

Научная статья

УДК 669.81

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-74-83

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ИНТЕРВАЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Антипов¹, М.А. Венедиктова¹, А.С. Пушница¹, Д.Д. Котельникова¹, А.В. Попов¹

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

Аннотация. *Представлены результаты исследований физических, огневых и теплофизических свойств огнезащитного материала на основе фторсилоксанового каучука с различными системами функциональных добавок. Работа направлена на расширение температурного интервала (до 200 °С) эксплуатации огнезащитных материалов в условиях, допускающих контакт с топливом. Исследования подтверждают эффективность фосфатно-азотной интумесцентной системы благодаря образованию под действием высоких температур прочного защитного кокса, предотвращающего распространение огня.*

Ключевые слова: *антипирены, фторсилоксановые каучуки, теплопроводность, плотность, воспламеняемость*

Для цитирования: Антипов В.В., Венедиктова М.А., Пушница А.С., Котельникова Д.Д., Попов А.В. Исследование возможности расширения температурного интервала эксплуатации огнезащитных материалов // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-74-83.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF INCREASING THE TEMPERATURE RANGE OF FIRE RETARDANT MATERIALS

V.V. Antipov¹, M.A. Venediktova¹, A.S. Pushnitsa¹, D.D. Kotelnikova¹, A.V. Popov¹

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 article describes the results of research (physical, fire and thermophysical) properties of the flame retardant material based on fluorosiloxane rubber with different systems of functional additives. The work is aimed at extending the temperature range (up to 200 °C) of fire retardant materials operation, in environments that allow contact with fuel. Research confirms the efficiency of phosphate-nitrogen intumescent system, due to the formation of a durable protective carbon backbone under the influence of high temperatures, preventing the spread of fire.*

Keywords: *flame-retardants, fluorosiloxane rubbers, thermal conductivity, density, flammability*

For citation: Antipov V.V., Venediktova M.A., Pushnitsa A.S., Kotelnikova D.D., Popov A.V. Investigation of the possibility of increasing the temperature range of fire retardant materials. Trudy VIAM, 2024, no. 10 (140), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-74-83.

Введение

Защита конструктивных элементов от перегрева (сохранение конструктивной устойчивости) в случае возникновения пожара, локализация возгорания на начальной стадии и его предотвращение являются основными задачами, решаемыми с применением вспенивающихся (интумесцентных) огнезащитных материалов [1–9].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны материалы для защиты от перегрева конструкций авиационной техники при воздействии пламени с температурой 1100 ± 50 °С в течение ≥ 15 мин. Огнезащитный материал марки ВЗО-9х используется для защиты конструкций из металла и полимерных композиционных материалов, работающих в контакте с горюче-смазочными материалами при температуре от -60 до $+120$ °С. Данный материал имеет высокую адгезию к различным подложкам, в том числе после вспенивания, что позволяет выдерживать вибрационное воздействие. Огнезащитные материалы марок ВОЗП-4 и ВЗО-9 предназначены для работы в воздушной среде при температурах от -60 до $+150$ °С, характеризуются стойкостью к климатическому старению и высокой коксуемостью. Высокая эластичность позволяет применять данные материалы для защиты конструкций, работающих при повышенных деформациях [10–12].

Развитие авиационной техники неразрывно связано с увеличением температур эксплуатации узлов изделий, что, в свою очередь, приводит к неизбежному повышению требований к условиям эксплуатации материалов. В настоящее время в узлах новой и перспективной авиационной техники, которые нуждаются в дополнительной огневой защите, температура в процессе эксплуатации может достигать 200 °С, что ограничивает применение ранее разработанных огнезащитных материалов.

Разработка огнезащитных материалов, работоспособных при таких высоких температурах, является сложной комплексной задачей, поскольку устойчивое образование коксового слоя предполагает выделение газов после расплавления пленки до начала ее затвердевания, т. е. до образования карбонизированного слоя. В связи с этим компоненты вспенивающей системы должны подбираться таким образом, чтобы они могли реагировать в определенной последовательности в узком температурном интервале [13].

В данной статье представлены результаты исследований комплекса физических, огневых и теплофизических характеристик огнезащитного материала с различными системами вспенивающих/карбонизирующихся добавок и антипиренов (функциональных добавок).

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.5. «Теплозащитные материалы и покрытия» [14–16].

