностью регулирования физико-механических свойств продукта, которые зависят от структурирующего агента и природы выбранной полиэфирной части: при использовании сложных полиэфиров изготавливают эластичные герметики с высокими прочностными свойствами и низкой водо- и морозостойкостью; введение простых полиэфиров делает данные недостатки менее заметными. Использование олигодиенуретана в качестве основы композиции позволяет проводить вулканизацию при отрицательных температурах (до –10 °С) и наносить на влажную поверхность при условии устойчивости к действию влаги [15, 16, 27].

Особенности совмещения каучуков различных типов и перспективы создания герметиков на их основе

Каждый каучук обладает собственными уникальными свойствами. Для придания дополнительных свойств в резиновую смесь вводят различные ингредиенты, иногда дорогостоящие. Однако получить требуемые свойства можно путем введения в композицию каучука, обладающего необходимыми характеристиками [28, 29, 42]. Для успешного совмещения следует учитывать совокупность факторов, воздействующих на полимерную матрицу материала в процессе совмещения низкомолекулярного и высокомолекулярного компонентов (термодинамическую совместимость каучуков и ингредиентов, а также протекающие механохимические и вязкоупругие процессы при смешении), которые приводят к снижению энтропии и усложнению топологии системы. В результате полимерная смесь приобретает дополнительные требуемые свойства [28–31, 47–49].

При смешении таких композиций важно учитывать физико-химические показатели каждого из совмещаемых полимеров – параметр растворимости и молекулярную массу. Для образования однофазных термодинамически устойчивых полимерных систем определяют технологические и эксплуатационные характеристики герметиков [50–52].

При создании герметизирующих материалов на основе смесей каучуков полимер с наибольшей молекулярной массой выполняет функцию дисперсной среды в смеси и определяет поверхностные свойства материала – адгезию и сопротивление действию растворителей [51].

Инверсия фаз позволяет регулировать жесткость и модуль эластичности смеси [51, 53, 54].

Технологические методы смешения также оказывают воздействие на свойства смеси – при одинаковых условиях (но разных способах совмещения) итоговые композиции проявляют разные физические свойства. В зависимости от вязкости полимеров и условий смешения возможны вариации фазового распределения полимера по объему совмещенной композиции, влияющие на физико-механические свойства материала [51, 53, 54]. Регулирование механохимических процессов смешения позволяет получать различные структуры в смеси полимеров, что способствует варьированию свойств конечного продукта [49, 51, 55, 56]. Так, в работе [41] показано, что введение тиокола в количестве 20 % (по массе) в бутадиен-нитрильный каучук улучшило физико-механические характеристики, а также стойкость герметика на их основе к воздействию агрессивных сред (см. табл. 4 и рисунок). Добавление более низкомолекулярного тиокола в больших количествах приводит к снижению указанных характеристик,

поскольку в этом случае он проявляет себя как пластификатор [41]. В работе [17] показано, что в результате введения винилтриэтоксисилана в композицию «бутилкаучук + сополимер этилена с винилацетатом» образуются структуры по типу так называемой полувзаимопроникающей сетки. В результате материал приобретает повышенную когезионную прочность.

Таблица 4

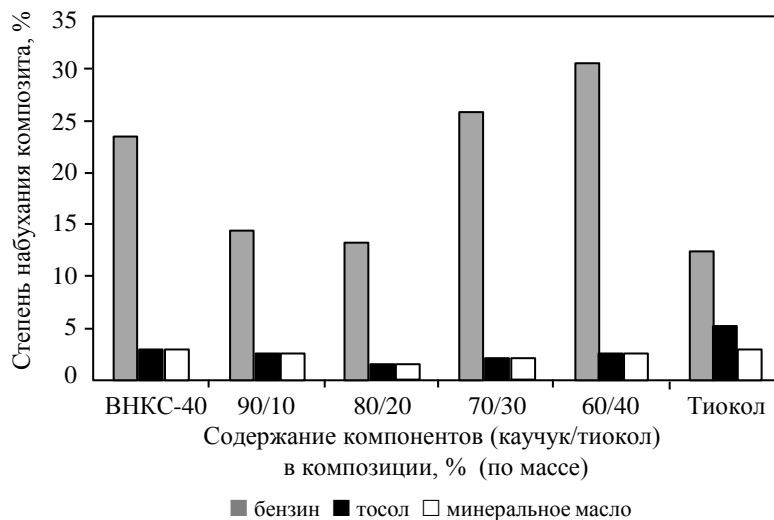
Физико-механические и адгезионные характеристики герметизирующего материала на основе бутадиен-нитрильного каучука марки БНКС-40 и тиокола

Соотношение БНКС-40/ тиокол, % (по массе)	Прочность при отрыве, МПа		Прочность при сдвиге, МПа	Прочность при отслаивании, кН/м	Относительное удлинение при разрыве, %	Условная прочность при разрыве, МПа
	при совмещении поверхностей					
	сталь–сталь*	дюралюминий–дюралюминий	резина–резина**			
БНКС-40	0,2	0,2	0,1	0,12	180	15,02
90/10	0,8	0,4	0,2	0,3	330	13,27
80/20	0,7	0,35	0,1	0,2	300	16,4
70/30	0,5	0,3	0,07	0,08	340	14,4
60/40	0,2	0,3	0,1	0,06	310	13,22

* Сталь марки Ст.3.

** На основе бутадиен-нитрильного каучука марки БНКС-40 АМН.

Примечание. Характер разрушений для всех испытаний – адгезионный. Композиции вулканизованы при температуре 140 °С.



Степень набухания композиционного материала на основе бутадиен-нитрильного каучука и тиокола при температуре 23 °С в течение 72 ч

Адгезионная прочность возникает между разнородными поверхностями, приведенными в контакт, посредством образования молекулярных связей между адгезивом и субстратом. Как правило, герметизируемые изделия обладают твердой поверхностью, поэтому прочность адгезионной связи зависит от типа каждой поверхности – как герметизируемой, так и герметика. В работе [22] рассмотрено образование связи между твердыми телами и фенолформальдегидной смолой: прочность крепления адгезива к твердому субстрату достигается и регулируется количеством функциональных групп (гидроксильных, карбоксильных, полиамидных или нитрогрупп), температурой прогрева полимера (регулирование надмолекулярных образований, препятствующих формированию адгезионного контакта путем изменения числа функциональных групп, формирующих молекулярные связи в зоне контакта).

Улучшенные адгезионные свойства материала являются дополнительным следствием совмещения каучуков за счет увеличения количества концевых макромолекул на поверхности смеси, способствующих возрастанию площади контакта и способных реагировать с субстратом. При совмещении неполярных и полярных каучуков повышается полярность смеси, что приводит к увеличению числа поверхностей, способных контактировать с адгезионной композицией [32–35]. В результате материал приобретает свойства всех полимеров, в него входящих [57], а разрушение приобретает когезионный характер. Наблюдаемые явления связаны с уменьшением сорбционной емкости материала в результате совмещения, что немаловажно для герметиков [18].

Заключения

Уникальная структура каучуков специального назначения позволяет использовать их в качестве основы для герметизирующих материалов ответственного назначения. Широкий ассортимент марок каждого из них с различным химическим строением и техническими характеристиками дает возможность создавать и модернизировать существующие герметизирующие композиции.

При помощи технологических приемов возможно разнофазное совмещение различных полимеров, позволяющее увеличивать когезионную прочность или адгезию без дополнительного введения наполнителей и специальных агентов липкости, которые повышают стоимость продукта. При этом свойства полученных таким образом герметиков соответствуют основным требованиям, предъявляемым к герметизирующим материалам. Эффективность адгезионных систем на основе совмещенных полимеров известна [57]. Подобные подходы позволяют получать герметизирующие материалы массового ассортимента для ответственных изделий с меньшими затратами.