Материалы и методы

В качестве объектов исследований выбраны огнезащитные составы на основе низкомолекулярного фторсилоксанового каучука. Указанный полимер отвечает необходимым требованиям к температуре эксплуатации, а также обладает стойкостью к воздействию горюче-смазочных материалов [17–21]. Вулканизирующую систему вводили в пасту перед формированием огнезащитного слоя, так как процесс структурирования данной системы осуществляется при температуре 23 ± 2 °С по технологии RTV (room temperature vulcanizing), продолжительность полного отверждения составляет 72 ч.

Выбор функциональных добавок основан на анализе научно-технической литературы [22–29] и учитывает их физические свойства. Поскольку основной задачей является расширение температурного интервала эксплуатации огнезащитных материалов, то температура разложения функциональных добавок не должна быть < 200 °С. Кроме того, при воздействии теплового потока на огнезащитный материал во вспененном состоянии коксовый слой с низкой теплопроводностью должен сохранять каркасность и прочность, чтобы не допустить перегрева элементов защищаемой конструкции. Физические свойства основных компонентов, выбранных для исследований, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства компонентов

| Компонент | Плотность, г/см ³ | Температура разложения, °С |
|---|------------------------------|----------------------------|
| Низкомолекулярный фторсилоксановый каучук | 1,05 | ≥250 |
| 2,2-бис(гидроксиэтил)пропан-1,3-диол | 1,40 | >200 |
| Аммонийная соль полифосфорной кислоты | 1,90 | 320 |
| 2,4,6-триамино-1,3,5-триазин | 1,60 | 370 |
| Бис(пентабромфениловый) эфир | 3,00 | 305 |
| Триоксид сурьмы | 5,20 | 930 |
| Полифосфат меламина | 1,85 | 350 |
| Цианурат меламина | 1,50 | 320 |
| Смесь антипиренов на основе азота и фосфора | 1,46 | 250 |

С целью изучения влияния функциональных добавок на теплофизические и эксплуатационные свойства материалов в лабораторных условиях изготовлены экспериментальные огнезащитные составы (табл. 2). Во всех составах в качестве полимерной матрицы использован низкомолекулярный фторсилоксановый каучук, а в качестве вулканизирующей системы – катализатор холодного отверждения и структурирующий агент.

Таблица 2

Экспериментальные огнезащитные составы

| Условный номер состава | Функциональные добавки |
|------------------------|---|
| 1 | 2,2-бис(гидроксиэтил)пропан-1,3-диол, аммонийная соль полифосфорной кислоты, 2,4,6-триамино-1,3,5-триазин |
| 2 | Бис(пентабромфениловый) эфир, триоксид сурьмы |
| 3 | Полифосфат меламина, цианурат меламина, смесь антипиренов на основе азота и фосфора |

Для исследования эффективности выбранных систем функциональных добавок определяли плотность в соответствии с ГОСТ 267–73; твердость по Шору А – ГОСТ 263–75; кратность вспенивания и горючесть – АП-25 (п. 853 (а), Приложение F, Часть I), ОСТ 1 90094–79; огнестойкость – СТО 1-595-20-532–2017. Определены потеря массы в динамическом режиме по ГОСТ 56721–2015 в диапазоне температур от 25 до 250 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин в среде воздуха (скорость потока 70 мл/мин) и коэффициент теплопроводности в соответствии с ГОСТ 57943–2017. Измерения проводили в среде аргона (скорость потока 70 мл/мин).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

При исследовании огнезащитных материалов в первую очередь определены физические характеристики. Значительное внимание в авиационной технике уделяется плотности материалов, применяемых в конструкции. От значений твердости по Шору А зависит способность материала сохранять эффективность на протяжении всего периода эксплуатации (стойкость к механическому воздействию).

Результаты физических испытаний экспериментальных составов приведены в табл. 3. При равном содержании функциональных добавок состав 1 характеризуется меньшей плотностью в сравнении с составами 2 и 3.