Таким образом, в данной работе показано, что каучуки специального назначения перспективны при разработке новых ответственных герметиков, в том числе для таких сфер промышленности, как авиация и космонавтика. Развитие науки и полимерной промышленности, а также постоянное совершенствование технологии получения полимеров позволяют увеличивать ассортимент и улучшать свойства герметизирующих материалов [58–61].

Список источников

1. Смыслова Р.А., Котлярова С.В. Справочное пособие по герметизирующим материалам на основе каучуков. М.: Химия, 1976. 72 с.
2. Заикин А.Е., Софьина С.Ю., Стоянов О.В. Полимерные ленты с клеевым слоем для антикоррозионной изоляции трубопроводов // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 6. С. 98–112.
3. Performed adhesive compositions: pat. 617614 US. No. 4581092; filed 05.06.84; publ. 08.04.86.
4. Минибаева Л.А., Муртазина Л.И., Галимзянова Р.Ю., Хакимуллин Ю.Н. Влияние природы и содержания карбоната кальция на деформационно-прочностные свойства неотверждаемых герметиков на основе бутадиен-нитрильного каучука // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 9. С. 105–107.
5. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
6. Шитов Р.О., Китаева Н.С., Ширякина Ю.М., Куршев Е.В. Исследование влияния модифицирующих добавок различной природы на термоокислительную устойчивость модельного кремнийорганического связующего // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 03. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-19-28.
7. 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.

8. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тез. докладов. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
9. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. С. 346–348.
10. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.
11. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
12. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
13. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
14. Куршев Е.В., Лонский С.Л., Мекалина И.В. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности органического стекла в полусушном и субтропическом климате // Труды ВИАМ. 2022. № 3 (109). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-15-26.
15. Силаева А.А., Кузнецова В.А., Железняк В.Г., Куршев Е.В. Исследование адгезии функциональных лакокрасочных покрытий для защиты поверхности ПКМ // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-59-66.
16. Большой справочник резинщика: в 2 ч. / под ред. С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозова. М.: Техинформ, 2012. Ч. 2: Резины и резинотехнические изделия. 648 с.
17. Лисаневич М.С., Галимзянова Р.Ю., Русакова С.Н. и др. Термопластичные герметики отверждающегося типа на основе бутилкаучука и сополимера этилена с винилацетатом // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 4. С. 9–12.
18. Русанова С.Н. Модификация сополимеров этилена с полярными сомономерами предельными алкоксисиланами: дис. ... д-ра хим. наук. Казань, 2017. 219 с.
19. Игнатов А.В. Современные достижения в области клеев и герметиков // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 11. С. 35–39.
20. Грядунова Ю.Е., Никулин С.С., Белых А.Г., Посанчуков Д.П. Повышение показателей герметизирующих составов электрическими полями // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 4. С. 35–39.
21. Кардашов Д.А. Клеи и герметики. М.: Химия, 1978. 200 с.
22. Еременко В.Н. Физическая химия конденсированных фаз, сверхтвердых материалов и их границ раздела. Киев: Наукова думка, 1975. 231 с.
23. Имамутдинов И.В., Галимзянова Р.Ю., Хакимуллин Ю.Н. Герметики на основе эластомеров // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 6. С. 69–74.
24. Агаянц И.М. Пять столетий каучука и резины. М.: Модерн-А, 2002. 432 с.
25. Гармонов И.В. Синтетический каучук. Л.: Химия, 1976. 752 с.
26. Брык Я.А., Смирнов Д.Н. Исследование морозостойкости авиационных герметиков // Труды ВИАМ. 2018. № 1 (61). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2022). DOI: 10.18577/23007-6046-2018-0-1-9-9.
27. Большой справочник резинщика: в 2 ч. / под ред. С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозова. М.: Техинформ, 2012. Ч. 1: Каучуки и ингредиенты. 744 с.
28. Иржак В.И. Топологическая структура полимеров. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. 520 с.
29. Иржак В.И. Архитектура полимеров. М.: Наука, 2012. 367 с.
30. Кулезнев В.Н., Шершнева В.А. Химия и физика полимеров. СПб.: Лань, 2014. 368 с.
31. Тодмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия, 1984. 632 с.
32. Перфильева С.А., Шашок Ж.С., Усс Е.П. и др. Конфекционная клейкость наполненных резиновых смесей с нефтеполимерными смолами // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 3. С. 21–26. DOI: 10.31044/1813-7008-2020-0-3-21-26.
33. Воюцкий С.С. Аутогезия и адгезия полимеров. М.: Ростехиздат, 1960. 244 с.
34. Васенин Р.М. Адгезия полимеров. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 17–22.
35. Чалых А.Е. Диффузия в полимерных системах. М.: Химия, 1987. 311 с.
36. Строилов С.В., Люсова Л.Р., Глаголев В.А. Адгезионные композиции с постоянной липкостью на основе бутадиен-нитрильного каучука // Вестник МИТХТ. 2009. Т. 4. № 2. С. 24–27.

37. Брык А.Я., Елисеев О.А., Смирнов Д.Н. Защита от коррозии магниевых сплавов полисульфидных герметиков // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 10. URL <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-10-10.
38. Захаров В.П., Ганиев Г.М., Терещенко К.А., Утилин Н.В. Перспективные технологические решения производства низкомолекулярного бутилкаучука, используемого в качестве основы герметиков // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. № 12. С. 11–15.
39. Технология резины: рецептуростроение и испытания / под ред. Дж.С. Дика; пер. с англ. под ред. В.А. Шершнева. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
40. Вагин С.Ю., Васин В.П., Здорикова Г.А., Рудакова Т.А. Трудногорючий вибродемпфирующий материал // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 10. С. 13–17.
41. Слободкина К.Н., Рудаков А.А., Макаров Т.В., Вольфсон С.И. Маслобензостойкие герметизирующие композиции на основе бутадиен-нитрильного каучука и тиокола // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 5. С. 12–14.
42. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов: учебник для вузов. М.: НППА «Истек», 2009. 504 с.
43. Муртазина Л.И., Гарифулин А.Р., Никульцев И.А. и др. Влияние карбоната кальция на свойства неотверждаемых герметиков на основе этиленпропилендиенового каучука и термoplastов // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 1. С. 21–26.
44. Муртазина Л.И., Гарифуллин А.Р., Никульцев И.А. и др. Неотверждаемые герметики высокого наполнения на основе этиленпропилендиенового каучука // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 24. С. 71–73.
45. Осошник И.А., Шутилин Ю.Ф., Карманова О.В. Производство резиновых технических изделий. Воронеж: Воронежск. гос. технол. акад., 2007. 972 с.
46. Федюкин Д.П., Махлес Ф.А. Технические и технологические свойства резин. М.: Химия, 1985. 240 с.
47. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 576 с.
48. Meyer K.H. Propriétés de polymères en solution XVI. Interprétation statistique des propriétés thermodynamiques de systèmes binaires liquides // Helvetica Chimica Acta. 1940. Vol. 23. No. 1. P. 1063–1070. DOI: 10.1002/hlca.194002301130.
49. Барамбойм Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений. М.: Химия, 1971. 364 с.
50. Шварц А.Г., Гинзбург Б.Н. Совмещение каучуков с пластиками и синтетическими смолами. М.: Химия, 1972. 224 с.
51. Богданов В.В., Торнер Р.В., Красовский В.Н., Редер Э.О. Смешение полимеров. Л.: Химия, 1979. 192 с.
52. Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. Коллоидная химия. СПб.: Лань, 2010. 336 с.
53. Bohn K. Die Einfriertemperatur des Polyäthylens // Kolloid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere. 1964. No. 1. P. 10–15.
54. Берлин Ал.Ал., Вольфсон С.А., Ошмян В.Г., Ениколопов Н.С. Принципы создания композиционных полимерных материалов. М.: Химия, 1990. 240 с.
55. Perry E. Block polymers of styrene and acrylonitrile // Journal of Applied Polymer Science. 1964. Vol. 8. No. 6. P. 2605–2618. DOI: 10.1002/APP.1964.070080609.
56. Слонимский Г.Л., Резцова Е.В. О взаимной растворимости полимеров. V. Механохимическое совмещение // Высокомолекулярные соединения. 1959. Т. 1. № 4. С. 534–538.
57. Новицкая С.П., Нудельман З.Н., Донцов А.А. Фторэластомеры. М.: Химия, 1988. 240 с.
58. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Колпачков Е.Д. Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 80–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88.
59. Хорова Е.А., Мышлявцев А.В., Стрижак Е.А., Третьякова Н.А. Исследование гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков методами дифференциальной сканирующей калориметрии и динамического механического анализа // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 11–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-11-16.
60. Коврижкина Н.А., Кузнецова В.А., Силаева А.А., Марченко С.А. Способы улучшения свойств лакокрасочных покрытий с помощью введения различных наполнителей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.