Таблица 3

Физические свойства огнезащитных составов

| Условный номер состава | Плотность, г/см ³ | Твердость по Шору А, усл. ед. |
|------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 1,17 | 52 |
| 2 | 1,31 | 38 |
| 3 | 1,26 | 68 |

Более низкую плотность состава 1 можно объяснить химической природой, внутренней структурой и взаимодействием компонентов на молекулярном уровне. Так, 2,2-бис(гидроксиметил)пропан-1,3-диол, являясь полиолом, способствует образованию легкой полиэфирной сетки. Аммонийная соль полифосфорной кислоты и 2,4,6-триамино-1,3,5-триазин могут образовать компактные структуры, содержащие значительное количество воздушных включений. Эти включения, в свою очередь, уменьшают общую плотность состава 1.

Высокая твердость составов 1 и 3, по-видимому, обусловлена высокой удельной поверхностью функциональных добавок. Возможно, компоненты, содержащие гидроксильные группы (2,2-бис(гидроксиметил)пропан-1,3-диол, цианурат меламина), участвуют в процессе отверждения, что приводит к увеличению твердости за счет образования большего количества пространственных сшивок. Очевидно, что на показатель плотности состава 3 также повлияло содержание антипиренов с высокой плотностью.

Согласно многочисленным теоретическим и экспериментальным исследованиям, при высокотемпературном воздействии в верхних слоях огнезащитного материала происходят увеличение толщины коксового слоя и его внутренний унос. Однако при продолжительном воздействии нижние невспененные слои материала, находящиеся в предпиролизной зоне, выполняют теплоизоляционную функцию. В связи с этим определение теплофизических характеристик огнезащитных материалов в исходном состоянии также представляет практический интерес.

Результаты теплофизических исследований представлены в табл. 4. В интервале температур до 200 °С наблюдается незначительное изменение тепловых эффектов, что указывает на высокую термостойкость данных составов. Потеря массы составила от 0,07 до 0,72 %. Можно сделать вывод, что огнезащитные составы сохраняют эксплуатационные характеристики в необходимом температурном интервале. Показатели теплопроводности обратно пропорциональны значениям плотности и подтверждают ранее сделанные предположения.

Таблица 4

Теплофизические свойства огнезащитных составов

| Условный номер состава | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | Потеря массы в изотермическом режиме при температуре 200 °С, % |
|------------------------|--|--|
| 1 | 0,30 | 0,67 |
| 2 | 0,14 | 0,72 |
| 3 | 0,21 | 0,07 |

С целью комплексной оценки влияния антипиренов на эффективность огнезащитного материала на основе фторсилоксанового каучука проведена оценка огневых характеристик. Горючесть огнезащитного материала оценивали в вертикальном положении, такие условия считаются наиболее сложными. Продолжительность выдержки составила 60 с, максимальная температура пламени горелки: 840 °С.

Исследования огнестойкости проводили на образцах, состоящих из металлической подложки из сплава Д16-АТ толщиной 2,0 мм с нанесенным на нее огнезащитным материалом толщиной 2,0±0,1 мм, с использованием средств контроля температуры на внешней стороне защищаемой поверхности при воздействии пламени

с температурой 1100 ± 50 °С. Результаты испытаний на горючесть и огнестойкость представлены в табл. 5.

Таблица 5

Показатели горючести огнезащитных составов

| Условный номер состава | Горючесть | Продолжительность остаточного горения, с | Температура на тыльной поверхности образца, °С |
|------------------------|----------------|--|--|
| 1 | Трудногорающий | 0 | 208 |
| 2 | | | 255 |
| 3 | Сгорающий | 35 | 308 |

Все составы являются огнестойкими. Наименьшая температура на подложке зафиксирована для состава 1, что указывает на высокую эффективность функциональных добавок. По показателю горючести составы 1 и 2 не поддерживают остаточного горения и являются трудногорающими. Состав 3 по показателю горючести не удовлетворяет требованиям АП-25, следовательно, не может рассматриваться в качестве эффективного огнезащитного материала для авиационной техники. Продолжительность остаточного горения состава 3, наполненного производными меламина, обусловлена критической толщиной образцов [30].

На рис. 1 показано изменение температуры на защищаемой поверхности образцов подложки из сплава Д16-АТ с нанесенным огнезащитным материалом.