61. Кузнецова В.А. Влияние эластомерного модификатора на механические и вязкоупругие свойства эпоксидно-каучуковых композиций для эрозионностойких покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-56-62.

References

1. Smyslova R.A., Kotlyarova S.V. *Reference manual for sealing materials based on rubbers*. Moscow: Chemistry, 1976, 72 p.
2. Zaikin A.E., Sofina S.Yu., Stoyanov O.V. Polymer tapes with an adhesive layer for anticorrosive insulation of pipelines. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2010, no. 6, pp. 98–112.
3. *Performed adhesive compositions*: pat. 617614 US, no. 4581092; filed 05.06.84; publ. 08.04.86.
4. Minibaeva L.A., Murtazina L.I., Galimzyanova R.Yu., Khakimullin Yu.N. Influence of the nature and content of calcium carbonate on the deformation-strength properties of non-cured sealants based on nitrile rubber. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, no. 9, pp. 105–107.
5. Kablov E.N. The sixth technological order. *Nauka i zhizn*, 2010, no. 4, pp. 2–7.
6. Shitov R.O., Kitaeva N.S., Shiryakina Yu.M., Kurshev E.V. Research of influence of modifiers of varied nature on the thermo-oxidative stability of a model silicone binder. *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-19-28.
7. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: abstracts. reports. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 25–26.
9. *History of aviation materials science. VIAM – 80 years: years and people*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2012, pp. 346–348.
10. Kablov E.N. Aerospace materials science. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2008, no. 3, pp. 2–14.
11. Kablov E.N. Chemistry in aviation materials science. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.
12. Kablov E.N. Materials for aerospace engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
13. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
14. Kurshev E.V., Lonskii S.L., Mekalina I.V. Influence of long climatic aging on microstructure of surface of organic glass in semi-arid and subtropical climate. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (109), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-15-26.
15. Silaeva A.A., Kuznetsova V.A., Zheleznyak V.G., Kurshev E.V. Research of adhesion and adhesive durability of functional paint coatings for protection of polymer composite surface. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-59-66.
16. *A large guide rubberman*: in 2 parts. Eds. S.V. Reznichenko, Yu.L. Morozov. Moscow: Tekhinform, 2012, part 2: Rubbers and rubber products, 648 p.
17. Lisanevich M.S., Galimzyanova R.Yu., Rusakova S.N. Curing type hot melt sealants based on butyl rubber and ethylene-vinyl acetate copolymer. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2018, no. 4, pp. 9–12.
18. Rusanova S.N. *Modification of ethylene copolymers with polar comonomers by saturated alkoxy silanes*: thesis, Dr. Sc. (Chem.). Kazan, 2017, 219 p.
19. Ignatov A.V. Modern achievements in the field of adhesives and sealants. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2015, no. 11, pp. 35–39.
20. Griadunova Yu.E., Nikulin S.S., Belykh A.G., Posanchukov D.P. Increasing the performance of sealing compositions by electric fields. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2018, no. 4, pp. 35–39.