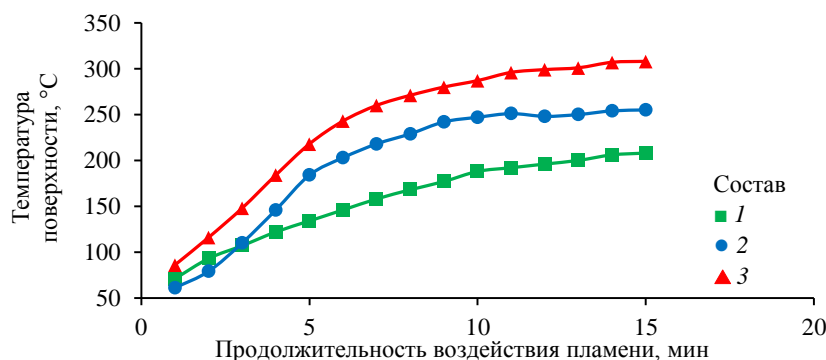


Рис. 1. Зависимость температуры на защищаемой поверхности образцов от продолжительности воздействия пламени с температурой 1100 ± 50 °С

Составы 1 и 3 имеют схожий механизм вспенивания. Однако состав 3 демонстрирует недостаточную стойкость к воздействию огня, так как его температура на тыльной стороне превышает значения, полученные для состава 1, на 48 % и достигает 308 °С. Можно предположить, что это связано с соотношением функциональных добавок. Так, в составе 1 подобрано оптимальное содержание полигидратных компонентов, образующих при взаимодействии с кислотными, прочный кокс. Он состоит из жесткой оболочки без трещин и мягкой пористой структуры внутри, препятствующей движению тепловых потоков.

В составе 3 преобладает цианурат меламина. При поглощении тепла данное соединение сублимируется и разлагается в процессе сгорания, отводя тепло. В то же время при разложении выделяются инертные газы, такие как аммиак, которые разбавляют кислород и горючие газы. При этом оболочка кокса недостаточно прочная, имеет трещины у основания. По этой причине усиливается теплопередача, и металлическая подложка сильнее нагревается.

Галогенсодержащий антипирен, входящий в состав 2, применяется в сочетании с оксидом сурьмы и работает по принципу снижения температуры пламени в газовом слое

у поверхности полимерной матрицы, что способствует ингибированию процесса горения. В связи с этим данная система эффективно работает на первой стадии разложения, где все процессы происходят во фронте деструкции на поверхности материала (рис. 2). При продолжительном высокотемпературном воздействии по причине недостаточной толщины коксового слоя материал быстро переходит от стадии нестационарного разложения (внутреннего уноса) к стадии механического разрушения и уноса коксового слоя.

На рис. 2 изображены экспериментальные образцы с исследуемыми огнезащитными материалами после испытаний на определение огнестойкости. Анализ внешнего вида вспененного слоя показывает, что его плотность и пористость могут варьироваться в зависимости от соотношения азота и фосфора в антипиренах для составов 1 и 3. В составе 1, содержащем большее количество фосфора, наблюдается более плотная структура коксового слоя. Это свидетельствует о более высокой термостойкости и меньшей прогораемости данного материала. Состав 2 имеет небольшой прочный коксовый слой. Внешний вид образцов подтверждает результаты испытаний, полученные при оценке огнестойкости.

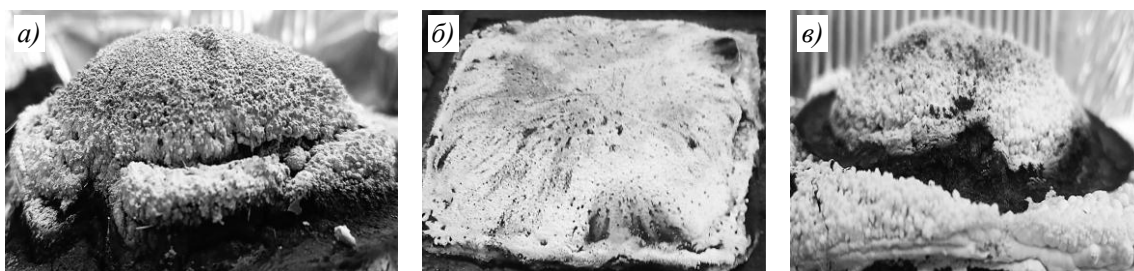


Рис. 2. Внешний вид вспененных под влиянием огня образцов с огнезащитными материалами, изготовленными с применением составов 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

На рис. 3 приведены результаты определения кратности вспенивания до и после экспозиции в топливе ТС-1 при температуре 23 ± 2 °С в течение 30 сут. Кратковременный контакт поверхности огнезащитного материала с топливом ТС-1 незначительно влияет на формирование коксового слоя. Так, для состава 3 кратность вспенивания уменьшилась на 13 %, для состава 2 – на 6 %. При этом наибольшее значение коэффициента вспенивания огнезащитного материала до и после экспозиции соответствует составу 1. Несмотря на незначительное снижение коэффициента вспенивания, необходимо обратить внимание на потенциальные долгосрочные последствия воздействия топлива на огнезащитные материалы и предусмотреть применение дополнительного слоя специализированного лакокрасочного материала с целью минимизации негативных последствий в процессе эксплуатации.

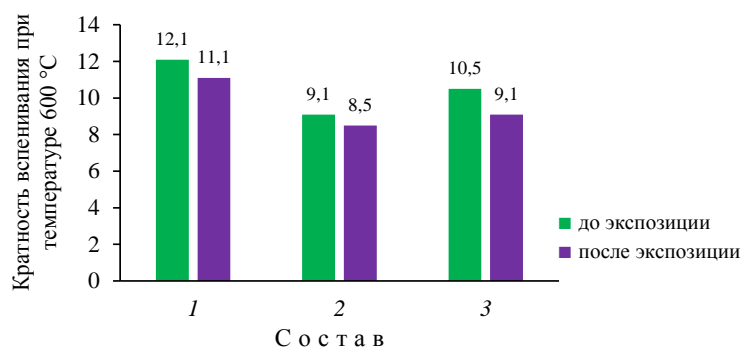


Рис. 3. Кратность вспенивания огнезащитного материала до и после экспозиции в топливе ТС-1 в течение 30 сут

Следует отметить, что исследованные составы огнезащитных материалов вносят значительный вклад в понимание механизма вспенивания и его зависимости от химической природы антипиренов. В частности, структурные различия фторсилоксановых и других полимерных матриц могут существенно влиять на эффективность огнезащитного состава. Полимерная матрица служит основой для формирования вспененной структуры, ее взаимосвязь с антипиренами определяет конечный результат термической защиты поверхности материала.

Заключения

Анализируя результаты проведенных испытаний огнезащитных материалов, следует выделить следующие преимущества разработанных составов на основе низкомолекулярных фторсилоксановых каучуков:

- вулканизация проходит при температуре окружающей среды 23 °С;
- низкая плотность;
- работоспособность в условиях кратковременного контакта с топливом.

Огнезащитный материал, изготовленный с применением состава 1, эффективно защищает элементы конструкций авиационной техники при температуре до 200 °С без потери функциональных свойств.

Важно отметить, что эффективность фосфатно-азотной интумесцентной системы в составе на основе фторсилоксановых каучуков обусловлена не только химической стойкостью, но и высокой термостойкостью. Исследования показывают, что такие материалы под действием высоких температур образуют плотный защитный слой, предотвращая распространение огня и дальнейшее разрушение структуры.

Не менее важным аспектом является проведение дополнительных исследований по выявлению механизмов синергетического действия антипиренов и оксида сурьмы, что может открыть новые перспективы для разработки высокоэффективных огнезащитных систем. Более глубокое понимание данных процессов позволит не только улучшить существующие составы, но и разработать инновационные решения, обеспечивающие максимальную защиту различных конструкций и материалов от воздействия высоких температур.

Благодарности

Авторы выражают благодарность С.Л. Барботько и В.А. Большакову за помощь в проведении высокотемпературных исследований.

Список источников

1. Гончарова П.Ю., Бабкин О.Э., Сиротинина М.В. Рецептурные принципы создания эффективных огнезащитных УФ-отверждаемых композиций вспучивающегося типа // Инновационные материалы и технологии в дизайне. СПб., 2016. С. 42–48.
2. Габдулин Р.Ш. Эффективные способы огнезащиты строительных конструкций // Безопасность. 2011. № 1. С. 48–49.
3. Яковлев А.Д., Яковлев С.А. Лакокрасочные покрытия функционального назначения. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2016. 272 с.
4. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 424 с.
5. Mouritz A.P., Gibson A.G. Fire properties of polymer composite materials. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2007. P. 59–63.
6. Lyon R.E. Fire-safe aircraft cabin materials // Fire & Polymers, ACS Symposium Series. 1995. No. 559. P. 618–638.
7. Авдудевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / под ред. В.К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1975. 623 с.