21. Kardashov D.A. *Adhesives and sealants*. Moscow: Chemistry, 1978, 200 p.
22. Eremenko V.N. *Physical chemistry of condensed phases, superhard materials and their interfaces*. Kyiv: Naukova dumka, 1975, 231 p.
23. Imamutdinov I.V., Galimzyanova R.Yu., Khakimullin Yu.N. Sealants based on elastomers. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 6, pp. 69–74.
24. Agayants I.M. *Five centuries of rubber and rubber*. Moscow: Modern-A, 2002, 432 p.
25. Garmonov I.V. *Synthetic rubber*. Leningrad: Chemistry, 1976, 752 p.
26. Bryk Ya.A., Smirnov D.N. Research of frost resistance of aeronautical sealants. *Trudy VIAM*, 2018, no. 1 (61), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 8, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-9-9.
27. *A large guide rubberman*: in 2 parts. Eds. S.V. Reznichenko, Yu.L. Morozov. Moscow: Tekhninform, 2012, part 1: Rubbers and ingredients, 744 p.
28. Irzhak V.I. *Topological structure of polymers*. Kazan: Publishing House of KNRTU, 2013, 520 p.
29. Irzhak V.I. *Polymer architecture*. Moscow: Nauka, 2012, 367 p.
30. Kuleznev V.N., Shershnev V.A. *Chemistry and physics of polymers*. St. Petersburg: Lan, 2014, 368 p.
31. Todmor Z., Gogos K. *Theoretical foundations of polymer processing*. Moscow: Chemistry, 1984, 632 p.
32. Perfil'eva S.A., Shashok Zh.S., Uss E.P. and other Confectionary stickiness of filled rubber mixtures with petroleum resins. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 3, pp. 21–26. DOI: 10.31044/1813-7008-2020-0-3-21-26.
33. Voyutsky S.S. *Autohesion and adhesion of polymers*. Moscow: Rostekhizdat, 1960, 244 p.
34. Vasenin R.M. *Adhesion of polymers*. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1963, pp. 17–22.
35. Chalykh A.E. *Diffusion in polymer systems*. Moscow: Chemistry, 1987, 311 p.
36. Stroilov S.V., Lyusova L.R., Glagolev V.A. Adhesive compositions with permanent tack based on nitrile rubber. *Vestnik MITHT*, 2009, vol. 4, no. 2, pp. 24–27.
37. Bryk Ya.A., Eliseev O.A., Smirnov D.N. Corrosion protection of magnesium alloys polysulphide sealants. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 08, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-10-10.
38. Zakharov V.P., Ganiev G.M., Tereshchenko K.A., Utilin N.V. Perspective technological solutions for the production of low molecular weight butyl rubber used as the basis of sealants. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2016, no. 12, pp. 11–15.
39. *Technology of rubber: compounding and testing*. Ed. J.S. Dick. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2010, 620 p.
40. Vagin S.Yu., Vasin V.P., Zdorikova G.A., Rudakova T.A. Flame-retardant vibration damping material. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2010, vol. 19, no. 10, pp. 13–17.
41. Slobodkina K.N., Rudakov A.A., Makarov T.V., Wolfson S.I. Oil and petrol resistant sealing compositions based on nitrile rubber and thiokol. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2015, no. 5, pp. 12–14.
42. Kornev A.E., Bukanov A.M., Sheverdyayev O.N. *Technology of elastomeric materials: a textbook for universities*. Moscow: NPPA "Istek", 2009, 504 p.
43. Murtazina L.I., Garifullin A.R., Nikultsev I.A. et al. Effect of calcium carbonate on the properties of non-curing sealants based on ethylene propylene diene rubber and thermoplastics. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 21–26.
44. Murtazina L.I., Garifullin A.R., Nikultsev I.A. et al. Non-curing sealants of high filling based on ethylene propylene diene rubber. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, no. 24, pp. 71–73.
45. Ososhnik I.A., Shutilin Yu.F., Karmanova O.V. *Manufacture of rubber technical products*. Voronezh: Voronezh State Technol. Acad., 2007, 972 p.
46. Fedukin D.P., Makhles F.A. *Technical and technological properties of rubbers*. Moscow: Chemistry, 1985, 240 p.
47. Tager A.A. *Physico-chemistry of polymers*. Moscow: Scientific world, 2007, 576 p.
48. Meyer K.H. Propriétés de polymères en solution XVI. Interprétation statistique des propriétés thermodynamiques de systèmes binaires liquides. *Helvetica Chimica Acta*, 1940, vol. 23, no. 1, pp. 1063–1070. DOI: 10.1002/hlca.194002301130.