8. Халтуринский Н.А., Попова Т.В., Берлин А.А. Горение полимеров и механизм действия антипиренов // Успехи химии. 1984. Т. 53. № 2. С. 326–346.
9. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981. 280 с.
10. Краснов Л.Л., Кирина З.В. Материалы, обеспечивающие надежность работы конструктивных элементов в условиях пожара // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 10. С. 48–52.
11. Венедиктова М.А., Краснов Л.Л., Кирина З.В. Некоторые аспекты применения огнезащитных покрытий (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника. 2018. № 1–2. Ст. 06. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 07.09.2024).
12. Венедиктова М.А., Евдокимов А.А., Краснов Л.Л., Петрова А.П. Исследование возможности применения огнезащитной пасты для повышения пожаробезопасности конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-67-75.
13. Зыбина О.А., Варламов А.В., Чернова Н.С., Мнацаканов С.С. О роли и превращениях компонентов огнезащитных вспучивающихся лакокрасочных композиций в процессе термолиза // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82. № 4. С. 1445–1449.
14. 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.
15. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Екатеринбург, 2016. С. 25–26.
16. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
17. Шетц М. Силиконовый каучук. М.: Химия, 1975. 400 с.
18. Долгов О.Н., Воронков М.Г., Гринблат М.П. Кремнийорганические жидкие каучуки и материалы на их основе. Л.: Химия, 1975. 112 с.
19. Большой справочник резинщика: в 2 ч. / под ред. С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозова. М.: Техинформ, 2012. Ч. 1, 2. 1385 с.
20. Каучук и резина. Наука и технология / под ред. Дж. Марка, Б. Эрмана, Ф. Эйрича; пер. с англ. / под ред. А.А. Берлина, Ю.Л. Морозова. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 768 с.
21. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. М.: Исток, 2009. 502 с.
22. Крашенинникова М.В. Огнезащитные вспучивающиеся материалы на основе органорастворимых пленкообразователей // Лакокрасочные материалы и их применение. 2006. № 12. С. 14–16.
23. Павлович А.В., Владенков В.В., Изюмский В.Н., Кильчицкая С.Л. Огнезащитные вспучивающиеся покрытия // Лакокрасочная промышленность. 2012. № 5. С. 22–27.
24. Заиков Г.Е. Горение, деструкция и стабилизация полимеров. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 421 с.
25. Кодолов В.И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. М.: Химия, 1976. 98 с.
26. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 156 с.
27. Потапова А.И., Боброва И.И., Евдокимов А.А., Венедиктова М.А. Рецептурные приемы создания эластомерных композиций с пониженной горючестью // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-60-77.
28. Кондрашов С.В., Соловьянчик Л.В., Ларионов С.А., Вольный О.С. Исследование влияния антипиренов на горючесть и показатель текучести расплава алифатических полиамидов // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-52-63.
29. Гаращенко А.Н., Кульков А.А., Страхов В.Л. Влияние срока эксплуатации на огнезащитную эффективность вспучивающихся покрытий и огнестойкость конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 09. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-97-110.

30. Барботько С.Л., Вольный О.С., Шуркова Е.Н. Построение феноменологической модели, описывающей изменение характеристики горючести (продолжительности остаточного горения) в зависимости от толщины полимерного материала // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-107-116.

References

1. Goncharova P.Yu., Babkin O.E., Sirotinina M.V. Formulation principles for creating effective fire-retardant UV-curable intumescent compositions. *Innovative materials and technologies in design*. St. Petersburg, 2016, pp. 42–48.
2. Gabdulin R.Sh. Effective methods of fire protection of building structures. *Bezopasnost*, 2011, no. 1, pp. 48–49.
3. Yakovlev A.D., Yakovlev S.A. *Functional-purpose paint and varnish coatings*. St. Petersburg: Khimizdat, 2016, 272 p.
4. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyyenko O.A., Shurkova E.N. *Fire safety assessment of polymeric materials for aviation purposes: analysis of the state, test methods, development prospects, methodological features*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 424 p.
5. Mouritz A.P., Gibson A.G. *Fire properties of polymer composite materials*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2007, pp. 59–63.
6. Lyon R.E. Fire-safe aircraft cabin materials. *Fire & Polymers, ACS Symposium Series*, 1995, no. 559, pp. 618–638.
7. Avduevsky V.S., Galitsevsky B.M., Glebov G.A. *Fundamentals of Heat Transfer in Aviation and Rocket-Space Engineering*. Ed. V.K. Koshkin. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 623 p.
8. Khalturinsky N.A., Popova T.V., Berlin A.A. Combustion of Polymers and the Mechanism of Action of Flame Retardants. *Uspekhi Khimii*, 1984, vol. 53, no. 2, pp. 326–346.
9. Aseeva R.M., Zaikov G.E. *Combustion of Polymer Materials*. Moscow: Nauka, 1981, 280 p.
10. Krasnov L.L., Kirina Z.V. Materials Ensuring the Reliability of Structural Elements in Fire Conditions. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2012, no. 10, pp. 48–52.
11. Venediktova M.A., Krasnov L.L., Kirina Z.V. Some aspects of the application of fire-protective coatings (review). *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2018, no. 1–2, paper no. 06. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: September 07, 2024).
12. Venediktova M.A., Evdokimov A.A., Krasnov L.L., Petrova A.P. Research of possibility of application of fireproof paste for increase of fire safety of designs from polymeric composite materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-67-75.
13. Zybina O.A., Varlamov A.V., Chernova N.S., Mnatsakanov S.S. On the role and transformations of components of fire-retardant intumescent paint and varnish compositions in the process of thermolysis. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2009, vol. 82, no. 4, pp. 1445–1449.
14. 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 tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
15. 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*. Ekaterinburg, 2016, pp. 25–26.
16. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
17. Shetz M. *Silicone rubber*. Moscow: Khimiya, 1975, 400 p.
18. Dolgov O.N., Voronkov M.G., Grinblat M.P. *Organosilicon liquid rubbers and materials based on them*. Leningrad: Khimiya, 1975, 112 p.
19. *The Big Handbook of the Rubber Manufacturer*: in 2 parts. Eds. S.V. Reznichenko, Yu.L. Morozov. Moscow: Tekhinform, 2012, part 1, 2, 1385 p.
20. *Rubber and Rubber. Science and Technology*; trans. from Engl. Eds. A.A. Berlin, Yu.L. Morozov. Dolgoprudny: Intellect, 2011, 768 p.

21. Kornev A.E., Bukanov A.M., Sheverdyayev O.N. *Technology of Elastomeric Materials*. Moscow: Istok, 2009, 502 p.
22. Krashennikova M.V. Fire-retardant intumescent materials based on organosoluble film formers. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2006, no. 12, pp. 14–16.
23. Pavlovich A.V., Vladenkov V.V., Izyumsky V.N., Kilchitskaya S.L. Fire-retardant intumescent coatings. *Lakokrasochnaya promyshlennost*, 2012, no. 5, pp. 22–27.
24. Zaikov G.E. *Combustion, destruction and stabilization of polymers*. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2008, 421 p.
25. Kodolov V.I. *Flammability and fire resistance of polymeric materials*. Moscow: Khimiya, 1976, 98 p.
26. Kodolov V.I. *Flame retardants for polymeric materials*. Moscow: Khimiya, 1980, 156 p.
27. Potapova A.I., Bobrova I.I., Evdokimov A.A., Venediktova M.A. Prescription techniques for creating elastomeric compositions with reduced flammability. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-60-77.
28. Kondrashov S.V., Solovyanchik L.V., Larionov S.A., Volny O.S. Investigation of the effect of flame retardants on the flammability and fluidity of the melt of aliphatic polyamides. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-52-63.
29. Garashchenko A.N., Kulkov A.A., Strakhov V.L. The effect of the service life on the flame-retardant efficiency of the bulging coatings and the fire resistance of structures. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-97-110.
30. Barbotko S.L., Volnyy O.S., Shurkova E.N. Creation of the phenomenological model describing change of the characteristic of combustibility (duration of residual burning) depending on thickness of polymeric material. *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-107-116.

Информация об авторах

Антипов Владислав Валерьевич, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Венедиктова Мария Анатольевна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пушница Анна Сергеевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Котельникова Дарья Дмитриевна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Попов Алексей Валерьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladislav V. Antipov, Deputy General Director for the Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mariy A. Venediktova, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna S. Pushnitsa, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Darya D. Kotelnikova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey V. Popov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.09.2024.
The article was submitted 13.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 17.09.2024.