49. Baramboim N.K. *Mechanochemistry of macromolecular compounds*. Moscow: Chemistry, 1971, 364 p.
50. Shvarts A.G., Ginzburg B.N. *Combination of rubbers with plastics and synthetic resins*. Moscow: Chemistry, 1972, 224 p.
51. Bogdanov V.V., Torner R.V., Krasovsky V.N., Reger E.O. *Mixing polymers*. Leningrad: Chemistry, 1979, 192 p.
52. Gelfman M.I., Kovalevich O.V., Yustratov V.P. *Colloidal chemistry*. St. Petersburg: Lan, 2010, 336 p.
53. Bohn K. Die Einfriertemperatur des Polyäthylens. *Kolloid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere*, 1964, no. 1, pp. 10–15.
54. Berlin A.A., Wolfson S.A., Oshmyan V.G., Enikolopov N.S. *Principles of creation of composite polymeric materials*. Moscow: Chemistry, 1990, 240 p.
55. Perry E. Block polymers of styrene and acrylonitrile. *Journal of Applied Polymer Science*, 1964, vol. 8, no. 6, pp. 2605–2618. DOI: 10.1002/APP.1964.070080609.
56. Slonimsky G.L., Reztsova E.V. On the mutual solubility of polymers. V. Mechano-chemical combination. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, 1959, vol. 1, no. 4, pp. 534–538.
57. Novitskaya S.P., Nudelman Z.N., Dontsov A.A. *Fluoroelastomers*. Moscow: Chemistry, 1988, 240 p.
58. Laptev A.B., Nikolayev E.V., Kolpachkov E.D. Thermodynamic characteristics of aging of polymeric composite materials under conditions of real exploitation. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 80–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88.
59. Khorova E.A., Myshlyavtsev A.V., Strizhak E.A., Tretyakova N.A. Examination of hydrogenated butadiene-nitrile rubbers by methods of differential scanning calorimetry and dynamic mechanical analysis. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 11–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-11-16.
60. Kovrizhkina N.A., Kuznetsova V.A., Silaeva A.A., Marchenko S.A. Ways to improve the properties of paint coatings by adding different fillers (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
61. Kuznetsova V.A. Influence of the elastomeric modifier on mechanical and viscoelastic properties of epoxy and rubber compositions for erosion resistant coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-56-62.

Информация об авторах

Правада Екатерина Сергеевна, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вахрушева Яна Андреевна, начальник Научно-исследовательского отделения, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Герасимов Дмитрий Михайлович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чайкун Александр Михайлович, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ekaterina S. Pravada, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yana A. Vakhrusheva, Head of Scientific-Research Bureau, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry M. Gerasimov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander M. Chaikun, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.08.2022.

The article was submitted 03.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 19.08.2022.